

水肥调控下土壤碳氮含量、酶活性和三七产量的响应特征研究

石小兰¹, 脱云飞¹, 丁明净¹, 刘香凝¹,
王昭仪¹, 刘艳伟², 向 萍¹, 杨启良²

(1.西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2.昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要:为揭示水肥对三七田土壤碳氮含量、酶活性和产量调控效应,明确三七不同生育时期最适水肥调控模式,于2018—2021年在云南省红河州泸西县三七种植基地开展田间试验,设3个灌水水平(5 mm, W1; 10 mm, W2; 15 mm, W3)和4个不同生育时期(根增期、苗期、花期、果期)施肥配比水平(25% : 25% : 25% : 25%, F1; 20% : 25% : 30% : 25%, F2; 15% : 30% : 30% : 25%, F3; 10% : 40% : 20% : 30%, F4),以全生育期不灌溉施肥处理为对照(CK),研究不同水肥调控模式对土壤碳氮含量、酶活性、三七产量、总皂苷含量及各指标间相互关系的影响,同时采用CRITIC-VIKOR法对最适水肥调控模式综合评价。结果表明:灌水量和生育时期施肥比对三七根增期、苗期、花期和果期土壤全氮、有机碳含量和脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性以及产量、总皂苷含量有显著影响($P < 0.05$),与CK相比,花期W2F3处理土壤全氮含量较其他处理显著提高7.69%~92.50%,W1F1处理土壤有机碳含量较其他处理显著提高5.11%~7.11%;根增期各灌水施肥处理土壤脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性分别平均较CK增加7.20%、19.82%和47.44%,过氧化氢酶活性降低19.16%。与CK相比,收获后水肥调控处理三七水分利用效率平均提高53.83%,肥料偏生产力平均提高66.30%,W2F4处理产量最高(2 797.25 kg · hm⁻²),W2F3处理总皂苷含量最高(176.34 mg · g⁻¹)。综合评分法结果表明,三七根增期W3F1处理 Q 值为0.03,苗期W2F3处理 Q 值为0.02,花期W2F3处理的 Q 值为0.01,果期W3F2处理的 Q 值为0.02;根增期和果期最佳灌溉施肥方案为W3F1和W3F2,苗期和花期最佳灌溉施肥方案为W2F3。

关键词:水肥调控;土壤碳氮含量;土壤酶活性;三七;产量

中图分类号:S567.23⁺6;S143.1;S274 **文献标志码:**A

Characteristics of soil carbon and nitrogen content, enzyme activity and *Panax notoginseng* yield under the control of water and fertilizer

SHI Xiaolan¹, TUO Yunfei¹, DING Mingjing¹, LIU Xiangning¹,
WANG Zhaoyi¹, LIU Yanwei², XIANG Ping¹, YANG Qiliang²

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

(2. College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Three irrigation levels (5 mm, W1; 10 mm, W2; 15 mm, W3) and four distinct fertility periods (rooting, seedling, flowering, fruiting) were established, along with varied fertilization ratios (F1: 25% : 25% : 25% : 25%; F2: 20% : 25% : 30% : 25%; F3: 15% : 30% : 30% : 25%; F4: 10% : 40% : 20% : 30%) in Yunnan Province in 2018–2021. The entire life cycle under non-irrigated fertilizer treatment served as the control (CK) to investigate effects of different water and fertilization control modes on soil carbon and nitrogen content, enzyme activity, *Panax notoginseng* yield, total saponin content and the interrelationships among the indexes were in-

收稿日期:2023-03-23

修回日期:2023-09-06

基金项目:国家自然科学基金(51979134);2021年度云南省农业联合专项面上项目(202101BD070001-077);云南省基础研究重点项目(202201AS070034);四川省栗子坪国家级自然保护区陆生动物生境调查研究(2021ZD0125)

作者简介:石小兰(1993–),女,甘肃陇南人,硕士研究生,研究方向为农田水肥高效利用。E-mail:s_xlsxl@163.com

通信作者:脱云飞(1976–),男,甘肃泾川人,博士,副教授,主要从事作物水肥高效利用与调控研究。E-mail:tyunfei@163.com

vestigated, and the CRITIC-VIKOR method was used for the comprehensive evaluation of the most suitable water and fertilization control modes. The results showed that: irrigation water and fertilizer ratios at different fertility periods had significant effects ($P<0.05$) on soil total nitrogen, organic carbon, urease, acid phosphatase, sucrase and catalase activities as well as yield and total saponin content in *P. notoginseng* at the root increase stage, seedling, flowering and fruiting stages. The total nitrogen content of the W2F3 treatment at the flowering stage was significantly higher than that of the other treatments by 7.69%~92.50% compared to that of CK, and the soil organic carbon content of the W1F1 treatment at the flowering stage was significantly higher than that of the other treatments by 5.11%~7.11%. The mean values of soil urease, sucrase and acid phosphatase activities at different irrigation and fertilization levels during the root increase period were increased by 7.20%, 19.82%, and 47.44% compared with CK, and peroxidase activity was decreased by 19.16%. Compared with CK, post-harvest water and fertilizer regulation treatments of *P. notoginseng* increased water use efficiency by 53.83% on average, fertilizer bias productivity by 66.30% on average, W2F4 treatment had the highest yield ($2\,797.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), and W2F3 treatment had the highest total saponin content ($176.34\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). The combined scoring method revealed specific Q values for *P. notoginseng*: 0.03 for the W3F1 treatment during the root increase stage, 0.02 for W2F3 during the seedling stage, 0.01 for W2F3 during flowering, and 0.02 for W3F2 during fruiting. The analysis identified W3F1 and W3F2 as the optimal irrigation and fertilization schemes for the root increase and fruiting stages, while W2F3 emerged as the optimal scheme for the seedling and flowering stages.

Keywords: water and fertilizer regulation; soil carbon and nitrogen content; soil enzymatic activity; *Panax notoginseng*; yield

三七(*Panax notoginseng*)是具有高效药用价值的传统中药,其主要成分皂苷能减轻血液病引起的疼痛,对免疫系统和神经系统等疾病的药理疗效显著^[1]。三七对生长环境要求苛刻,需特定的水、肥、光、气、温。水分因素通过影响皂苷合成途径关键基因的表达调控皂苷含量,进而影响三七的产量和品质^[2-3]。传统灌溉施肥方式导致三七病害高发,水肥利用率和产量品质降低^[4]。赵宏光等^[5]研究发现土壤水分含量为田间最大持水率的 56.4%~59.0%时可改善三七产量和品质,土壤水分持续增加则导致三七根腐病的发病率增加。水肥是作物生长过程中可以调控的环境影子,水肥互作影响土壤养分吸收、转化^[6]。赵文举等^[7]研究发现与对照相比,不同水肥处理番茄根质量、根长和根表面积分别增加 36.0%、6.27%和 3.94%。刘小刚等^[8]研究发现生育期适宜的施肥配比能促进芒果植株吸收养分,进而提高产量。李龙等^[9]研究表明氯化苦熏蒸处理能促进三七田土壤全氮、碱解氮、铵态氮、硝态氮和有效磷的转化,脲酶与酸性磷酸酶活性随生育时间延长先降后升,氮、磷、钾累积增加。水分胁迫影响三七皂苷含量,70%田间持水率处理比 55%和 85%处理的植株农艺性状、叶片含水率、叶绿素和光合效率高^[10]。酶在土壤养分转化中扮演重要角色^[11],土壤酶活性下降阻碍三七吸收营养物质,土壤中自毒物质积累量增加,导致连作障碍^[12]。游

琪^[13]研究发现三七各生育时期水肥耦合对土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、纤维素酶和脲酶活性都有极显著影响,200 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 灌水量+150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施肥量处理土壤过氧化氢酶活性较高,100 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 灌水量+60 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施肥量处理土壤脲酶活性较高,花期和果期 200 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 灌水量+150 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施肥量处理土壤纤维素酶活性较高。赵淞仪等^[14]研究发现当水分亏缺度为田间持水量的 50%时土壤脲酶活性达到最大;水分亏缺度为田间持水量的 60%时土壤过氧化氢酶和酸性磷酸酶活性最大;土壤含水量为田间持水量的 60%可提高土壤酶催化物质转化的能力,三七生长器官的增长速率也随之提高。不同灌溉制度下的最佳水肥用量不同,依据灌溉制度和栽培品种管理水肥以满足芝麻生长需求,有助于田间氮管理,不仅能防止对环境的负面影响,还能提高产量并节约农业投入^[15-16]。Liu 等^[17]研究发现优化氮肥施用时间和施用量可提高小麦籽粒产量并减少环境中的氮损失。

目前有关农田水肥高效利用与调控的研究大多集中在灌溉施肥制度、作物生理生长、生态环境和抗旱节水等方面,针对水肥调控下不同生育时期土壤养分含量、酶活性及三七产量变化情况的研究尚不多见。本研究通过分析土壤碳氮含量、酶活性和三七产量对不同水肥调控措施的响应特征,确定最佳水肥调控策略,以期为促进三七养分吸收和增产提质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于云南省红河州泸西县(24°15'N, 104°03'E),海拔 1 540 m,属北亚热带低纬高原山地

季风气候,干湿季节分明,雨季为每年 6—10 月,年均气温为 16.6℃,年均相对湿度为 65%~85%,年均降雨量为 850.0 mm,年均日照 2 122 h,无霜期 272.7 d。土壤类型以红壤为主,pH 为 4.81~6.85。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of the test soil

有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total potassium	全钾 Total potassium	速效钾 Available potassium	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	速效磷 Available potassium	pH	田间持水率 Field water-holding capacity/%
/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(g·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)	/(mg·kg ⁻¹)		
14.33	0.98	0.37	14.79	316.8	8.35	19.15	11.65	6.34	42.28

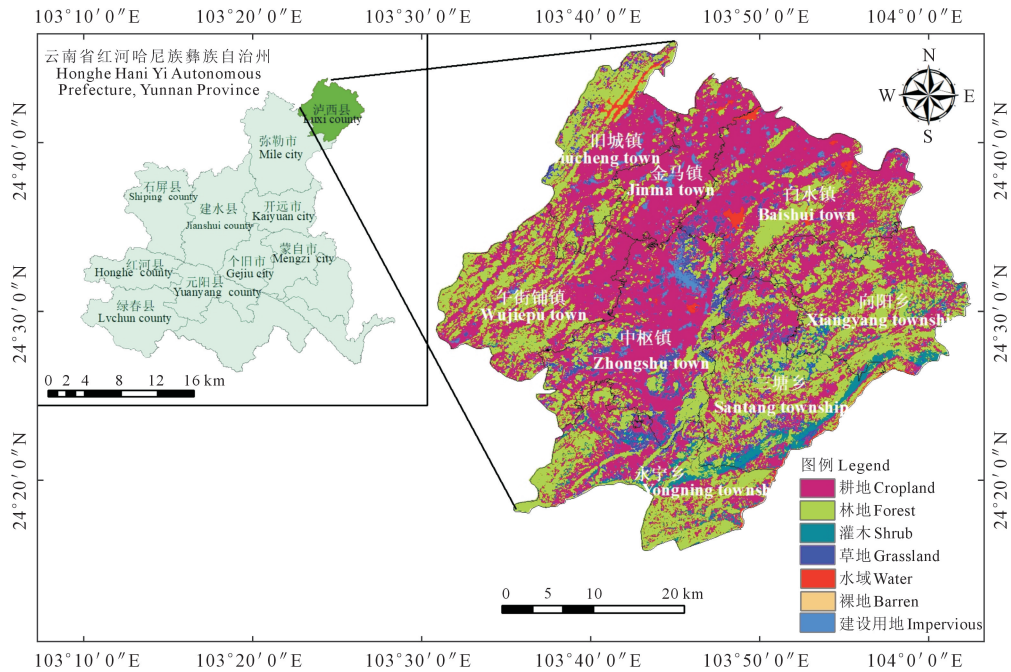


图 1 研究区地理位置
Fig.1 Geographical location of the study area

1.2 试验设计

试验于 2018—2021 年在泸西县大栗树村三七控水减排提质增效关键技术与示范基地(103°57'E,24°26'N)进行,三七生育时期划分为根增期(12 月~次年 2 月)、苗期(3—5 月)、花期(6—8 月)和果期(9—11 月)。根据当地三七种植高产高效灌溉施肥制度,试验设 3 个灌水量水平和 4 个生育期施肥配比水平,灌水量分别为 80%ET、60%ET 和 40%ET(ET 为田间持水率),折算灌水量分别为 5 mm (W1)、10 mm (W2)和 15 mm (W3);根增期:苗期:花期:果期施肥配比分别为 F1 (25%:25%:25%:25%)、F2 (20%:25%:30%:25%)、F3 (15%:30%:30%:25%)和 F4 (10%:40%:20%:30%),生育期施肥量均为 96 kg·667m⁻²;全生育

期不灌溉施肥处理为对照(CK),13 个处理,每个处理 3 次重复,共 39 个小区(长 16.70 m,宽 1.50 m)。每个生长阶段开始时,将各处理所需的水分和肥料混合施入各小区。

供试植株为采购于泸西县的三七苗,并在 2017 年底移栽至试验基地,种植密度为 5×10⁵ 株·hm⁻²,种植前开沟起垄,沟深 30 cm,沟底宽 40 cm,垄上铺设 10 cm 厚松针。供试肥料为德美水溶性有机肥,其主要成分为:N≥21%、P₂O₅≥21%、K₂O≥21%、腐殖酸≥6%、Fe 螯合态≥0.05%、Zn 螯合态≥0.05%、Cu 螯合态≥0.017%、Mn 螯合态≥0.05%、B≥0.1%、Mo≥0.007%、Hg≤5 mg·kg⁻¹、As≤10 mg·kg⁻¹、Cd≤10 mg·kg⁻¹、Cr≤50 mg·kg⁻¹、Pb≤50 mg·kg⁻¹。生育期定期防治病虫害和清除杂草。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤养分含量和酶活性测定 2018—2021 年每年采样时间分别为 1 月 15 日(根增期)、4 月 16 日(苗期)、7 月 14 日(花期)和 10 月 15 日(果期),各小区设置 1 个 1 m×1 m 取样点,以三七茎秆为中心沿水平方向外延每隔 10 cm 采集土样,取样深度为 0~60 cm,土壤样品自然晾干后分别过 0.25 mm 和 1.00 mm 网筛,测定各生育时期土壤养分含量和酶活性,各指标取 4 a 平均值进行分析。土壤全氮(TN)用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}_2$ 消煮,自动流动分析仪测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾容量法-外加热法进行测定^[18];过氧化氢酶(CAT)采用 KMnO_4 滴定法测定;脲酶(Ure)采用苯酚-次氯酸钠比色法测定;蔗糖酶(Sue)采用 3,5 二硝基水杨酸比色法测定;酸性磷酸酶(Acp)采用磷酸苯二钠比色法测定^[19]。

1.3.2 三七产量和皂苷含量测定 2021 年 11 月底三七收获期,各小区分别选取 3 株长势一致的三七,整株挖取,去除地上部分的杂质和泥土,清洗干净制备样品粉末,用液相法测定皂苷含量。将根系用清水洗净装入牛皮纸袋,放入烘箱 105℃ 杀青 30 min,烘干至恒重,各处理取 3 株测产,求平均值。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 CIRTIC-VIKOR 法综合评价

(1) 数据归一化:

$$N_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中, N_{ij} 为 i 个处理中第 j 个评价指标标准化后的数据; d_{ij} 为 i 处理中第 j 个评价指标的原始数据。

(2) 采用改进 CIRTIC 法确定权重^[20],以水肥调控土壤全氮、有机碳、酶活性、产量、皂苷和水肥利用效率的数据变异性为评价指标,计算权重,公式如下:

$$H_j = AP_j \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad (2)$$

$$\varphi_j = \frac{H_j}{\sum_{i=1}^n H_j} \quad (3)$$

式中, H_j 为第 j 个评价指标的信息量; AP_j 为第 j 个评价指标的平均差; ρ_{ij} 为第 i 个评价指标与第 j 个评价指标之间的相关系数; φ_j 为第 j 个评价指标的权重。

(3) 对决策矩阵进行 VIKOR 计算:VIKOR 法是一种多属性决策中最佳折中解的方法,用各备选方案的评估值与理想方案的接近程度来表示方案之间的优先顺序,以折中解被决策者接受^[21]。正负理

想解计算公式如下:

$$f_j^+ = 1(\max_{i1}, \max_{i2}, \dots, \max_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$f_j^- = 0(\min_{i1}, \min_{i2}, \dots, \min_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中, f_j^+ 为第 j 个评价指标的正理想解; f_j^- 为第 j 个评价指标的负理想解。

(4) 计算不同处理距离正理想解和负理想解的比值,公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \varphi_j \left(\frac{f_j^+ - N_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right) \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

$$R_i = \left\{ \max \left(\varphi_j \frac{f_j^- - N_{ij}}{f_j^+ - f_j^-} \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中, S_i 和 R_i 分别为第 i 个处理群体效用值和个体遗憾值; φ_j 表示各指标在不同处理所占权重。

(5) 计算利益比率与排序,公式如下:

$$Q_i = \mu \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} + (1 - \mu) \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$S_{\max} = \max S_i, S_{\min} = \min S_i, R_{\max} = \max R_i, R_{\min} = \min R_i \quad (9)$$

式中, Q_i 表示不同水肥调控处理利益比率,其值越小表明处理越好; μ 为决策机制系数,取 0.5,表示同时最大化群体效用和最小化个体遗憾。

1.4.2 水肥利用效率计算 三七水肥利用效率计算^[22]公式如下:

$$WUE = Y_e / W_e \quad (10)$$

$$PFP = Y_e / F_e \quad (11)$$

式中, WUE 为水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y_e 为总产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); W_e 为生育期总灌水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); PFP 为肥料偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); F_e 为种植期间总施肥量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

利用 Origin 2020 和 SPSS 25 进行数据统计分析,利用 CRITIC-VIKOR 法进行最佳水肥调控方案评价。

2 结果与分析

2.1 水肥调控对土壤全氮和有机碳含量的影响

由表 2 可知,各处理 4 个生育时期全氮含量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。根增期相同灌水水平下, W1 处理各施肥水平间全氮含量无显著差异, W2 处理的 F3 显著高于其他水平, W3 处理的 F1 显著高

于 F2; 相同施肥配比下, 仅 W1F3 与 W2F3 之间、W2F3 与 W3F3 之间全氮含量差异显著。苗期相同灌水水平下, W1 处理的 F4 全氮含量显著高于 F2, W2 处理的 F2 显著高于其他施肥水平, W3 处理各施肥水平间全氮含量无显著差异; 随灌水量增加全氮含量均值先增加后减小, W2F2 处理最高, 较其他处理显著提高 13.74%~67.42%。花期相同灌水水平下, W2 处理的 F3 显著高于其他施肥水平, W3 处理的 F2 显著高于 F1; 相同施肥配比下, F1、F2 和 F3 水平下全氮含量均随灌水量增加呈先增后减的趋势, W2F3 处理最高, 较其他处理显著提高 7.69%~92.50%。果期相同灌水水平下, W1 处理的 F1 全氮含量最低, W2 处理的 F3 全氮含量显著高于 F1、F2 和 F4, W3 处理各施肥配比间无显著差异; 相同施肥配比下, 前 3 个施肥配比水平均以 W2 灌水处理全氮含量最高, W2F3 显著高于其他处理, 增幅为 9.42%~91.14%。不同处理全氮含量均值花期最大, 根增期最小。

由表 2 可知, 不同处理 4 个生育时期有机碳含量均显著高于 CK ($P<0.05$)。根增期相同灌水水平下, W1 处理的 F4 有机碳含量显著高于 F2、F3, W2 处理的 F1、F2 显著高于 F3、F4, W3 处理的 F3、F4 显著高于 F1、F2; 相同施肥配比下, W1F1、W2F1 显著高于 W3F1, W1F2、W2F2 显著高于 W3F2, W3F3 显著高于 W2F3, W1F4、W3F4 显著高于 W2F4。苗期相同灌水水平下, W1 处理的 F1、F4 有机碳含量

显著高于 F2、F3, W2 处理较其他处理提高 3.10%~8.15%, W3 处理的 F3 显著高于 F1、F2; 相同施肥配比下, W1F1、W2F1 显著高于 W3F1, W1F2、W2F2 显著高于 W3F2, W3F3 显著高于 W1F3、W2F3, W1F4 显著高于 W2F4、W3F4。花期相同灌水水平下, W1F1 处理的有机碳含量最高, 较其他处理显著提高 5.11%~7.11%; 相同施肥配比下, W1F1 显著高于 W3F1, W1F2、W2F2 显著高于 W3F2, W3F3 显著高于 W2F3。果期相同灌水水平下, W1 处理的 F1、F4 有机碳含量显著高于 F2、F3, W2 处理的 F1、F2 显著高于 F3、F4, W3 处理各施肥水平间无显著差异; 相同施肥配比下, W1F1、W2F1 有机碳含量显著高于 W3F1, W2F2 显著高于 W3F2, W1F4 显著高于 W2F4、W3F4。根增期、苗期、花期和果期 W1 灌水水平有机碳含量高于 W2、W3, W1 水平各施肥处理有机碳含量均值较 W2 和 W3 各处理 4 个时期分别提高 7.20%~14.78%、3.10%~8.15%、5.11%~7.11%和 2.90%~6.86%。

2.2 水肥调控对土壤酶活性的影响

由表 3 可知, 相同灌水水平下, 各生育时期脲酶活性均随施肥配比呈先增后降的趋势, 各灌水水平下均为 F3 施肥处理脲酶活性最大, W1F3 处理较同水平下其余施肥处理 (W1F1、W1F2、W1F4) 脲酶活性平均值在根增期、苗期、花期和果期增幅分别为 26.30%、37.99%、20.25%和 27.70%, W2F3 处理相应增幅分别为 41.19%、30.77%、30.46%和 31.60%, W3F3

表 2 水肥调控下土壤碳氮变化特征/(g·kg⁻¹)

Table 2 Characteristics of soil carbon and nitrogen changes under water and fertilizer regulation								
处理 Treatment	根增期 Rooting period		苗期 Seedling period		花期 Flowering period		果期 Fruiting period	
	全氮 TN	有机碳 SOC	全氮 TN	有机碳 SOC	全氮 TN	有机碳 SOC	全氮 TN	有机碳 SOC
W1F1	1.02±0.02bc	32.94±1.25ab	1.22±0.02bc	34.59±1.25a	1.30±0.02bc	37.05±1.21a	1.10±0.02c	35.34±1.29a
W1F2	1.01±0.04bc	31.56±0.25b	1.09±0.04cd	32.27±0.25b	1.21±0.03c	34.41±0.14b	1.20±0.07bc	32.45±0.24bc
W1F3	1.09±0.09b	28.03±1.75c	1.22±0.07bc	29.79±1.75c	1.27±0.05c	32.42±0.95bc	1.38±0.03b	30.65±1.16c
W1F4	1.22±0.02ab	33.93±0.50a	1.31±0.07b	34.88±0.50a	1.39±0.02bc	35.71±0.39ab	1.30±0.03b	35.11±0.40a
W2F1	1.02±0.03bc	32.05±1.18ab	1.21±0.02bc	34.91±1.58a	1.43±0.05b	35.38±1.63ab	1.35±0.06b	35.03±1.35a
W2F2	0.97±0.06c	32.85±1.42ab	1.49±0.04a	33.96±1.42ab	1.40±0.04b	35.13±1.11ab	1.24±0.05bc	34.74±1.10ab
W2F3	1.29±0.06a	26.45±1.44d	1.14±0.04c	29.38±1.38c	1.54±0.06a	31.53±1.66c	1.51±0.06a	30.15±1.16c
W2F4	1.10±0.04b	26.62±0.89d	1.01±0.02cd	29.32±0.89c	1.38±0.01bc	30.77±0.80c	1.24±0.06bc	29.87±0.52cd
W3F1	1.17±0.05ab	24.53±1.62e	1.20±0.06bc	28.34±1.12cd	1.10±0.07d	32.39±1.14bc	1.05±0.03c	29.79±1.16cd
W3F2	0.92±0.04c	23.44±1.84e	1.19±0.03c	29.26±1.84c	1.35±0.01bc	31.25±1.25c	1.08±0.05c	30.13±1.55c
W3F3	1.01±0.06bc	30.75±1.13b	1.25±0.09bc	32.04±1.53b	1.25±0.03c	33.94±1.42b	1.22±0.05bc	32.61±1.08bc
W3F4	1.18±0.03ab	31.46±1.32b	1.08±0.08cd	31.98±1.01bc	1.30±0.01bc	32.74±1.36bc	1.26±0.08bc	32.45±1.63bc
CK	0.73±0.06d	8.76±1.78f	0.89±0.09e	13.14±1.73e	0.80±0.05e	18.34±1.44d	0.79±0.06d	13.83±1.96e

注:同列数据后无相同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$,LSD 检验)。下同。
Note:Data marked without the same lowercase letters in a column meant significant difference among treatments ($P<0.05$, LSD test). The same below.

表 3 水肥调控下土壤酶活性变化特征

Table 3 Characteristics of changes in soil enzyme activities under water and fertilizer regulation

处理 Treatment	根增期 Rooting period			苗期 Seedling period			花期 Flowering period			果期 Fruiting period		
	脲酶 Urease $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	蔗糖酶 Sucrase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	酸性磷酸酶 Acid phosphatase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	脲酶 Urease $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	蔗糖酶 Sucrase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	酸性磷酸酶 Acid phosphatase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	脲酶 Urease $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	蔗糖酶 Sucrase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	酸性磷酸酶 Acid phosphatase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	脲酶 Urease $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	蔗糖酶 Sucrase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	酸性磷酸酶 Acid phosphatase $/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$
W1F1	3.62±0.20e	19.99±3.80e	2.73±0.12d	5.63±0.40bc	4.24±0.16d	24.59±3.91d	3.63±0.32d	6.29±0.40c	6.34±0.11d	32.41±2.89f	5.64±0.28cd	7.15±0.31de
W1F2	4.41±0.14d	25.36±1.37d	2.83±0.16d	5.83±0.20bc	4.65±0.18d	28.56±1.43d	4.13±0.34c	6.13±0.26c	7.27±0.18cd	37.88±2.15e	5.86±0.30cd	7.48±0.30d
W1F3	5.57±0.18c	37.84±2.42bc	4.28±0.26b	6.96±0.37b	6.72±0.15ab	41.92±3.30bc	5.05±0.37b	7.15±0.22b	8.73±0.21bc	62.75±1.96c	7.46±0.26bc	7.88±0.19d
W1F4	5.20±0.17c	32.80±2.72c	3.44±0.31c	7.41±0.37ab	5.72±0.12c	37.72±2.80c	4.95±0.24bc	7.96±0.29b	8.18±0.06c	49.11±2.73d	6.36±0.22c	8.80±0.38bc
W2F1	3.80±0.20e	36.50±1.14bc	3.56±0.26c	5.62±0.48bc	4.35±0.17d	39.43±2.32c	4.20±0.16c	6.44±0.04c	6.31±0.19d	53.36±2.96cd	5.63±0.41d	8.13±0.34c
W2F2	4.35±0.15d	39.43±1.37bc	4.02±0.32b	5.94±0.43bc	5.31±0.20c	43.36±1.56bc	4.50±0.20c	6.62±0.52c	6.82±0.18d	57.18±1.58cd	6.76±0.31c	8.33±0.06c
W2F3	6.41±0.11b	48.22±2.30a	5.08±0.32ab	6.36±0.26b	6.97±0.13ab	52.95±2.67ab	5.76±0.32b	7.95±0.52b	9.38±0.12b	72.23±2.74b	8.33±0.44ab	8.61±0.18bc
W2F4	5.46±0.19c	42.58±2.27b	4.29±0.19b	7.86±0.51ab	6.33±0.15b	48.55±1.92b	5.39±0.31b	8.23±0.51a	8.43±0.12bc	67.13±1.96bc	7.78±0.47b	8.99±0.32bc
W3F1	4.12±0.19d	35.52±2.50bc	3.93±0.17c	5.67±0.89bc	4.51±0.11d	41.66±2.02bc	4.23±0.23c	6.11±0.92c	5.65±0.41e	66.01±2.74bc	6.63±0.29c	8.31±0.13c
W3F2	4.74±0.33d	42.33±2.93b	4.24±0.48b	6.28±0.54b	5.39±0.26c	46.26±3.44b	4.93±0.30bc	7.42±0.38b	7.35±0.10cd	68.06±2.96bc	7.25±0.31bc	8.70±0.41bc
W3F3	7.20±0.19a	49.95±2.09a	5.36±0.16a	7.34±0.20ab	7.73±0.12a	57.34±2.52a	6.97±0.38a	7.77±0.45b	10.63±0.20a	78.14±2.38a	9.06±0.24a	9.19±0.16b
W3F4	6.61±0.11b	42.24±3.10b	4.54±0.39b	7.68±0.29ab	7.68±0.29a	47.81±2.92b	6.24±0.36a	8.43±0.59a	9.58±0.12b	72.54±2.69b	8.25±0.24ab	9.97±0.24ab
CK	4.78±0.18d	31.49±2.37c	2.73±0.40d	8.10±0.22a	5.24±0.15c	38.98±2.63c	3.28±0.16d	8.91±0.27a	6.53±0.15d	48.74±2.67d	3.99±0.28e	10.21±0.40a

处理相应增幅分别为 49.61%、31.91%、41.17% 和 34.25%。相同施肥配比下,根增期和苗期脲酶活性基本随灌水量的增加而增加,即 $W1 < W2 < W3$,根增期 $W3$ 较 $W2$ 和 $W1$ 增幅为 13.24%~20.59%,苗期增幅为 10.24%~18.66%;花期各施肥配比下灌水量间脲酶活性变化规律不同, $F1$ 水平下 $W3$ 显著低于 $W1$ 和 $W2$, $F2$ 、 $F3$ 和 $F4$ 水平下则均为 $W3$ 最大,较其他处理增加 7.37%~8.81%;果期 $F1$ 水平下,各灌水量处理之间脲酶活性差异不显著,其余 3 个施肥配比下脲酶活性均随灌水量的增加先降后升,其中 $W3F3$ 较 $W1F3$ 、 $W2F3$ 分别显著增加 7.60%、8.13%, $W3F4$ 较 $W1F4$ 、 $W2F4$ 分别显著增加 4.38%、13.43%。4 个生育时期 $W3F3$ 脲酶活性显著高于其他处理。

由表 3 可知,相同灌水水平下,各生育时期蔗糖酶活性均随施肥配比的变化呈先增后降的趋势,各灌水水平下均为 $F3$ 施肥处理最大, $W1F3$ 处理较同一灌水水平下 $F1$ 、 $F2$ 、 $F4$ 施肥处理蔗糖酶活性平均值在根增期、苗期、花期和果期增幅分别为 31.16%、27.74%、36.57%和 22.37%, $W2F3$ 处理相应增幅分别为 22.07%、20.95%、21.96%和 24.37%, $W3F3$ 处理相应增幅分别为 24.78%、5.67%、5.33%和 9.81%。相同施肥配比下,各生育时期蔗糖酶活性基本随灌水量的增加而增加, $W3$ 蔗糖酶活性最大,根增期 $W3$ 较 $W2$ 和 $W1$ 增幅为 1.99%~46.69%,苗期增幅为 4.76%~45.39%,花期增幅为 13.95%~56.33%,果期增幅为 8.68%~41.60%。可以看出,花期蔗糖酶活性整体波动幅度较大,生育期随灌水量的增加表现为 $F3 > F4 > F2 > F1$ 。

由表 3 可知,各生育时期酸性磷酸酶活性均随施肥配比的变化呈先增后降的趋势,根增期 $W1$ 处理的 $F3$ 、 $F4$ 酸性磷酸酶活性显著高于 $F1$ 、 $F2$, $W2$ 处理的 $F1$ 最低, $W3$ 处理的 $F3$ 显著高于其他施肥处理;与 $W1$ 、 $W2$ 水平相比, $W3$ 水平酸性磷酸酶活性均值显著增加。相同施肥配比下, $W1F3$ 、 $W2F3$ 和 $W3F3$ 处理酸性磷酸酶活性较其他处理平均值在根增期、苗期、花期和果期增幅分别为 30.21%、9.80%、23.07%、19.20%、22.64%、35.78%、25.31%、23.90%、22.82%和 34.90%、35.73%、22.35%。苗期相同灌水水平下, $W1$ 处理的 $F3$ 酸性磷酸酶活性显著高于 $F1$ 、 $F2$ 和 $F4$, $W2$ 、 $W3$ 处理的 $F3$ 、 $F4$ 显著高于 $F1$ 、 $F2$ 。花期酸性磷酸酶活性最高,各处理均值较根增期、苗期和果期增幅为 74.41%、40.69%和 24.48%。果期相同灌水水平下, $W1$ 、 $W2$ 处理的 $F3$ 、 $F4$ 酸性磷酸酶活性显著高于 $F1$ 、 $F2$, $W3$ 处理的 $F3$

显著高于其他施肥处理。同一生育时期酸性磷酸酶活性随灌水量增加而增加,即 $W1 < W2 < W3$ 。

由表 3 可知,水肥调控下各生育时期过氧化氢酶活性均低于 CK 。相同灌水水平下,根增期 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 的各施肥处理间过氧化氢酶活性差异不显著;苗期 $W1$ 、 $W2$ 处理的 $F3$ 、 $F4$ 氧化氢酶活性显著高于 $F1$ 、 $F2$, $W3$ 处理的 $F4$ 显著高于其他施肥处理。随着生育进程的推进,过氧化氢酶活性先增加后降低,在花期达到最大,不同施肥配比表现为 $F4 > F3 > F2 > F1$,不同灌水量表现为 $W1 < W2 < W3$,根增期 $W3$ 较 $W2$ 和 $W1$ 增幅为 4.41%~4.62%,苗期增幅为 1.68%~7.99%,花期增幅为 6.19%~15.52%,果期增幅为 12.31%~15.28%; CK 较同生育时期其余灌水施肥处理过氧化氢酶活性平均值在根增期、苗期、花期和果期分别提高 23.70%、23.61%、20.66%和 33.48%。

2.3 水肥调控对土壤水肥利用效率和三七产量的影响

由表 4 可知,水肥调控三七产量较 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。相同灌水水平下, $W1$ 、 $W2$ 和 $W3$ 处理的 $F3$ 、 $F4$ 产量显著高于 $F1$ 、 $F2$ 处理, $W2$ 各施肥配比平均产量较 $W1$ 和 $W3$ 处理分别提高 17.00%和 9.48%;相同施肥配比下, $W2F1$ 和 $W3F1$ 处理的产量显著高于 $W1F1$, $W2F4$ 处理显著高于 $W1F4$ 和 $W3F4$,

表 4 水肥调控下三七产量、皂苷含量及水肥利用效率的变化
Table 4 Changes in *Panax notoginseng* yield, saponin and water and fertilizer use efficiency under water and fertilizer regulation

处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	水分利 用效率 WUE /(kg·m ⁻³)	肥料偏 生产力 PPF /(kg·kg ⁻¹)	总皂苷 Total saponin /(mg·g ⁻¹)
W1F1	1569.93±277.36e	0.73±0.04c	1.09±0.05cd	133.44±12.46bc
W1F2	1763.52±347.34de	0.81±0.03bc	1.22±0.15c	119.62±13.53bc
W1F3	2354.12±354.49b	1.09±0.13b	1.63±0.10b	146.66±16.59b
W1F4	2396.44±243.69b	1.11±0.04ab	1.66±0.13b	162.88±17.21ab
W2F1	2011.23±292.22cd	0.93±0.07bc	1.40±0.05bc	148.40±16.31b
W2F2	2031.45±276.69cd	0.94±0.01bc	1.41±0.10bc	132.82±18.33bc
W2F3	2618.24±345.58ab	1.21±0.03ab	1.82±0.12ab	176.34±16.53a
W2F4	2797.25±268.64a	1.29±0.04a	1.94±0.07a	164.86±15.21ab
W3F1	1916.33±176.65d	0.89±0.06bc	1.33±0.06bc	114.09±6.56c
W3F2	2061.22±186.69cd	0.95±0.02bc	1.43±0.10bc	103.90±9.43d
W3F3	2339.68±196.47b	1.08±0.03b	1.62±0.11b	121.95±6.34bc
W3F4	2321.96±284.36b	1.07±0.014b	1.61±0.10b	127.18±5.49bc
CK	1026.32±192.92f	0.47±0.02d	0.91±0.02d	96.32±6.92de
灌水水平 W	** *	*	** *	** *
施肥配比 F	** *	** *	** *	** *
W×F	** *	** *	** *	** *

注:不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,*表示显著差异 ($P < 0.05$),**表示极显著差异 ($P < 0.01$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$), * indicates a significant difference ($P < 0.05$), ** indicates a very significant difference ($P < 0.01$).

其余处理间差异不显著。水肥调控下三七水分利用效率与 CK 差异显著($P<0.05$),相同灌水水平下, W1 处理的 F3、F4 水分利用效率显著高于 F1, W2 处理的 F4 显著高于 F1、F2, W3 处理各施肥处理间差异不显著;相同施肥配比下,水分利用效率表现为 $W3<W1<W2$, W2 较 W1 和 W3 处理分别提高 16.84%和 9.52%,仅 W3F4 与 W2F4 处理水分利用效率差异显著。

相同灌水水平下, W1 处理的 F3、F4 肥料偏生产力显著高于 F1、F2, W2 处理的 F4 显著高于其他施肥处理, W3 各施肥处理间差异不显著;相同施肥配比下,仅 W2F4 与 W3F4 间肥料偏生产力差异显著。相同灌水水平下, W1 处理的各施肥处理间总皂苷含量差异不显著, W2 处理的 F3、F4 显著高于 F1、F2, W3 处理的 F3、F4 显著高于 F2;相同施肥配比下, W2F1 处理的总皂苷含量显著高于 W3F1, W2F2 和 W1F2 处理显著高于 W3F2, W2F3 处理显著高于 W1F3 和 W3F3,其余处理间差异不显著。

2.4 CIRTIC-VIKOR 法综合评价

对三七土壤碳氮含量、酶活性、产量、水肥利用效率和总皂苷含量进行 CIRTIC-VIKOR 法综合评价,得出归一化数据和三七不同生育时期水肥调控综合评价最优方案 Q 值, Q 值表示土壤碳氮酶、产量、水肥利用效率和总皂苷含量与最佳水肥调控水平接近程度。由表 5 可知, W1 灌水水平下, F1 施肥处理 Q 值大于 F2、F3 和 F4;根增期、苗期、花期的 F3 施肥配比下 Q 值随灌水量增加先增大后降低,果期 F3 施肥配比下 Q 值随灌水量增加逐渐减小。根增期 W3F1 处理 Q 值最小(0.03), W2F2 次之(0.08);苗期 W1 水平 Q 值在 F1~F3 施肥配比下均大于 W3, W2F3 处理 Q 值最小(0.02), W2F1 处理的 Q 值次之(0.04);花期 W2 灌水水平 Q 值小于 W1 和 W3, W2F3 处理的 Q 值最小(0.01), W3F3 处理 Q 值次之(0.26);果期 W3 水平 Q 值小于 W1, W1F1 处理的 Q 值最大(0.98), W3F2 处理的 Q 值最小(0.02);不同生育时期 W1 水平 Q 均值大于 W2 和

表 5 水肥调控不同处理综合评价														
Table 5 Comprehensive evaluation of different treatments of water and fertilizer regulation														
生育时期 Growth period	指标 Index	W1F1	W1F2	W1F3	W1F4	W2F1	W2F2	W2F3	W2F4	W3F1	W3F2	W3F3	W3F4	CK
根增期 Rooting period	全氮 AN	0.55	0.54	0.68	0.88	0.55	0.48	0.99	0.69	0.01	0.39	0.66	0.82	0.09
	有机碳 SOC	0.76	0.92	0.68	1.00	0.96	0.91	0.72	0.42	0.53	0.40	0.85	0.73	0.00
	脲酶 Urease	0.00	0.25	0.46	0.60	0.06	0.22	0.60	0.83	0.14	0.34	0.89	1.00	0.38
	蔗糖酶 Sucrase	0.00	0.14	0.39	0.54	0.46	0.56	0.68	0.87	0.48	0.68	0.71	1.00	0.32
	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.00	0.08	0.58	0.84	0.01	0.19	0.38	0.92	0.10	0.31	0.76	0.95	1.00
	过氧化氢酶 Catalase	0.00	0.08	0.58	0.84	0.01	0.19	0.38	0.92	0.10	0.31	0.06	0.95	1.00
	Q	0.95	0.81	0.38	0.65	0.80	0.08	0.42	0.35	0.03	0.64	0.10	0.87	0.95
	排名 Rank	13	10	5	8	9	2	6	4	1	7	3	11	12
苗期 Seedling period	全氮 AN	0.64	0.45	0.63	0.76	0.62	1.01	0.52	0.34	0.60	0.59	0.01	0.68	0.73
	有机碳 SOC	0.78	0.89	0.70	1.00	0.97	0.86	0.71	0.50	0.59	0.64	0.70	0.81	0.00
	脲酶 Urease	0.01	0.11	0.44	0.70	0.00	0.32	0.61	0.86	0.00	0.31	1.00	0.82	0.36
	蔗糖酶 Sucrase	0.00	0.09	0.35	0.48	0.39	0.54	0.68	0.86	0.51	0.64	1.00	0.71	0.35
	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.00	0.01	0.31	0.60	0.10	0.18	0.53	0.75	0.03	0.48	0.85	0.58	1.00
	过氧化氢酶 Catalase	0.00	0.24	0.46	0.48	0.26	0.33	0.59	0.70	0.33	0.47	1.00	0.83	0.04
	Q	0.89	0.84	0.45	0.68	0.04	0.45	0.02	0.35	0.53	0.33	0.26	0.80	0.74
	排名 Rank	13	12	7	9	2	6	1	5	8	4	3	11	10
花期 Flowering period	全氮 AN	0.67	0.55	0.63	0.79	0.84	0.80	0.99	0.77	0.41	0.73	0.60	0.67	0.00
	有机碳 SOC	0.96	0.91	0.72	1.00	0.93	0.87	0.69	0.49	0.71	0.64	0.84	0.69	0.00
	脲酶 Urease	0.08	0.29	0.48	0.62	0.09	0.20	0.48	0.74	0.00	0.32	0.73	1.00	0.36
	蔗糖酶 Sucrase	0.00	0.11	0.30	0.63	0.37	0.47	0.70	0.82	0.68	0.76	0.89	1.00	0.31
	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.00	0.04	0.11	0.22	0.14	0.19	0.22	0.26	0.18	0.24	0.27	0.40	1.00
	过氧化氢酶 Catalase	0.29	0.40	0.46	0.71	0.31	0.55	0.73	0.89	0.52	0.64	0.83	1.00	0.00
	Q	0.99	0.88	0.74	0.36	0.67	0.40	0.01	0.35	0.69	0.46	0.26	0.55	0.85
	排名 Rank	13	12	10	4	8	5	1	3	9	6	2	7	11
果期 Fruiting period	全氮 AN	0.42	0.56	0.81	0.70	0.77	0.62	0.99	0.62	0.36	0.40	0.59	0.64	0.00
	有机碳 SOC	0.83	0.90	0.74	1.00	0.98	0.88	0.73	0.53	0.66	0.67	0.87	0.72	0.00
	脲酶 Urease	0.02	0.45	0.71	0.82	0.03	0.35	0.57	0.90	0.00	0.44	0.83	1.00	0.63
	蔗糖酶 Sucrase	0.00	0.10	0.32	0.48	0.35	0.50	0.65	0.85	0.52	0.65	0.84	1.00	0.39
	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.13	0.30	0.52	0.83	0.25	0.34	0.70	0.89	0.34	0.61	0.85	1.00	0.00
	过氧化氢酶 Catalase	0.13	0.30	0.51	0.83	0.25	0.34	0.70	0.89	0.34	0.61	0.85	1.00	0.00
	产量 Yield	0.31	0.42	0.75	0.77	0.56	0.57	0.90	1.00	0.50	0.58	0.74	0.73	0.00
	总皂苷 Total saponin	0.46	0.29	0.63	0.83	0.65	0.46	0.86	1.00	0.22	0.09	0.32	0.39	0.00
	水分利用效率 WUE	0.31	0.42	0.75	0.78	0.56	0.57	0.90	1.00	0.51	0.59	0.75	0.74	0.00
	肥料偏生产力 PFP	0.31	0.42	0.75	0.78	0.56	0.57	0.90	1.00	0.50	0.59	0.74	0.73	0.00
	Q	0.98	0.85	0.76	0.52	0.69	0.56	0.29	0.13	0.21	0.02	0.19	0.49	0.73
	排名 Rank	13	12	11	7	9	8	5	2	4	1	3	6	10

W3。根增期 W1F1, 苗期 W1F1、W1F2、W3F4, 花期 W1F2、W3F4 和果期 W1F1、W1F2、W1F3 处理的 Q 值高于 CK。 Q 值越小说明处理效果越好, 根据 Q 值的排名优选出根增期和果期最佳灌溉施肥方案为 W3F1 和 W3F2, 苗期和花期最佳灌溉施肥方案为 W2F3。

3 讨 论

3.1 水肥耦合对三七田土壤碳氮含量的调控效应

土壤碳氮含量受根际土壤环境影响, 进而对土壤质量、作物养分吸收能力及产量产生作用, 水肥调控可有效促进作物对土壤养分的吸收利用^[23], 改变土壤水氮输入和输出, 使其碳氮储量发生变化, 从而提升土壤质量和可持续生产力^[24]。本研究结果表明, 三七花期 W2 灌水水平和 F3 施肥水平组合处理土壤全氮含量最高; 且花期全氮含量变化最大, 其次是果期、苗期和根增期。有研究表明, 施用有机肥可改变土壤还原功能、调控植物的营养状况, 实施必要的农艺措施能降低碳的损失率, 使植物根际微生态系统中的碳循环朝着有利于植物生长的方向进行^[25], 水氮合理配施能及时有效地满足作物生长对养分的需求。已有研究发现膜下滴灌可以改善土壤微生态环境和土壤养分循环能力, 增加作物产量^[26]。本研究也表明, 随三七生育期的推进不同水肥处理土壤有机碳含量不同, 水肥调控能够有效调节有机碳含量, 在关键生育时期适时、适量地提供水分及养分, 有利于三七和土壤微生物生长发育。花期土壤有机碳含量显著高于其他生育时期, 可能是因为花期正值 5—7 月, 气温适宜, 土壤微生物活跃, 代谢加快, 水肥调控可更有效地促进有机碳含量增加。根增期土壤有机碳含量低于苗期、花期和果期, 可能是因为三七根增期处于每年 11 月~次年 1 月, 气温较低, 土壤微生物代谢缓慢, 分解有机质能力减弱。

3.2 水肥耦合对三七田土壤酶活性的调控效应

水分对土壤酶活性的影响具有异质性^[27], 土壤根系水环境会影响土壤养分的吸收以及植株生长, 土壤碳氮含量变化影响植物氮素吸收和农田土壤氮素损失。水氮配施会产生协同作用, 改变土壤微环境和水肥调控对于改善土壤结构、促进土壤养分吸收和提高土壤生产力非常重要。蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶等土壤酶在参与土壤碳、氮循环过程中发挥着重要作用, 不同种植模式下土壤酶活性表现出不同的变化趋势。研究发现轮作的种植模式土壤酶活性高于连作模式^[28]。本研究中, 各生育时期

脲酶活性均随施肥配比的变化呈先增后降的趋势, 各灌水水平下均为 F3 处理脲酶活性最大; 各生育时期蔗糖酶活性总体随灌水量的增加而增加, 根增期 W3 较 W2 和 W1 增幅为 1.99%~46.69%, 苗期增幅为 4.76%~45.39%, 花期增幅为 13.95%~56.33%, 果期增幅为 8.68%~41.60%, 全生育期施肥配比水平表现为 F3>F4>F2>F1; 各生育时期酸性磷酸酶活性均随施肥配比的变化呈先增后降的趋势, 与前人研究结果相似。各生育时期不施肥不灌水处理过氧化氢酶活性均高于施肥灌水处理, 前者较后者在根增期、苗期、花期和果期分别提高 23.70%、23.61%、20.66% 和 33.48%, 究其原因可能是灌水量增加会抑制过氧化氢酶活性, 这与祁剑英等^[29]、Li 等^[30]的研究结果略有不同, 其内在机理需要进一步深入研究。

3.3 水肥耦合对三七产量、皂苷含量和水肥利用效率的调控效应

不同生育时期水肥调控会影响三七水肥利用效率、产量和总皂苷的变化。本研究表明, W1 水平下 F3 和 F4 施肥处理三七产量高于 F1 和 F2 处理, W2 水平下 F4 产量高于 F1、F2 和 F3 处理, 这与胡晓辉等^[31]的研究结果相似, 即水肥耦合在改善土壤根系环境的同时, 促进了作物的生长, 对作物产量有积极影响。刘凡等^[32]研究发现水分胁迫或施肥量超过一定范围会对植株氮素的吸收以及水分利用效率产生抑制作用; 李宣志等^[33]研究表明与常规水溶肥每 12 d 滴灌 1 次的对照相比, 每 4 d 滴灌一次山崎配方营养液+通用微量元素配方处理下加工番茄肥料偏生产力提高 142.8%, 氮、磷、钾养分利用效率分别提高 241.4%、466.6% 和 235.9%, 产量增加 12.2%。周潇^[34]研究表明, 同一灌水水平下三七皂苷和人参皂苷含量大小基本上为 F4>F3>F1>F2; 皂苷含量在低水和中水水平下随着施肥配比的变化逐渐增大, 在高水水平下随施肥配比的变化先减小后增大。本研究结果也表明, 水分利用效率和肥料偏生产力、总皂苷含量随灌水量的增加和施肥配比的变化呈先增大后减小的变化趋势, W1 水平 F3 和 F4 处理总皂苷含量比 F1 和 F2 高, W2F3 处理最高; W2F4 处理三七产量达 $2\,797.25\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, F4 和 F3 处理下 W2 灌溉量能提高三七产量和水肥利用效率。

4 结 论

1) 三七全生育期各处理土壤全氮、有机碳含量均显著高于 CK ($P<0.05$)。相同施肥配比下, 随灌

水量增加全氮含量均值先增加后减小,根增期、苗期、花期和果期 W2 水平各施肥处理全氮含量均值分别较其他处理提高 0.92%~2.34%、0.21%~2.75%、0.15%~15.00% 和 7.23%~15.84%,苗期 W2F2 处理的全氮含量均值高于其他处理;根增期、苗期、花期和果期 W1 灌水水平有机碳含量高于 W2、W3,4 个时期分别提高 7.20%~14.78%、3.10%~8.15%、5.11%~7.11% 和 2.90%~6.86%,苗期 W2 处理的有机碳含量均值较其他处理提高 3.10%~8.15%。

2) 三七花期 W3F3 处理的脲酶、蔗糖酶和酸性磷酸酶活性最高,W3 较 W2 和 W1 下各施肥处理 3 种酶活性分别增加 7.37%~8.81%、13.95%~56.33% 和 22.82%~25.31%,花期各处理均值较根增期、苗期和果期增幅分别为 74.41%、40.69% 和 24.48%,根增期 W1F1 脲酶活性最低;三七全生育期过氧化氢酶活性均小于 CK。

3) 对土壤碳氮含量、酶活性、产量、水肥利用效率和总皂苷含量进行 CIRTIC-VIKOR 法综合评价,得出根增期 W3F1 处理综合评价最优方案 Q 值最小,为 0.03;苗期 W2F3 处理 Q 值最小,为 0.02;花期 W2F3 处理 Q 值最小,为 0.01;果期 W3F2 处理 Q 值最小,为 0.02。本研究条件下,三七根增期和果期最佳灌溉施肥方案为 W3F1 和 W3F2,苗期和花期最佳灌溉施肥方案为 W2F3。

参 考 文 献:

[1] ZHENG Y J, XIA P G, CHAI W G, et al. Accumulation dynamics of elements in *Panax notoginseng* during its whole growing seasons[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 158: 113023.

[2] 唐建楷,韩焕豪,刘冰,等. 灌水频率和施肥量对三七有效成分积累与发病率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 55-63.

TANG J K, HAN H H, LIU B, et al. Effects of irrigation frequency and fertilization amount on active ingredient accumulation and morbidity of *Panax notoginseng* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 55-63.

[3] 崔秀明,黄璐琦,郭兰萍,等. 中国三七产业现状及发展对策[J]. 中国中药杂志, 2014, 39(4): 553-557.

CUI X M, HUANG L Q, GUO L P, et al. Chinese sanqi industry status and development countermeasures [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2014, 39(4): 553-557.

[4] 李建明,于雪梅,王雪威,等. 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 75-83.

LI J M, YU X M, WANG X W, et al. Optimization of fertigation scheduling for drip-irrigated watermelon based on its yield, quality and fertilizer and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 75-83.

[5] 赵宏光,夏鹏国,韦美瞳,等. 土壤水分含量对三七根生长、有效成分积累及根腐病发病率的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 173-178.

ZHAO H G, XIA P G, WEI M T, et al. Effects of soil moisture content on root growth, active components and root rot incidence of *Panax notoginseng*[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(2): 173-178.

[6] 肖石江,普红梅,王鑫,等. 水肥耦合对冬马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (2): 133-140.

XIAO S J, PU H M, WANG X, et al. Effect of water and fertilizer coupling on yield and water use efficiency of winter potato[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2021, (2): 133-140.

[7] 赵文举,马锋,曹伟,等. 水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 95-101.

ZHAO W J, MA F, CAO W, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the yield and quality of tomatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 95-101.

[8] 刘小刚,孙光照,彭有亮,等. 水肥耦合对芒果光合特性和产量及水肥利用的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 125-133.

LIU X G, SUN G Z, PENG Y L, et al. Effect of water-fertilizer coupling on photosynthetic characteristics, fruit yield, water and fertilizer use of mango[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 125-133.

[9] 李龙,普荣凤,李明华,等. 氯化苦熏蒸对土壤和三七生长发育的影响[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(3): 635-642.

LI L, PU R F, LI M H, et al. Effects of chloropicrin fumigation on soil and growth and development of *Panax notoginseng* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(3): 635-642.

[10] LIAO P R, LIU D Q, XU T R, et al. Soil water stress attenuate the growth and development but enhance the saponin synthesis of *Panax notoginseng* during flowering stage[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 108: 95-105.

[11] 韩翠,康扬眉,余海龙,等. 荒漠草原凋落物分解过程中降水量对土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, 31(9): 1802-1812.

HAN C, KANG Y M, YU H L, et al. Effects of precipitation on soil enzyme activities during litter decomposition in a desert steppe of northwestern China[J]. Ecology and Environment Sciences, 2022, 31(9): 1802-1812.

[12] 李浩成,左应梅,杨绍兵,等. 三七根系分泌物在连作障碍中的生态效应及缓解方法[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(8): 159-167.

LI H C, ZUO Y M, YANG S B, et al. Ecological effect of root exudates of *Panax notoginseng* on continuous cropping obstacles and its alleviating methods[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(8): 159-167.

[13] 游琪. 遮荫条件下不同灌水和施肥对三七根区土壤微环境及产量、品质的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.

YOU Q. Effects of different irrigation and fertilization on the soil micro-environment, yield and quality of *Panax notoginseng* root zone under shading[D]. Kunming: Journal of Kunming University of Science and Technology, 2021.

[14] 赵崧仪,邢浩男,杨启良. 营养生长期亏缺灌溉对三七生长及根区微环境的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 92-96.

ZHAO S Y, XING H N, YANG Q L. Effect of regulated deficit irrigation in the vegetative growth stage on the growth of *Panax notoginseng* and the microenvironment of its root zone[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(1): 92-96.

[15] SABOURY A, GHOLAMHOSEINI M, BAZRAFSHAN F, et al. In-

- teraction of irrigation and nitrogen fertilization on yield and input use efficiency of sesame cultivars[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(6): 5133-5142.
- [16] HE J Q, HE Y, GAO W D, et al. Soil depth and agricultural irrigation activities drive variation in microbial abundance and nitrogen cycling[J]. *Catena*, 2022, 219: 106596.
- [17] LIU Z X, GAO F, LIU Y, et al. Timing and splitting of nitrogen fertilizer supply to increase crop yield and efficiency of nitrogen utilization in a wheat-peanut relay intercropping system in China[J]. *The Crop Journal*, 2019, 7(1): 101-112.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 87-110.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 87-110.
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 89-120.
- GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986: 89-120.
- [20] 杨海燕, 孙晓博, 程小文, 等. 基于 VIKOR 法的潍坊市水资源承载力综合评价[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 716-723.
- YANG H Y, SUN X B, CHENG X W, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Weifang based on the VIKOR method[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 716-723.
- [21] GARCÍA-CASCALES M S, MOLINA-GARCÍA A, SÁNCHEZ-LOZANO J M, et al. Multi-criteria analysis techniques to enhance sustainability of water pumping irrigation[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 4623-4632.
- [22] 刘艳伟, 周潇, 杨启良, 等. 不同施肥和灌溉水平对三七生长特性和发病率的影响[J]. *浙江农业学报*, 2021, 33(8): 1426-1435.
- LIU Y W, ZHOU X, YANG Q L, et al. Effects of fertilization ratio and irrigation level on growth characteristics and incidence rate of *Panax notoginseng*[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(8): 1426-1435.
- [23] 张江伟, 李慧, 柴晓甜, 等. 玉米深松分层施肥和小麦限水灌溉对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 346-355.
- ZHANG J W, LI H, CHAI X T, et al. Effects of fertilization with subsoiling of maize and limited irrigation of wheat on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzymes activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 346-355.
- [24] 刘艳伟, 周潇, 韩焕豪, 等. 基于产量品质及水肥利用效率的三七水肥耦合方案优选[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 139-146.
- LIU Y W, ZHOU X, HAN H H, et al. Coupling scheme optimization of *Panax notoginseng* considering yield, quality and water-fertilizer use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 139-146.
- [25] 鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 等. 中亚热带 3 种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 508-516.
- BAO Y, GAO Y, ZENG X M, et al. Relationships between carbon and nitrogen contents and enzyme activities in soil of three typical subtropical forests in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(4): 508-516.
- [26] 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.
- [27] YANG Y H, LI M J, WU J C, et al. Impact of combining long-term subsoiling and organic fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen, soil enzyme activity, and water use of winter wheat[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 788651.
- [28] 赵思腾, 师尚礼, 陈建纲, 等. 陇中旱作区不同轮作方式对土壤碳、氮含量及酶活性的影响特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 817-824.
- ZHAO S T, SHI S L, CHEN J G, et al. Effect of different patterns on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in the arid region of central Gansu[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 817-824.
- [29] 祁剑英, 王兴, 濮超, 等. 保护性耕作对土壤氮组分影响研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(z1): 222-229.
- QI J Y, WANG X, PU C, et al. Research advances on effects of conservation tillage practice on soil nitrogen component[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(z1): 222-229.
- [30] LI Y L, LIU X G, FANG H D, et al. Exploring the coupling mode of irrigation method and fertilization rate for improving growth and water-fertilizer use efficiency of young mango tree[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 286: 110211.
- [31] 胡晓辉, 高子星, 马永博, 等. 基于产量品质及水肥利用率的袋培辣椒水肥耦合方案[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(17): 81-89.
- HU X H, GAO Z X, MA Y B, et al. Coupling scheme of water and fertilizer based on yield, quality, use efficiency of water and fertilizer in bag pepper growing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(17): 81-89.
- [32] 刘凡, 刘斌祥, 刘佳媛, 等. 水氮互作对川中丘陵区玉米水肥利用效率和产量形成的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 200-206.
- LIU F, LIU B X, LIU J Y, et al. Effect of water and nitrogen interaction on maize utilization efficiency of fertilizer, water and yield formation in the Middle Hilly Area of Sichuan Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 200-206.
- [33] 李宣志, 张金珠, 王振华, 等. 水-肥-盐耦合对滴灌加工番茄生长和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4): 133-140.
- LI X Z, ZHANG J Z, WANG Z H, et al. Effect of water-fertilizer-salt coupling on growth and yield of processing tomato under drip irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(4): 133-140.
- [34] 周潇. 不同灌水量和生育期施肥量对三七产量、品质及水肥利用效率的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- ZHOU X. Effects of different irrigation and fertilization in growth period on the yield, quality and water and fertilizer use efficiency of *Panax notoginseng* [D]. Kunming: Journal of Kunming University of Science and Technology, 2021.