

施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响

李慧杰¹, 徐福利^{1,2}, 林云¹, 栾晓波¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 采用野外试验与室内分析, 研究了连续4 a 施氮磷钾肥对黄土丘陵区山地枣园土壤酶活性及土壤养分含量的影响。结果表明: 连续4 a NPK₁ 施肥处理能够明显增强土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性, 提高土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量; 在土壤剖面中总的趋势是土壤酶活性和土壤速效氮、速效磷和速效钾含量随土层深度加深而降低。土壤酶活性与土壤养分因子的相关分析表明, 在0~20 cm 土层, 磷酸酶与有机质、速效磷, 过氧化氢酶与有机质、全氮呈显著或极显著性正相关。在20~40 cm, 脲酶与有机质、全氮、速效氮, 磷酸酶与速效钾, 过氧化氢酶与速效磷, 蔗糖酶与有机质、速效钾呈显著或极显著性正相关。在40~60 cm, 脲酶与全氮、速效磷, 磷酸酶与有机质、速效氮, 过氧化氢酶与速效磷, 蔗糖酶与有机质、全氮、速效磷呈显著或极显著正相关。

关键词: 土壤酶; 红枣林; 土壤肥力; 氮磷钾肥

中图分类号: S158; S154.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7601(2012)04-0053-07

土壤酶的活性是土壤生物活性和土壤肥力的重要指标^[1-5]。土壤酶是土壤中物质循环与能量流动的参与者, 土壤酶中的土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶等酶活性能够表征土壤 C、N、P 等养分的循环状况。土壤肥力是提高植物生长所需要的养分含量的重要指标。施肥能够增加土壤营养元素、调节土壤营养元素的比例、改善土壤养分循环。适量施用 N、P、K 等对土壤酶有一定的激活效应, 能增强土壤酶活性。红枣是陕北黄土高原地区主要经济林木, 目前, 陕北红枣产区开始推广枣树矮化密植规范化栽培技术, 以期突破产业发展的瓶颈。这就对规范化栽植技术下的施肥管理与营养调控提出了更高要求, 施肥既要提高红枣产量, 又要保护和改善生态环境, 防止土壤质量退化。因此这就需要进行施肥对土壤酶与土壤肥力影响的研究。施肥对土壤酶与土壤肥力的影响已经在旱地小麦^[6-9]、温室蔬菜^[10]、苹果^[11]、花生^[12]等进行了研究, 并取得了一些重要结果。然而, 有关黄土高原枣园施肥下的黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力研究尚少见报道。为此, 本文通过田间试验研究了黄土高原枣园施肥对山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响, 探讨了不同施肥处理对红枣林土壤酶与土壤肥力的影响, 探索提高山地红枣林土壤酶与土壤肥力变化机制, 为黄土高原红枣产量发展, 改善黄土高原枣园土壤肥力及施肥

制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验位于陕西省米脂县西北农林科技大学红枣基地一矮化密植枣园(东经 110°07', 北纬 37°46'), 属于典型的黄土丘陵沟壑区, 平均海拔 980 m。属温带半干旱气候, 干旱少雨, 年均降雨量为 451.6 mm, 年度分配不平衡, 4~6 月降水量少, 且多为 10 mm 以下的无效降雨, 7、8 两月降雨则占到 49%, 且多以暴雨形式出现, 强度大, 在这样少的降水条件下每年有相当一部分降水形成径流流失。年均气温 8.4℃, 最冷月平均气温 -8.6℃, 最热月平均气温 23.5℃, 极端最高气温 38.2℃, 极端最低气温 -24.8℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 3 470.0℃, 日照时数 2 716 h, 无霜期 160~170 d。试验区以黄绵土为主, 颗粒组成大部分为粉砂粒, 含量一般在 65.75%~68.98%, 0~30 cm 土层土壤有机质含量为 2.1 g/kg, 有效氮 34.73 mg/kg, 有效磷 2.90 mg/kg, 有效钾 101.9 mg/kg, pH 值 8.6。

1.2 试验设计

田间试验开始于 2007 年 4 月, 连续 4 年施用相同施肥处理, 在 2010 年 9 月底试验结束, 共设 6 个处理, 处理为 (1) CK、(2) N、(3) P、(4) K、(5) N₁P₁、(6)

收稿日期: 2011-10-31

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划(2011BAD29B04); 陕西省科技创新工程(2011KTCL02-02)

作者简介: 李慧杰(1986-), 男, 河北邢台人, 硕士, 研究方向为施肥对植物养分吸收的影响。E-mail: lihuijie2005@126.com。

通讯作者: 徐福利(1958-), 男, 研究员, 博士, 从事植物营养与施肥原理研究工作。E-mail: xfl_163@163.com。

NPK₁。N、P、K 分别指施 N 450 kg/hm²、P₂O₅ 225 kg/hm²、K₂O 250 kg/hm²，N₁、P₁、K₁ 指施 N 268 kg/hm²、P₂O₅ 134 kg/hm²、K₂O 101 kg/hm²，3 次重复，小区面积 3 m × 2 m = 6 m²，随机区组排列。灌水方式采用滴灌，滴头流量为 4 L/h，每株树每次灌水量为 100 L，在 2010 年 4 月 17 日、5 月 25 日、7 月 12 日、8 月 20 日灌溉。供试红枣品种为 8 年生山地矮化密植梨枣。

施用肥料: 氮肥为尿素(含 N 46%)、磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ ≥ 16%)、钾肥为硫酸钾(K₂O ≥ 50%)。
施用方法: 在树冠下外围两侧水平沟内挖深 20 cm，宽 40 cm 的沟，撒施肥料后覆土填平。在春季 4 月 17 日施入基肥(磷、钾肥一次性施入，氮肥施入总量的一半)，在 8 月 4 日进行追肥(一半氮肥)。

1.3 测定项目与方法

在 2010 年 9 月中旬红枣成熟采摘期采取土样。在每棵树下均匀选取 3 个点，用 1 m 土钻采取 0~60 cm 土壤为供试土样，每 20 cm 为一层，采土时距施肥区 40~50 cm，然后采用四分法，去掉对角各 1/4 的土壤样品，再继续混合，去掉一些土壤，最后将大约 0.5~1 kg 土壤装在自封口塑料袋中，样品采回后，立即放入 4℃ 冰箱保存备用。试验前剔除土样中的石块和植物残根等杂物后风干，磨细，过 1 mm 和 0.25 mm 筛备用。

土壤基本理化性状测试方法: 有机质用重铬酸钾—硫酸氧化法，全氮用半微量开氏法，速效磷测定用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑钒比色法，速效钾用醋酸铵浸提—火焰光度法，土壤的速效态氮(硝态氮和铵态氮)用 1 mol/L 的 KCl 溶液浸提，浸提液中的硝态氮和铵态氮采用连续流动分析仪测定^[13]。

土壤酶活性测定: 土壤蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性、脲酶活性、磷酸酶活性依次用 3, 5-二硝基水杨酸比色法、高锰酸钾滴定法、靛酚蓝比色法和磷酸苯二钠比色法测定^[14]。蔗糖酶活性以 24 h 后每克土壤葡萄糖的 mg 数表示，过氧化氢酶活性以每克土消耗 0.02 mol/L 高锰酸钾 ml 数表示，脲酶活性以每克土 NH₃-N mg 数表示，磷酸酶活性以 1 g 土壤中释放出酚的 mg 数表示。

试验数据的统计分析采用 Microsoft Excel 和 DPS 数据处理软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤酶活性的影响

2.1.1 施肥对土壤脲酶活性的影响 在山地枣园连续 4 a 施肥后(如图 1 所示)，各施肥处理土壤脲

酶活性有明显变化，均高于对照。表层 0~20 cm 脲酶变化最为明显，与 CK 相比增加了 4.79~6.18 mg/g。不同施肥处理比较，各施肥处理间土壤脲酶活性表现差异性，N₁P₁ > N > NPK₁ > K > P。在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层土壤脲酶活性变化趋势相似，各施肥处理中，高量 N 处理(N、NPK₁) > N₁P₁ > P > K，但是 N₁P₁、P、K 这 3 个处理土壤脲酶活性差异性不显著。在土壤剖面上，各土层土壤脲酶的活性表现为 0~20 cm > 20~40 cm > 40~60 cm。说明 NPK₁ 这个施肥处理对土壤脲酶活性的提高作用效果最好，与 CK 相比在上层、中层和下层都能够显著提高脲酶活性，高量 N(N、NPK₁) 这两个施肥处理提高土壤脲酶活性效果要好于其它 3 个施肥处理，这可能是由于不同土层尿素浓度不同，尿素作为底物对脲酶活性影响至关重要，在加入尿素的量使脲酶活性达到平稳之前，土壤脲酶活性随尿素浓度增大而增强^[15]，但如果尿素量再增大则会减弱脲酶活性。同时发现，土壤脲酶活性随土层深度的加深而减弱。

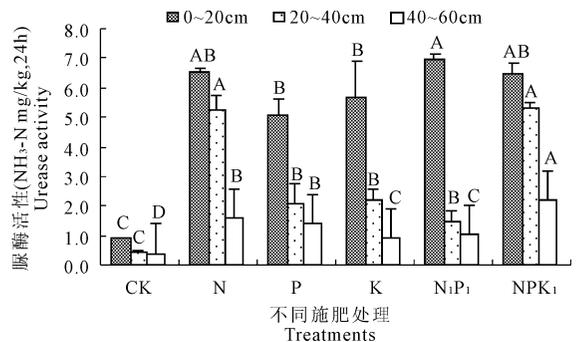


图 1 连续施肥对土壤脲酶活性的影响

Fig. 1 Effect of successive fertilization on urease activity in soil

2.1.2 施肥对土壤磷酸酶活性的影响 如图 2 所示，连续 4 a 施肥后土壤磷酸酶活性在不同土层表现有差异。在 0~20 cm 土层，各施肥处理的土壤磷酸酶活性显著高于 CK，其中 NPK₁ 处理的最高，达到 36.72 mg/g，与 CK 相比提高了 145.78%，不同施肥处理间土壤磷酸酶活性表现为，NPK₁ > K > N₁P₁ > P > N。在 20~40 cm 土层，K > NPK₁ > N > CK > N₁P₁ > P，表明单施 P 的处理磷酸酶活性是呈下降趋势的，这可能是由于植物根和微生物分泌磷酸酶的速度和强度取决于它们对磷酸盐的需要，当土壤无机磷含量较有机磷量低时，才可能会导致磷酸酶的泌出。P 与 N、K 合理配施的 NPK₁ 则能够增加土壤磷酸酶活性，本试验显示 K 肥能够增强磷酸酶活性，这与有些报告中认为，施用磷钾肥料，可能减弱磷酸酶活性^[16] 不同。在 40~60 cm 土层，不同处理间土

壤磷酸酶活性表现为, $N > NPK_1 > N_1P_1 > K > CK > P$ 。在土壤剖面上, 各土层土壤磷酸酶活性, $0 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 40 \text{ cm} > 40 \sim 60 \text{ cm}$, 只有 N_1P_1 出现异常 ($40 \sim 60 \text{ cm} > 20 \sim 40 \text{ cm}$)。

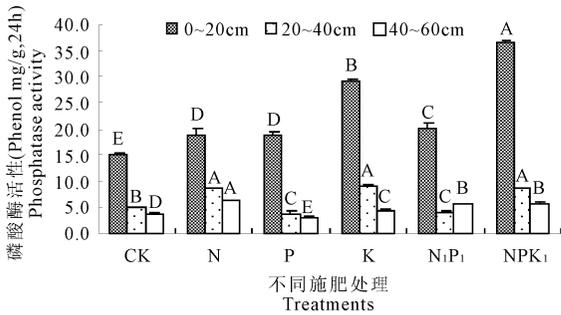


图 2 连续施肥对土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Effect of successive fertilization on phosphatase activity in soil

2.1.3 施肥对土壤过氧化氢酶活性的影响 过氧化氢酶来自真菌、细菌和植物根, 参与生物的呼吸代谢, 同时可以解除在呼吸过程中产生的对活细胞有害的过氧化氢, 可以在一定程度表征土壤生物氧化过程的强弱^[17-18]。如图 3 所示, 在 3 种土层深度, N 、 K 、 N_1P_1 三种施肥处理土壤过氧化氢酶活性与 CK 相比差异不显著, 表明一些施肥处理对土壤过氧化氢酶活性影响比较小, 这与一些资料^[6-7, 10]报道结论一致。对于其他处理, 在 $0 \sim 20 \text{ cm}$, 土壤过氧化氢酶活性 $NPK_1 > CK > P$, NPK_1 与 CK 相比提高 1.86 mg/g , 是 CK 的 1.22 倍。 $20 \sim 40 \text{ cm}$, $NPK_1 > P > CK$ 。 $40 \sim 60 \text{ cm}$, $NPK_1 > P > CK$ 的, 但是 P 、 NPK_1 差异不显著。证明 NPK_1 施肥处理能够提高土壤过氧化氢酶的活性, 使土壤分解过氧化氢的能力提高, 而其他施肥对过氧化氢酶影响不显著。在土壤剖面, 除 P 、 NPK_1 处理土壤过氧化氢酶活性在不同土层表现差异外, 其它施肥处理在不同的土层深度差异不显著, 表明土壤过氧化氢酶对一般施肥处理没有明显的响应, 而 N 、 P 、 K 配合适中的 NPK_1 处理则能够从土壤上、中、下三层提高过氧化氢酶的活性。

2.1.4 施肥对土壤蔗糖酶的影响 蔗糖酶是土壤中参与 C 循环的一种重要的酶, 能酶促蔗糖水解生成葡萄糖和果糖, 被广泛用于表征土壤中生物化学过程的动向与强度。如图 4 所示, 连续施肥处理对土壤蔗糖酶活性的影响在 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层变化趋势并不相同, 除 N ($P = 0.5637$, 差异不显著) 处理外 $0 \sim 20 \text{ cm} > 20 \sim 40 \text{ cm} > 40 \sim 60 \text{ cm}$, 主要是因为土壤蔗糖酶的高低与土壤有机质含量、肥力密切相关, 并受季节、植物被覆、土壤团聚体表面积、微生物数量、施肥和农业技术措施等因素的

影响, 而表层土壤有机质含量、微生物数量和土壤肥力明显高于下层土壤。在 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层, 土壤蔗糖酶活性 $P > NPK_1 > N_1P_1 > K > CK > N$, 说明在土壤表层磷肥在提高蔗糖酶活性方面起重要作用, 孙瑞莲^[19]研究也得出相同结论。在 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土层, $NPK_1 > N_1P_1 > K > CK > P > N$, CK 、 P 处理差异性不显著。在 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层, $NPK_1 > CK > K > P > N_1P_1 > N$ 。表明 NPK_1 、 N_1P_1 、 K 三种施肥处理都能够增强土壤蔗糖酶的活性, 而 NPK_1 效果最明显。

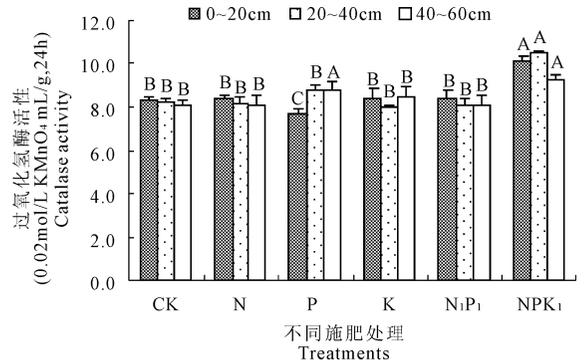


图 3 连续施肥对土壤过氧化氢酶活性的影响

Fig. 3 Effect of successive fertilization on catalase activity in soil

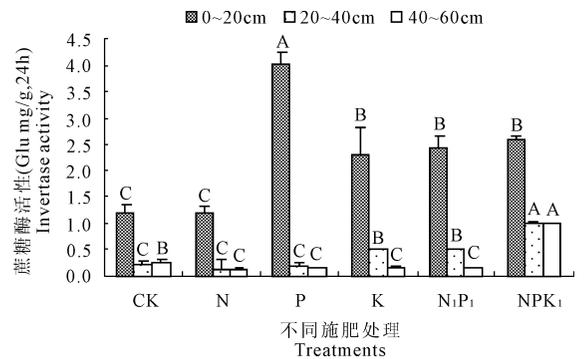


图 4 连续施肥对土壤蔗糖酶活性的影响

Fig. 4 Effect of successive fertilization on invertase activity in soil

2.2 施肥对土壤肥力的影响

2.2.1 施肥对土壤有机质含量的影响 由表 1 可以看出, 连续 4 年施肥以后, 枣园土壤在同一土层有机质变化差异不大。只有在 $0 \sim 20 \text{ cm}$, NPK_1 、 K 两个施肥处理土壤有机质含量比 CK 分别增加了 83.75% 、 19.14% , 其他处理与 CK 没有明显差异。在 $20 \sim 40 \text{ cm}$ ($P = 0.1365$) 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ ($P = 0.2898$) 施肥处理对有机质含量影响较小。在不同深度土层, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤有机质含量显著高于 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$, 而 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层没有明显差异。说明连续 4 a 施肥只有 NPK_1 、 K 两个施肥处理能够在浅层对土壤有机质含量起到积累作用, 可能是因为有机质主要来源于植物残落物、根

系残体和根系分泌物以及生活在土壤中的动物和微生物^[20], 化学肥料要经过长期的施用才能达到对有机质含量和深度有明显影响。

表 1 连续施肥对土壤有机质含量的影响(g/kg)

Table 1 Effect of successive fertilization on content of soil organic matter

处理 Treatments	0~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm
CK	4.37±0.08C	3.74±0.27AB	3.44±0.13A
N	5.18±0.16CB	3.64±0.08AB	3.74±0.06A
P	4.98±1.04C	3.45±0.11B	3.22±0.42A
K	6.74±1.04AB	4.21±1.09AB	3.90±0.52A
N ₁ P ₁	5.87±0.17B	4.69±0.20A	4.16±0.73A
NK ₁	8.03±0.07A	4.38±0.94B	3.81±0.67A

注: 平均差±标准差, $P < 0.05$ 。下同。

Note: Average ± standard deviation, $P < 0.05$. The same as below.

2.2.2 施肥对土壤全氮含量的影响 由表 2 所示, 各施肥处理土壤全氮的含量都显著高于 CK, 在土壤剖面上, 0~ 20 cm > 20~ 40 cm > 40~ 60 cm。在 0~ 20 cm 土层, 与 CK 相比, 各施肥处理土壤全氮增加 0.05~ 0.19 g/kg, $NPK_1 > N > K > P > N_1P_1$; 20~ 40 cm, 与 CK 相比, 土壤全氮增加 0.02~ 0.15 g/kg, $N > NPK_1 > P > K > N_1P_1$; 40~ 60 cm, 与 CK 相比, 土壤全氮增加 0.02~ 0.12 g/kg, $NPK_1 > N > P > N_1P_1$, 而 K 施肥处理中全氮含量低于 CK, 可能因为长期消耗全氮, 而得不到相应补充的缘故。

表 2 连续施肥对土壤全氮的影响(g/kg)

Table 2 Effect of successive fertilization on soil content of total N

处理 Treatments	0~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm
CK	0.17±0.02D	0.12±0.01D	0.13±0.01CD
N	0.33±0.01AB	0.27±0.02A	0.20±0.01B
P	0.23±0.04C	0.21±0.02B	0.15±0.01C
K	0.30±0.01B	0.15±0.02C	0.11±0.02D
N ₁ P ₁	0.30±0.01B	0.14±0.01CD	0.14±0.03C
NK ₁	0.36±0.04A	0.22±0.22B	0.25±0.02A

2.2.3 施肥对土壤速效氮含量的影响 速效氮是能够被植物直接吸收利用的氮, 速效氮通常是限制植物生长的基本要素^[21]。由表 3 所示, 各施肥处理后土壤速效氮与 CK 相比, 在 0~ 20 cm 土层, 速效氮增加 13.22~ 104.35 mg/kg, $N > NPK_1 > N_1P_1 > P > K$; 20~ 40 cm, 速效氮增加 9.32~ 106.51 mg/kg, $N > NPK_1 > K > P > N_1P_1$; 40~ 60 cm, 速效氮增加 4.09~ 82.31 mg/kg, $N > NPK_1 > K > P > N_1P_1$ 。表明含 N(N、

NPK_1 、 N_1P_1) 处理能明显增加土壤速效氮含量, 化学肥料通过直接补充植物需要的养分来提高土壤肥力, 同时发现 K、P 处理也能增加土壤速效氮的含量, 这其中的原因需要进一步研究。在土壤剖面, 0~ 20 cm、20~ 40 cm 与 40~ 60 cm 三层土壤速效氮含量差异不显著, 说明经过连续施肥、养分迁移作用和土壤酶的生化反应, 速效氮在 0~ 60 cm 土层呈均匀状态, 能够满足枣树根对不同深度 N 养分的需要。

表 3 连续施肥对土壤速效氮的影响(mg/kg)

Table 3 Effect of successive fertilization on content of soil available N

处理 Treatments	0~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm
CK	12.19±0.46D	10.32±1.97E	12.51±0.19E
N	58.27±1.24A	58.41±2.94B	34.82±0.76B
P	26.03±0.70C	20.35±2.78D	18.47±0.36C
K	25.41±0.40C	26.45±0.40C	19.62±1.44C
N ₁ P ₁	27.27±2.36C	19.64±0.61D	16.60±0.20D
NK ₁	35.5±1.07B	68.67±0.72A	50.51±0.32A

2.2.4 施肥对土壤速效磷含量的影响 由表 4 所示, 连续施肥 4 a 中施 P(P、 N_1P_1 、 NPK_1) 的三个施肥处理能够显著增加土壤中速效磷的含量, 其他的两个施肥处理则没有增加土壤速效磷的效果。在 0~ 20 cm 土层, 与 CK 相比, P、 N_1P_1 、 NPK_1 分别增加 23.13、28.60 mg/kg 和 46.34 mg/kg, $NPK_1 > N_1P_1 > P > CK > N > K$; 在 20~ 40 cm 土层, P、 N_1P_1 、 NPK_1 土壤速效磷与 CK 相比, 增加了 44.16、2.31 mg/kg 和 35.47 mg/kg, $P > NPK_1 > N_1P_1 > N > CK > K$; 在 40~ 60 cm 土层, 与 CK 相比, P、 N_1P_1 、 NPK_1 分别增加 17.76、9.46 mg/kg 和 40.21 mg/kg, $NPK_1 > P > N_1P_1 > N > K > CK$ 。在土壤剖面, 施 P 处理土壤速效磷含量在 20~ 40 cm 最高, 而 N_1P_1 、 NPK_1 则是在表层含量最高, 这可能是因为枣园管理措施的锄草和翻耕有关, 翻耕改善了土壤的通气状况, 使有机磷分解加快, 增加了相应土层速效磷的含量。

表 4 连续施肥对土壤速效磷的影响(mg/kg)

Table 4 Effect of successive fertilization on content of soil available P

处理 Treatments	0~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm
CK	27.87±1.79B	18.30±0.90C	15.97±0.99D
N	21.28±1.53B	18.95±2.16C	19.54±1.05D
P	51.00±0.55A	62.46±2.14A	33.73±0.45B
K	30.29±0.98B	20.64±2.14C	24.88±1.30C
N ₁ P ₁	56.47±5.16A	20.61±1.20C	25.43±6.55C
NK ₁	73.21±7.84A	53.77±1.81B	56.18±2.87A

2.2.5 施肥对土壤速效钾含量的影响 在枣园连续施肥 4 a 后, 由表 5 所示, 各土层速效钾的含量都显著提高。在 0~ 20 cm, K 施肥处理土壤速效钾含量最高, 与 CK 相比增加了 29.34%; 在 20~ 40cm, 连续 4 a 施 K 肥处理(K、NPK₁) 土壤速效钾分别比 CK 增加了 268.59% 和 214.48%, K> NPK₁> N> N₁P₁> P> CK; 在 40~ 60cm, 连续 4 a 施 K 肥处理(K、NPK₁) 土壤速效钾分别比 CK 增加了 237.23% 和 181.94%, K> NPK₁> N₁P₁> N> P> CK。在土壤剖面, K、NPK₁ 表现为 20~ 40 cm 土壤速效钾最高, 其它施肥处理则是在 0~ 20 cm 最高。试验说明, 连续 4 a 施钾肥(K、NPK₁) 能够显著增加土壤各层速效钾的含量, 同时发现其它 N、P 肥也能缓慢增加土壤速效钾含量, 这可能是由于 N、P 肥能够增加土壤酶的活性, 据王树起^[8] 研究, 脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶与土壤速效钾呈显著相关性, 从而经过土壤酶的生化反应增加土壤速效钾的含量。

表 5 连续施肥对土壤速效钾的影响(mg/kg)

Table 5 Effect of successive fertilization on content of soil available K

处理 Treatments	0~ 20 cm	20~ 40 cm	40~ 60 cm
CK	174.81±4.59B	87.17±2.22E	87.17±5.98F
N	220.45±3.72B	149.33±2.28C	136.57±2.19D
P	180.81±2.24B	101.53±2.23D	110.60±2.17E
K	281.93±15.85A	321.30±15.52A	293.97±15.71A
N ₁ P ₁	226.24±2.16B	143.80±2.25C	172.23±2.46C
NPK ₁	226.15±4.29B	274.13±1.85B	245.77±2.15B

2.3 土壤酶活性与土壤养分含量间的相关性

在枣园连续 4 a 施肥后, 各种土壤酶活性与一些土壤有效养分间呈显著或极显著的正相关(表 6、7、8)。在 0~ 20 cm 土层, 磷酸酶与有机质、速效磷, 过氧化酶与有机质、全氮呈显著或极显著性正相关, 相关系数依次为 0.6865*、0.8324**、0.8157**、0.6366*。在 20~ 40 cm, 脲酶与有机质、全氮、速效氮, 磷酸酶与速效钾, 过氧化氢酶与速效磷, 蔗糖酶与有机质、速效钾呈显著或极显著性正相关, 相关系数依次为 0.7860**、0.8793**、0.9057**、0.8200**、0.9674**、0.7301*、0.6811*。在 40~ 60 cm, 脲酶与全氮、速效磷, 磷酸酶与有机质、速效氮, 过氧化氢酶与速效磷, 蔗糖酶与有机质、全氮、速效磷呈显著性正相关。由分析可得, 在黄土高原山地滴灌枣园, 土壤酶活性的高低与养分含量有密切的关系, 可以在一定程度上作为评价土壤肥力的指标。

表 6 0~ 20 cm 土壤酶活性与土壤养分含量之间的相关系数

Table 6 The correlative coefficients between soil enzyme activity and soil nutrients in 0~ 20 cm soil layer

项目 Items	有机质 OM.	全氮 Total N	速效氮 Avail. N	速效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K
脲酶 Urease	0.3423	0.5569	0.3593	0.4086	0.3822
磷酸酶 Phosphatase	0.6865*	0.4759	-0.2372	0.8324**	0.1905
过氧化氢酶 Catalase	0.8157**	0.6366*	0.0150	0.5780	0.2562
蔗糖酶 Invertase	0.2101	-0.1364	-0.6242	0.6067	-0.0746

注: $r_{0.05} = 0.6319$, $r_{0.01} = 0.7646$, $n = 10$; * 显著相关, ** 极显著相关。下同。

Note: $r_{0.05} = 0.6319$, $r_{0.01} = 0.7646$, $n = 10$; * and ** mean significance at 5% and 1% levels, respectively. The same as below.

表 7 20~ 40 cm 土壤酶活性与土壤养分含量之间的相关系数

Table 7 The correlative coefficients between soil enzyme activity and soil nutrients in 20~ 40 cm soil layer

项目 Items	有机质 OM.	全氮 Total N	速效氮 Avail. N	速效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K
脲酶 Urease	0.7860*	0.8793**	0.9057**	0.2838	0.4145
磷酸酶 Phosphatase	0.1547	0.4287	0.6536	-0.2190	0.8200**
过氧化氢酶 Catalase	-0.3980	0.3579	-0.1172	0.9674**	-0.1743
蔗糖酶 Invertase	0.7301*	-0.0562	0.0023	0.3074	0.6811*

表 8 40~ 60 cm 土壤酶活性与土壤养分含量之间的相关系数

Table 8 The correlative coefficients between soil enzyme activity and soil nutrients in the 40~ 60 cm soil layer

项目 Items	有机质 OM.	全氮 Total N	速效氮 Avail. N	速效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K
脲酶 Urease	0.0928	0.8947**	0.6198	0.8200**	0.3004
磷酸酶 Phosphatase	0.7800**	0.5615	0.6663*	0.1854	0.3552
过氧化氢酶 Catalase	-0.5470	0.3009	-0.1431	0.6803*	0.0568
蔗糖酶 Invertase	0.9360**	0.7582*	0.1381	0.8743**	0.3992

3 结 论

1) 在黄土高原山地枣园连续施肥 4 a 后, 以土壤酶活性和土壤养分为评价标准, 综合分析后得出 NPK₁ 施肥处理效果最好, 能够为枣树创造一个稳产高产的土壤生物化学环境。NPK₁ 施肥处理显著增

加土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性, 提高土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量, 与 CK 相比分别增加了 740.04%、118.80%、21.63%、174.32%、40.43%、97.62%、341.69%、194.75%、113.68%。

2) 在土壤剖面, 土壤酶活性和土壤养分含量总的来说是随土壤深度的增加而减小, 但是由于枣园采用集中施肥、土壤中养分迁移和枣树根系分布等原因, 有些施肥处理则是呈波浪型变化, 比如 P 处理中的土壤过氧化氢酶活性表现为 20~40 cm > 40~60 cm > 0~20 cm, NPK₁ 处理中土壤速效磷含量表现为 0~20 cm > 40~60 cm > 20~40 cm。在 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 三个土层, 土壤酶活性和土壤养分对各施肥处理都有不同程度的响应, 表明连续 4 a 施肥可以达到 0~60 cm 枣树根的密集区这个深度。

3) 在 0~20 cm 土层, 磷酸酶与有机质、速效磷, 过氧化酶与有机质、全氮呈显著或极显著正相关。在 20~40 cm, 脲酶与有机质、全氮、速效氮, 磷酸酶与速效钾, 过氧化氢酶与速效磷, 蔗糖酶与有机质、速效钾呈显著性或极显著性正相关。在 40~60 cm, 脲酶与全氮、速效磷, 磷酸酶与有机质、速效氮, 过氧化氢酶与速效磷, 蔗糖酶与有机质、全氮、速效磷呈显著或极显著正相关。

4 讨论

王灿等^[22]利用常熟农业生态国家野外试验站长期定位试验得出, 土壤酶活性对 N、P、K 合理配施有明显的响应, NPK 施肥处理比无肥处理中土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶活性分别提高 108.07%、170.2% 和 58.0%。孙瑞莲等^[19]研究表明, N、P、K 配合施用能明显提高土壤有机质和氮磷钾养分含量, 增强土壤转化酶、磷酸酶和脲酶活性, 这种施肥方式可以为作物稳产高产创造良好的土壤生物化学环境。本试验与前人结论基本一致, 在陕北黄土高原枣园连续 4 a 施 NPK₁ 肥能够增强土壤酶活性, 提高有机质和氮磷钾养分含量。原因可能是: 1) 施化肥可增加作物的生物产量, 也可增加每年归还到土壤中的有机残体(落叶、根), 有机物的增加可提高土壤酶活性, 改善土壤结构, 提高生产力, 且增加的酶活性在土壤生态系统中能够促进养分循环。2) 适量施入 N 肥有利于协调土壤 C/N, 改善土壤理化性质, 从而有助于作物和土壤微生物的生长, 使更多的酶伴随着旺盛的根系活动和土壤动物、微生物的生命活动而进入土壤。本试验 N、NPK₁ 这两个施肥处

理提高土壤脲酶活性效果要好于其它 3 个施肥处理。3) 陕北枣园黄绵土严重缺磷, 土壤供磷能力远不能满足作物生长的需要, 因此枣树根系分泌较多的磷酸酶, 以促进土壤中有有机磷化合物水解, 生成可以被植物所利用的无机态磷, P 肥的施入能够很好地补偿植物生长吸收的磷营养。

邱莉萍等^[23]研究发现, 土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性在土壤剖面中的分布从表层到深层, 酶活性依次减小, 多酚氧化酶呈波浪型分布。殷瑞敬等^[11]在渭北旱塬苹果园研究表明, 不同土层土壤酶活性的大小也存在差异, 其中蔗糖酶和脲酶活性随土层加深均有所降低, 而过氧化氢酶活性则呈升高趋势。本试验中, 土壤酶活性和土壤养分含量总的来说是随土壤深度的增加而减小, 但是有些施肥处理则是呈“波浪”型变化。随着土壤剖面的加深, 土壤环境条件变差, 不利于土壤酶活性的增加^[24]。土壤表层积累了腐殖质, 有机质含量高, 有充分的营养源以利于微生物的生长, 加之表层水热条件和通气状况好, 利于微生物的生长和繁殖, 因而使表层的土壤酶活性较高。

土壤酶的活性是否可以反映土壤肥力, 仍存在争议。See 等^[25]认为土壤酶活性不能作为评价土壤肥力的参数。孙秀山等^[12]也不支持把土壤酶活性作为评价土壤肥力的参数, 主要因其不能提供土壤生物状况的完整描述, 且酶活性测定不能提供鉴定土壤总生物活性的恒值。和文祥等^[26]通过对陕北地区 13 个土样的脲酶活性与土壤理化性质相关分析得出, 土壤的脲酶活性分别与土壤有机质、全氮、碱解氮及全磷呈极显著正相关, 而与 pH 值为极显著负相关。樊军^[9]在黄土高原上的试验也证实土壤酶活性与土壤有效养分间呈显著或极显著的正相关关系。这些结论的差异性可能是因为土壤酶的活性与土壤类型、栽培制度、管理措施、水热、pH 值等密切相关, 是一个复杂体系, 我们作评价时结合当地土壤实际情况, 不能一概而论。就本试验而言, 陕北山地枣园土壤酶活性与土壤肥力显著相关, 可以很好地反映土壤肥力。

参考文献:

- [1] 陈恩凤. 土壤酶与土壤肥力研究[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 54-61.
- [2] Vepsilinen M, Kukkonen S, Vestberg M, et al. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1665-1672.
- [3] Kozdroj J, Van Elsas J D. Response of the bacterial community to root exudates in soil polluted with heavy metals assessed by molecular and

- cultural approaches[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(10): 1405-1417.
- [4] Rao M A, Violante A, Gianfreda L. Interaction of acid phosphatase with clays, organic molecules and organomineral complexes: Kinetics and stability[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:1007-1014.
- [5] Eivazi F, Bayan M R. Select soil enzyme activities in the historic sanborn field as affected by long-term cropping systems[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, 34:2259-2275.
- [6] 孙莲英, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406-410.
- [7] 袁玲, 杨邦俊, 郑兰君, 等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(4): 309-306.
- [8] 王叔起, 韩晓增, 乔云发, 等. 不同土地利用和施肥方式对土壤酶活性及相关肥力因子的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(6): 1311-1316.
- [9] 樊军, 郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究 I. 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 9-13.
- [10] 徐福利, 梁银丽, 张成娥, 等. 日光温室土壤微生物特性与施肥的关系[J]. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 20-22, 30.
- [11] 殷瑞敬, 温晓霞, 黄金辉, 等. 耕作和覆盖对苹果园土壤酶活性的影响[J]. *园艺学报*, 2009, 36(5): 717-722.
- [12] 孙秀山, 封海胜, 万书波, 等. 连作花生田主要微生物类群与土壤酶活性变化及其交互作用[J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 671-621.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [15] Dalal R C. The typic and properties of soil enzymes in the Congo[J]. *Soil Sci*, 1975: 120-126, 206.
- [16] 赵之重. 土壤酶与土壤肥力关系的研究[J]. *青岛大学学报(自然科学版)*, 1998, 16(3): 24-29.
- [17] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 116-122.
- [18] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力的关系[J]. *土壤肥料*, 1980, 3(2): 19-21.
- [19] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406-410.
- [20] 林大仪. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [21] Van Wijnen H J, Vander Wal R, Bakker J P. The impact of herbivores on nitrogen mineralization rate: Consequences for salt marsh succession[J]. *Oecologia*, 1999, 118: 225-231.
- [22] 王灿, 王德建, 孙瑞娟, 等. 长期不同施肥方式下土壤酶活性与肥力因素的相关性[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 688-692.
- [23] 邱莉萍, 刘军, 王益权, 等. 长期施肥土壤中酶活性的剖面分布及其动力学特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(6): 737-741.
- [24] 陈蓓, 张仁陟. 免耕与覆盖对土壤微生物数量及组成的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2004, 39(6): 634-638.
- [25] See M H, Laitam H, Pikk J. The influence of nutritional conditions on forest soil microflora[J]. *Baltic Forestry*, 1998, 4(1): 2-7.
- [26] 和文祥, 朱铭铨. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 392-398.

Effects of N, P and K fertilization on soil enzyme activities and soil fertility in montane Jujube forest of hilly loess region

LI Hu-jie¹, XU Fu-li^{1,2}, LIN Yun¹, LUAN Xiao-bo¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shanxi 712100, China)

Abstract: Soil enzymes play an essential role in catalyzing reactions necessary for decomposition of organic matter and nutrient cycling in ecosystems, involving a range of plants, microorganisms, animals and their debris. Field experiment and laboratory analysis were carried out to investigate soil enzyme activities and soil fertility affected by successive 4 year N, P, K fertilization in montane jujube forest of hilly loess region. The results showed that successive NPK₁ fertilization could significantly increase the soil activities of urease, phosphatase, catalase and invertase. Similarly, the contents of organic matter, both total N and available N, P and K were increased. From surface layer to in-depth layer, the soil enzyme activities and the contents of available N, P and K reduced in turn. The relative analysis suggested that there was a significantly positive correlation between soil phosphatase activity and the contents of organic matter, available P, catalase activity and the contents of organic matter and total N in 0~20 cm soil layer. In 20~40 cm soil layer, the positive correlation of soil urease activity with the contents of organic matter, total N, available N, phosphatase activity with the contents of available K, catalase activity with the contents of available P, invertase activity with the contents of organic matter, available K were significant. In 40~60 cm soil layer, positive correlation was found between urease activity with the contents of total N, available P, phosphatase activity with the contents of organic matter, available N, atalase activity with the contents of available P, invertase activity with the contents of organic matter, total N and available P.

Keywords: soil enzyme; Jujube forest; soil fertility; NPK