

# 长期不同施肥处理对苹果产量、品质及土壤肥力的影响\*

赵佐平<sup>1,2</sup> 同延安<sup>1\*\*</sup> 刘芬<sup>1</sup> 王小英<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>陕西理工学院, 陕西汉中 723001)

**摘要** 通过连续7年(2003—2010年)的田间定位试验,研究了不同施肥处理[不施肥对照,CK;不施N肥只施PK肥,PK;不施P肥只施NK肥,NK;不施K肥只施NP肥,NP;单施NPK化肥,NPK;单施有机肥(猪粪),M;化肥有机肥配施(化肥有机肥氮各占一半),NPKM]对渭北旱塬富士苹果产量、品质及果园土壤养分含量变化的影响。结果表明:施肥可以提高苹果产量,连续7年不同施肥处理苹果平均产量较对照提高14.4%~63.8%,各处理苹果年平均产量顺序为:NPKM>NPK≥M>NP≥NK>PK>CK。NPKM、M、NPK处理随着试验时间的推移,果实可溶性糖、维生素C、可溶性固形物含量呈上升趋势,NPKM、M处理不同年际间波动相对较小;NPKM处理糖酸比5年较对照提高了30.9%,维生素C含量提高了17.5%。长期合理施肥有利于提高土壤有机质,NPKM、M处理0~20 cm土层有机质含量提高幅度最大,分别提高了28.8%和29.3%。NPK、NPKM、M处理土壤各层速效氮、有效磷、速效钾含量较试验前均有显著提高,NPK处理0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层速效氮含量分别提高了22.7%、37.3%和53.4%。与NPK处理相比,NPKM处理的土壤速效磷含量提高了18.7%,且不同处理土壤速效磷含量上层显著大于下层。

**关键词** 苹果 长期施肥 产量 品质 土壤肥力

文章编号 1001-9332(2013)11-3091-08 中图分类号 S661.1, S606.2 文献标识码 A

**Effects of different long-term fertilization patterns on Fuji apple yield, quality, and soil fertility on Weibei Dryland, Shaanxi Province of Northwest China.** ZHAO Zuo-ping<sup>1,2</sup>, TONG Yan-an<sup>1</sup>, LIU Fen<sup>1</sup>, WANG Xiao-ying<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(11): 3091-3098.

**Abstract:** A 7-year (2003-2010) located field experiment was conducted to evaluate the effects of different long-term fertilization patterns on the Fuji apple yield, quality, and soil fertility on the Weibei Dryland, Shaanxi Province of Northwest China. Seven treatments were installed, *i. e.*, no fertilization (CK), inorganic P and K fertilization (PK), inorganic N and K fertilization (NK), inorganic N and P fertilization (NP), inorganic N, P, and K fertilization (NPK), swine manure (M), and half inorganic N, P, and K combined with half swine manure (NPKM). Each treatment had three replications. Fertilization increased the apple yield. The average yield in the 7 years under fertilization was increased by 14.4%–63.8%, as compared to the CK. The average yield decreased in the order of NPKM>NPK≥M>NP≥NK>PK>CK. In treatments NPKM, M, and NPK, the fruit sugar/acid (S:A) ratio, vitamin C, soluble solid, and hardness tended to be increased with time, with a smaller yearly fluctuation in treatments NPKM and M. In treatment NPKM, the S:A ratio and vitamin C increased by 30.9% and 17.5%, respectively after five years, as compared to the CK. Long-term rational fertilization increased the soil organic matter (SOC) content in 0–20 cm layer, with the largest increment in treatments NPKM and M (28.8% and 29.3%, respectively). The soil available N, P, and K contents in all layers in treatments NPK, NPKM, and M increased significantly, and the soil available N content in 0–20, 20–40, and 40–60 cm layers

\* 国际植物营养研究所项目(IPNI)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

2013-04-08 收稿, 2013-08-23 接受。

in treatment NPK was increased by 22.7%, 37.3%, and 53.4%, respectively. As compared to treatment NPK, the soil available P content in treatment NPKM was increased by 18.7%. In all fertilization treatments, the soil available P content was significantly higher in upper layer than in lower layer.

**Key words:** apple; long-term fertilization; yield; quality; soil fertility.

中国作为世界上最大的苹果生产国和消费国, 苹果种植面积和产量均占世界总量的 46% 以上<sup>[1]</sup>. 陕西是中国水果生产第一大省, 目前苹果产业已经具有很大规模. 2011 年陕西苹果种植面积达到 66 万  $\text{hm}^2$ , 苹果产量 960.9 万 t, 比 2010 年增长 5.5%, 继续稳居全国第一. 2011 年陕西果业总产值约达 200 亿元<sup>[2]</sup>. 果业已成为陕西果农经济增收的重要支柱性产业. 由于经济利益的驱动, 果农原来粗放式的栽培管理模式逐渐向以市场为导向、以高投入高产出为特征的生产方式转变. 果农对果园的化肥投入越来越高, 特别是氮肥的投入, 而忽视了科学施肥的重要作用. 赵佐平等<sup>[3]</sup>通过连续 2 年的调查发现, 陕西渭北旱塬苹果园普遍存在施肥结构不合理、养分不平衡、肥料利用率低等现象, 这也是导致陕西苹果产量不稳、品质较差的主要原因之一, 同时不合理施肥还可能造成土壤质量退化, 甚至环境污染问题. 蔡泽江等<sup>[4]</sup>通过连续 18 年的长期定位田间试验研究表明, 长期单施氮肥造成红壤 pH 值明显下降, 18 年降低了 1.5. 张云贵等<sup>[5]</sup>通过长期定位试验研究指出, 农业生产中长期施用高量氮肥是造成地下水硝酸盐污染的重要原因之一, 而且氮肥所造成的氮素径流流失是引起水体氮富营养化的重要原因<sup>[6]</sup>.

彭福田等<sup>[7]</sup>研究表明, 随着苹果产量水平的提高, 果园土壤肥力呈增高趋势. 然而由于陕西渭北旱塬地区土层深厚, 受人类长期不合理耕作的影响, 土壤养分的累积在不同土层存在较大差异<sup>[8-9]</sup>. 苹果根系在地下分布较深, 不同土层的根系密度和养分吸收量差别较大<sup>[10]</sup>, 且苹果等多年生果树的生长和结果状况并不完全取决于当年土壤营养元素的有效性<sup>[11]</sup>, 导致果树生长与施肥及土壤肥力水平的关系远比普通作物复杂. 为此, 我们在陕西渭北旱塬苹果优生区进行了多年不同施肥处理试验. 旨在探明长期不同施肥处理对苹果产量、品质及果园土壤肥力的影响, 为果园养分管理和可持续发展提供参考依据.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2003—2010 年在陕西渭北旱塬苹果优

生区的合阳县休里村西北农林科技大学旱农试验站进行. 该区位于  $34^{\circ}59'16''\text{N}$ ,  $109^{\circ}58'33''\text{E}$ , 海拔 950 m, 光照充足, 年平均气温  $11.5^{\circ}\text{C}$ , 年均降水量 536.5 mm, 最大蒸发量 1005.8 mm. 供试果园面积  $10\text{hm}^2$ , 地势平坦, 可灌溉, 果园土壤为黑垆土, 供试地块试验布置前土壤肥力状况见表 1.

### 1.2 试验设计

**1.2.1 试验材料** 试验果园株行距  $3\text{m}\times 4\text{m}$ . 砧木为八棱海棠 (*Mains micromalus* Makino), 主栽品种为红富士, 全部以 M26 为中间砧, 树龄 15 年 (至 2010 年), 生长旺盛.

**1.2.2 试验设计** 试验于 2003 年苹果采收后布置, 至 2010 年苹果采收后结束. 选树势基本一致无病虫害的 6 棵树为一个处理小区, 重复 3 次, 小区随机排列. 根据果树的施肥种类和施肥量的不同, 共设 7 个处理. 分别是: 不施肥 (CK)、不施 N 肥只施 PK 肥 (PK)、不施 P 肥只施 NK 肥 (NK)、不施 K 肥只施 NP 肥 (NP)、单施 NPK 化肥 (NPK)、单施有机肥 (M)、化肥有机肥配施 (化肥有机肥氮各占一半, NPKM). 根据果树专家<sup>[12-14]</sup>合理施肥推荐量: 一般苹果产量保持在  $25000\sim 45000\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间比较适宜, 建议肥料施用量为  $\text{N } 240\sim 360\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 220\sim 340\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O } 160\sim 240\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 有机肥  $40000\sim 60000\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . 本研究施肥量: 纯 N  $330\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 221\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O } 242.5\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . 根据多年测得腐熟猪粪平均养分含量 (含 N 0.60%,  $\text{P}_2\text{O}_5\ 0.40\%$ ,  $\text{K}_2\text{O } 0.44\%$ ) 计算有机猪粪用量为  $55000\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; 所有处理所用化肥为: 氮肥用尿素, 磷肥用普通过磷酸钙, 钾肥用氯化钾, 磷、钾肥作为基肥秋季一次施入, 尿素 2/3 作为基肥施入,

表 1 供试果园土壤基础肥力

Table 1 Soil properties of apple orchard before fertilization

土层深度 Soil depth (cm)	有机质 Organic matter ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效氮 Available N ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效磷 Available P ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾 Available K ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
0~20	14.6	55.4	19.8	187.7
20~40	9.1	39.9	11.6	112.6
40~60	6.2	29.5	5.9	54.5

2003 年 10 月采样 Sampling in October 2003.

1/3在春季作为追肥施入,施肥方式均为条状沟施. 供试果园剪枝、除虫、疏花疏果等管理措施同当地普通果园一致.

### 1.3 测定项目与方法

果实在每年 10 月中旬成熟时采收,每株从东南西北 4 个方向各采 16 个果,将每处理果实混合,按小区收获,称量,计算产量,并对样品进行品质测定. 可溶性糖用铜还原-直接滴定法测定<sup>[15]</sup>;可溶性固形物用泉州光学仪器厂生产的 WYT-4 型糖量计测定;Vc 用 2,6-二氯酚兰比色法测定;有机酸用 NaOH 滴定法测定<sup>[15]</sup>;硬度用 HP-230 型硬度仪测定. 苹果采收后于树冠下避开施肥点分层采集土样(0~20 cm,20~40 cm 和 40~60 cm),每小区取 10 个采样点混合为一个土样. 土样风干后过 2 mm 筛,采用 ASI 法分析土壤样品的养分状况,其中土壤速效 P 和速效 K 均采用  $0.25 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3 + 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ EDTA} + 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{F}$  浸提,浸提液中有有效磷用钼蓝比色法测定,有效钾用火焰光度计测定;硝态氮和铵态氮采用  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的 KCl 浸提,紫外分光光度计测定<sup>[15]</sup>. 本文中所指速效氮为硝态氮和铵态氮之和. 土壤有机质用重铬酸钾-浓硫酸氧化(外加热法),硫酸亚铁溶液滴定法测定.

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 DPS 软件对试验数据进行统计分析,并进行差异显著性检验,显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 不同施肥处理对苹果产量及经济效益的影响

由表 2 可知,连续 7 年不同施肥处理苹果平均产量较对照提高 14.4%~63.8%. NPKM 处理苹果

平均产量最高,为  $36.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较对照提高 63.8%;NPK 处理平均产量为  $35.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较对照提高 59.3%;M 处理平均产量也较对照提高 54.9%. 本研究养分合适比例为 1:0.7:0.75,总体表现出氮、磷、钾肥料配合施用,能发挥土地的生产潜力. 其他缺素(PK、NP、NK)处理较对照都显著提高了苹果产量,但处理间差异不显著. 不同肥料处理苹果产量顺序为:NPKM>NPK $\geq$ M>NP $\geq$ NK>PK>CK.

不同处理经济效益见表 2,其中 NPKM 处理产值为  $18.44 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,纯收益为  $17.51 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,较对照纯收益净增  $6.26 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2}$ . NPK 处理产值仅次于 NPKM 处理,纯收益略高于其他处理,为  $17.54 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 尽管 CK 处理未有肥料成本投入,但由于产量较低,纯收益也最小. 由此可知,合理施肥是提高苹果产量、增加收益的重要管理模式.

### 2.2 不同施肥处理苹果产量年际变化

由图 1 可以看出,同一处理不同年际间苹果产量存在较大波动,这可能受大小年、当年气候条件、果园管理水平等因素的影响. 但从总体趋势来看,NPKM、M、NPK 处理随着试验时间的推移,产量呈上升趋势,年平均增幅分别为 2.1、1.1 和 1.2  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;与 NPKM、M 相比,NPK 处理受外来因素的影响年际波动幅度较大,其中 2005—2006 年波动幅度最大,为  $5.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 缺素处理(PK、NP、NK)产量则呈现缓慢下降趋势,年平均降幅分别为 0.5、0.3 和  $0.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;其中减氮处理降幅波动最大,2006—2007 年减产  $4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ . 上述结果说明合理施肥能够提高果实产量,且随着时间的推移效果越来越明显. 从波动幅度来看,NPKM、M、NPK 处理随着时间推移波动幅度逐年减小,特别是 NPKM、M 处理

表 2 不同施肥处理对苹果平均产量及经济效益的影响(2004—2010 年平均)

Table 2 Effects of different fertilization on apple fruit yield and income (Average in 2004—2010)

处理 Treatment	N : P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : K <sub>2</sub> O	平均产量 Average yield (t · hm <sup>-2</sup> )	增产 Increment (%)	产值 Value (×10 <sup>4</sup> yuan · hm <sup>-2</sup> )	肥料成本 Fertilizer cost (×10 <sup>4</sup> yuan · hm <sup>-2</sup> )	纯收益 Net income (×10 <sup>4</sup> yuan · hm <sup>-2</sup> )
CK	0 : 0 : 0	22.52c	—	11.26	0	11.26
PK	0 : 0.7 : 0.75	25.77bc	14.4	12.88	0.26	12.62
NK	1 : 0 : 0.75	28.29b	25.6	14.15	0.33	13.82
NP	1 : 0.7 : 0	28.5b	26.6	14.25	0.25	14.00
NPK	1 : 0.7 : 0.75	35.88a	59.3	17.94	0.39	17.54
M	1 : 0.7 : 0.75	35.28a	54.9	17.44	2.50	14.94
NPKM	1 : 0.7 : 0.75	36.88a	63.8	18.44	0.93	17.51

苹果价格 5 元 · kg<sup>-1</sup>(2010);肥料价格 N 4.78 元 · kg<sup>-1</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4.17 元 · kg<sup>-1</sup>,K<sub>2</sub>O 6 元 · kg<sup>-1</sup>,有机肥 0.5 元 · kg<sup>-1</sup>;该效益分析中不考虑肥料以外的其他成本. Apple price; 5 yuan · kg<sup>-1</sup>(2010), price of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O and organic manure are 4.78, 4.17, 6 and 0.5 yuan · kg<sup>-1</sup> respectively, and the net income analysis didn't include other cost except fertilizer. 同列不同字母表示差异显著(P<0.05) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

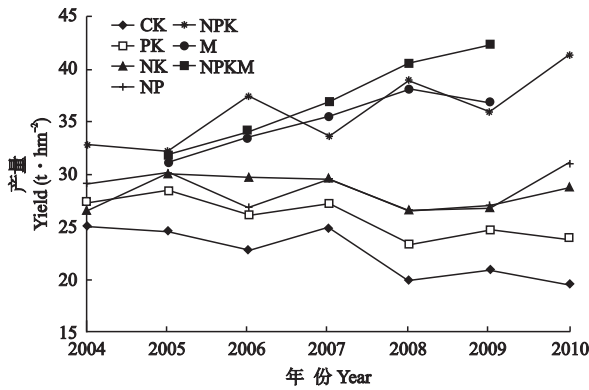


图1 不同施肥处理苹果产量年际变化

Fig. 1 Annual changes of apple yield under different fertilization.

后期波动更小.说明这2个处理一方面通过有机肥直接补充了苹果园的土壤养分,同时又通过调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使苹果各生育阶段得到更为均衡的营养,从而提高了苹果产量,减小了大小年和当年气候变化的影响.

不同处理间后期年际产量差异更为明显,特别是平衡施肥(NPKM、NPK、M)处理产量均高于缺素(PK、NP、NK)处理.2009年产量结果显示,NPKM处理产量达到 $42.11 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与其他各处理差异均达到显著水平.2010年,NPK处理产量达到 $41.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,与试验初期的2004年相比,7年平衡施肥后产量提高了26.3%,与对照相比提高了59.3%.说明平衡施肥可促进苹果增产.缺素(PK、NP、NK)处理中NP、NK处理产量趋势线始终在PK处理之上,说明减氮处理对苹果产量影响较大,其处理效果仅略高于对照处理,均低于其他处理,可见氮肥对当地苹果产量的贡献最大,这也是果农长期施肥管理中“重氮偏磷轻钾”的主要原因之一.

### 2.3 不同施肥处理对苹果品质的影响

**2.3.1 可溶性糖含量** 从不同施肥处理苹果品质分析结果可以看出(图2),不同年际间,NPKM、M、NPK处理随着试验时间的推移,可溶性糖含量呈上升趋势.NPKM、M处理不同年际间波动相对较小,且可溶性糖含量分别由2005年的13.8%、13.0%增加到2009年的14.5%和14.4%;NPK处理可溶性糖含量由2004年的12.7%增加到2010年的14.4%.PK、NK、NP处理可溶性糖含量逐年递减,2004—2006年降低幅度不大,2006年以后递减幅度开始增大,到2008年可溶性糖含量与NPKM、NPK、M处理相比差异达到极显著水平;但2009—2010年,其可溶性糖含量又呈增加趋势,这可能与当年雨

水条件、光照时间、管理水平等因素有关.同年相比,不同处理间差异明显,NPKM、NPK、M处理可溶性糖含量始终高于PK、NK、NP处理,NP处理的可溶性糖含量最低,且试验时间越长降低越显著,这可能是因为钾素能促进果实中的淀粉转化成糖,进而影响苹果品质.

**2.3.2 可滴定酸含量** 所有处理苹果可滴定酸含量在2004—2008年变化幅度不大,2009、2010年其含量显著下降(图2),这可能与当年气候条件、光照时间、苹果采收时间、采收后放置时间等因素有关,特别是果实采收后随着放置时间的延长,其可滴定酸含量逐渐降低.同年相比,PK、NK、NP处理可滴定酸含量略高于其他处理.随着试验时间的推移,各处理间差异增大.

**2.3.3 糖酸比** 苹果中可溶性糖含量增加、可滴定酸含量降低时,糖酸比就会升高,进而改善果实的口感风味<sup>[16-17]</sup>.NPKM、NPK、M处理糖酸比有逐年增加的趋势,特别是NPKM处理糖酸比由2005年的36.8增加至2009年的48.2,提高了30.9%.而PK、NK、NP处理糖酸比在2004—2008年逐年降低,尤其是NP处理糖酸比由2004年的32.7降到2008年的20.8,降低了29.1%.说明钾肥对苹果品质的贡献较氮、磷肥大.而2009、2010年由于可滴定酸含量显著下降(图2),致使所有处理的糖酸比都显著高于试验初期.

**2.3.4 可溶性固形物** 可溶性固形物在一定程度上可以反映糖类物质的量,是确定苹果适收期和水果品质的重要指标<sup>[18]</sup>.由测定结果(图2)可知,可溶性固形物与可溶性糖含量趋势相似,均为NPKM处理最高.

**2.3.5 维生素C含量** 不同施肥处理果实中维生素C含量不同.同年比较发现,NPKM、NPK、M处理维生素C含量较PK、NK、NP处理高,NPKM处理维生素C含量2009年达到 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ .不同年份比较,NPKM、NPK、M处理果实中维生素C含量逐年递增;PK、NK、NP处理维生素C含量逐年降低,尽管2009年的变化幅度较大,但总体呈下降趋势,其中NP处理降低幅度最大,降低了13.3%(图2).由不同施肥处理结果可知,化肥有机肥配施处理极大地提高了果实中维生素C含量.

**2.3.6 硬度** 随试验时间的推移,NPKM和M处理果实硬度有略微上升趋势,且保持在 $6.5 \sim 7.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间.这是因为有机肥中含有作物所需的Ca、Mg等微量元素,这些元素不仅增加了果实的内

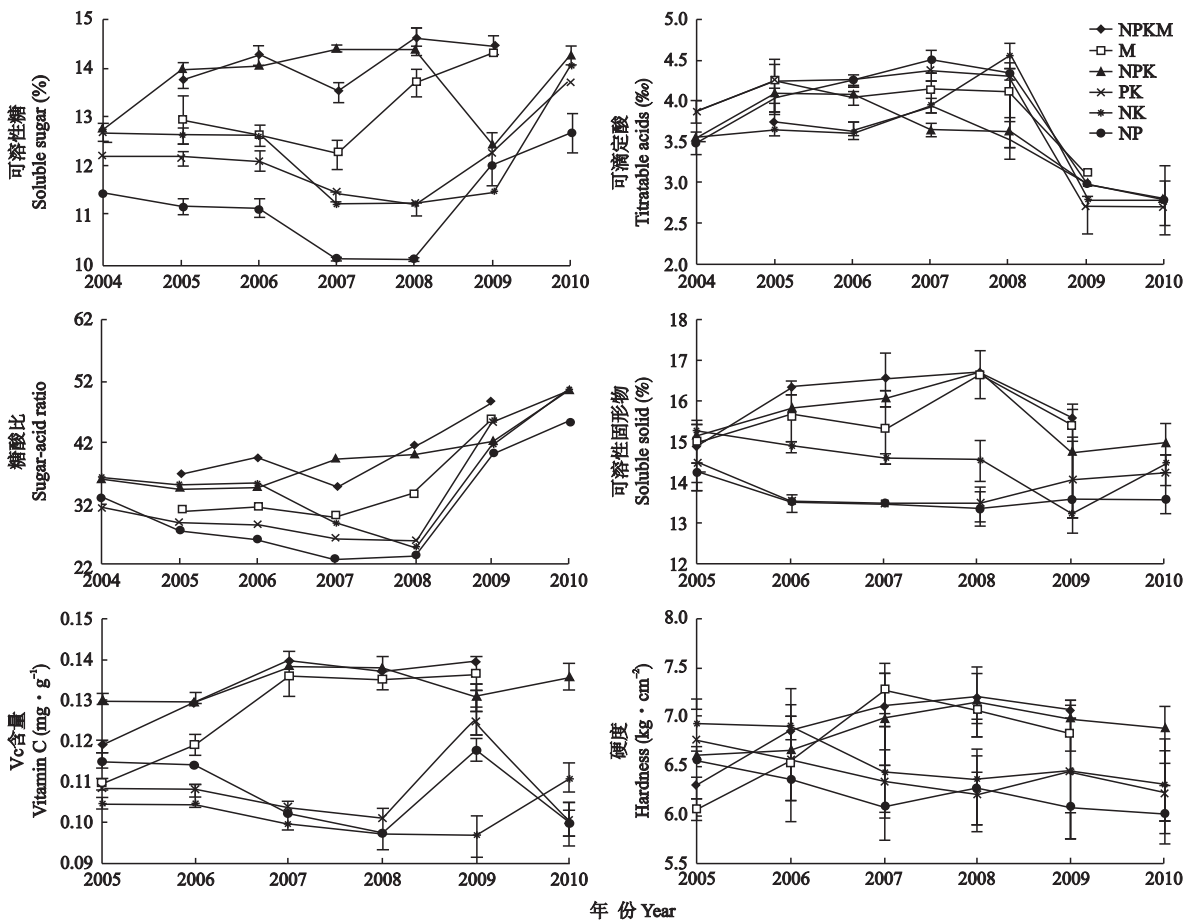


图2 不同施肥处理对苹果可溶性糖、可滴定酸、糖酸比、可溶性固型物、维生素C和硬度的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization on soluble sugar, titratable acids, sugar-acids ratio, soluble solid, vitamin C and hardness of apple fruits.

在品质, 增强了口感, 而且提高了果实的耐储性. PK、NK、NP 处理果实硬度平均在  $6.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  以下 (图2). 可见增施有机肥可提高果实品质.

## 2.4 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

### 2.4.1 土壤有机质

由图3可知, NPKM、M、NPK 处理不同土层有机质含量均得到一定程度的提高. NPKM、M 处理  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层有机质含量提高幅度最大, 分别提高了  $28.8\%$  和  $29.3\%$ ; 而 NPK 处理仅提高了  $10.1\%$ .  $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$  土层 NPKM、M 处理土壤有机质含量也较试验前有不同程度提高, 但提高幅度与上层 ( $0 \sim 20 \text{ cm}$ ) 相比差异不大, 且两处理间差异均未达到显著水平. NPK 处理  $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$  土层土壤有机质含量分别提高了  $1.62$  和  $1.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 可能是果园采收后落叶、杂草等翻埋腐烂增加了土壤有机质含量. PK、NK、NP 处理不同土层土壤有机质含量几乎未改变. 可见施入有机肥料及有机无机肥料配施有利于提高土壤有机质含量, 培肥地力.

### 2.4.2 土壤速效氮

NPK、NPKM、M 处理土壤各层速效氮含量较试验前 (2003 年冬) 均有显著提高. NPK 处理  $0 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$  和  $40 \sim 60 \text{ cm}$  土层 7 年后速效氮含量分别提高了  $22.7\%$ 、 $37.3\%$  和  $53.4\%$ ; NPKM 处理则分别提高了  $23.5\%$ 、 $39.1\%$  和  $40.5\%$ . CK 处理土壤速效氮含量显著下降, 7 年后不同土层速效氮含量分别降低了  $48.7\%$ 、 $30.8\%$  和  $41.3\%$  (图3). 上述试验结果表明, 由于氮磷钾施肥的累积果园土壤中的速效氮随着土层加深而增加. CK 处理的不同土层速效氮含量均呈逐年下降趋势, 这是由于长期不施肥使果园土壤养分缺乏, 加之果树对土壤养分的持续吸收利用, 导致土壤速效氮累积量逐年减少, 且随着土层深度加深而减少.

### 2.4.3 土壤有效磷

长期不同施肥处理后, 除 CK 和 NK 处理外, 各层土壤有效磷含量均显著提高, 其中 NPK 处理增加幅度最大, 在  $0 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$  和  $40 \sim 60 \text{ cm}$  土层较试验前 (2003 年冬) 分别增加了  $133.7\%$ 、 $134.4\%$  和  $73.8\%$ ; NPKM 处理次之, 分别

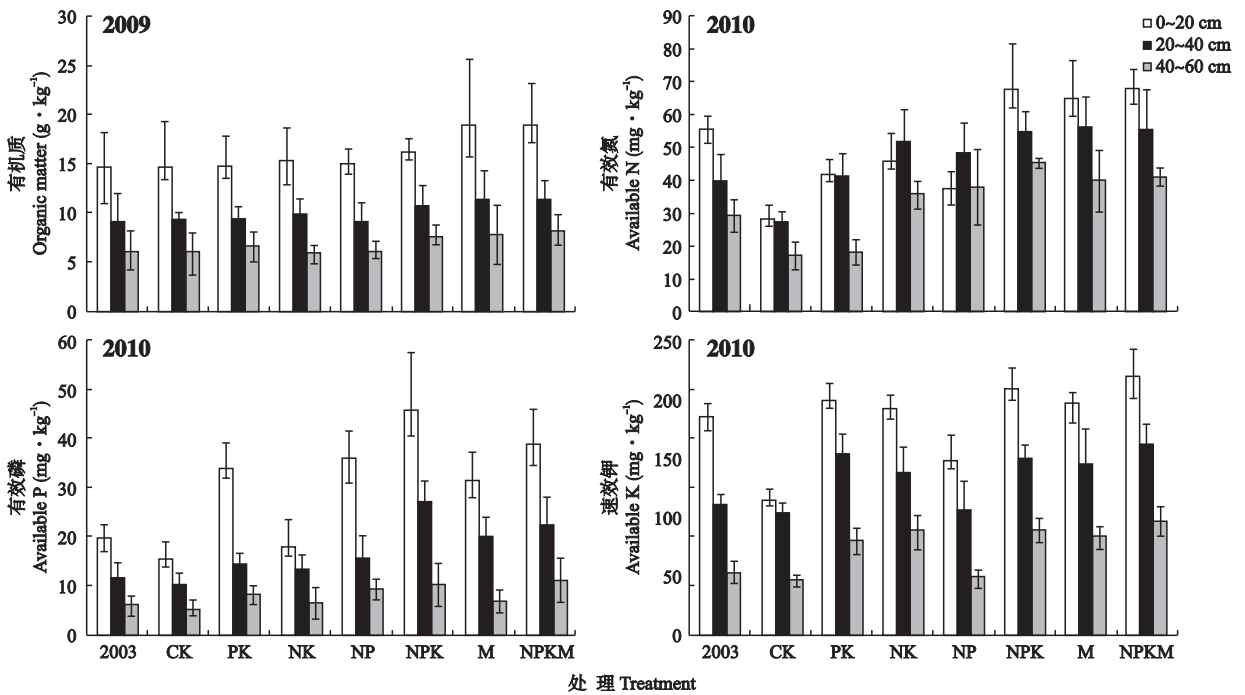


图3 不同施肥处理土壤有机质、速效氮、有效磷和速效钾含量变化

Fig. 3 Changes of soil organic matter, available N, available P and available K under different fertilization.

增加了96.9%、93.9%和87.9%。CK和NK处理各层土壤有效磷含量均较试验前(2003年冬)有所下降。不同处理的果园土壤有效磷含量上层显著大于下层(图3)。说明施肥使土壤有效磷累积主要集中在0~20 cm土层,其数量约为20~60 cm土层累积之和。

**2.4.4 土壤速效钾** 除CK、NP处理外,不同土层中的土壤速效钾含量均大于试验前,且大于同时期的CK处理。试验7年后,NPKM处理在0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土层的土壤速效钾含量分别为222.3、162.7和97.8 mg · kg<sup>-1</sup>;与CK相比,分别增加了90.7%、55.7%和107.8%;与试验前(2003年冬)相比,则分别增加了18.4%、44.6%和79.5%。NPK处理次之,分别较CK增加了82.1%、45.8%和93.2%。NP处理各层速效钾含量显著低于其他施肥处理(图3)。

### 3 讨论

合理施用化肥和有机肥能明显改善土壤肥力状况<sup>[19-20]</sup>,有利于果树高产。本研究通过连续7年田间试验结果表明,苹果年平均产量顺序为NPKM>NPK≥M>NP≥NK>PK>CK,化肥有机肥配施处理苹果产量较对照增加了63.8%;NPK处理苹果产量较对照增加了59.3%;M处理较对照提高了54.9%。

各处理间差异随时间推移越来越显著。这与李忠芳等<sup>[21]</sup>的研究结论一致。本研究肥料养分投入比例为1:0.7:0.75,在前人长期研究<sup>[13-14]</sup>建议合适范围(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O为1:0.5~1:0.6~0.8)之内。有机肥与化肥配施是维持系统可持续性的最优施肥模式,有利于作物高产稳产,增产的原因可能是:一方面通过有机肥直接补充了苹果园系统中的土壤养分,同时又通过调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使苹果各生育阶段得到更为均衡的矿质营养,从而提高了苹果产量,进而减小了大小年、当年气候变化的影响;另一方面,有机肥中腐解产生的有机酸还可能增加了土壤有机养分的矿化过程,从而促进了难溶性养分的释放,增加了土壤中全效和速效养分含量<sup>[22]</sup>,即相当于施入了更多的矿质营养,进而提高了苹果产量。除苹果产量外,果实品质也是人们比较重视的一个方面,包括可溶性糖、Vc含量、可溶性固形物、糖酸比、硬度都直接影响了人们的消费取向。可溶性糖和可滴定酸含量是苹果品质的重要组成部分,当苹果中可溶性糖含量增加、可滴定酸含量降低时,则苹果的糖酸比提高,进而改善了果实的口感风味。本试验中,NPKM和M处理改善果实品质的效果较其他处理显著,NPKM、M处理随着试验时间的推移可溶性糖含量呈上升趋势,分别由2005年的13.8%、13.0%增加到2009年的14.5%和14.4%。NPKM、M处理维生素C含量也分别增加了

17.5% 和 24.5%。合理施肥使果实硬度维持在  $6.5 \sim 7.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  之间。因为有机肥中含有作物所需的 Ca、Mg 等微量元素, 这些元素不仅增加了果实的内在品质, 增强了口感, 而且提高了果实的耐储性。

土壤肥力变化和养分吸收是一个复杂的过程, 不仅关系到土壤养分含量和不同养分之间的相互作用, 还关系到作物生理特征的变化。反映土壤肥力高低的指标有很多, 目前评价土壤肥力的主要养分指标有土壤有机质、有效氮、有效磷、有效钾含量等<sup>[19]</sup>。其中土壤有机质是土壤肥力的重要基础物质, 有机肥中不仅含有植物所必需的大量和微量元素, 还含有丰富的有机养分, 如蛋白质、氨基酸、纤维素等, 肥效持久, 能促进土壤中微生物的繁殖, 改善土壤理化性状, 从而提高土壤肥力。长期施肥结果显示, 无论施化肥还是有机肥对土壤养分都有提升作用。本研究结果与前人研究结果<sup>[23-24]</sup>一致。NPKM、NPK、M 处理不同土层有机质含量均得到提高。其中, NPKM、M 处理 0 ~ 20 cm 土层有机质含量提高幅度最大, 分别提高了 28.8% 和 29.3%; 而 NPK 处理仅提高了 10.1%。其他缺素处理土壤有机质含量几乎未发生变化, 长此以往, 土壤中还可能出现镁、硫、锌等中、微量元素的缺乏。NPK、NPKM、M 处理土壤各层速效氮、有效磷、速效钾含量较试验前均有显著提高; NPK 处理由上而下各土层 7 年后速效氮含量分别提高了 22.7%、37.3% 和 53.4%, 平均含量下层增加幅度大于上层, 这可能是由于速效氮容易随土壤水分淋溶而下渗, 导致速效氮的分布随着土层深度增加而增加。这与古巧珍等<sup>[25]</sup>在农田作物上的研究结果基本一致。施用磷肥提高土壤有效磷含量的效果高于施用有机肥, 主要是因为磷肥在土壤中易被固定为难利用态, 移动性小, 作物对磷的当季利用率只有 10% ~ 25%<sup>[26]</sup>, 所以施化肥后大量的磷在土壤中累积。杨学云等<sup>[27]</sup>通过长期定位试验研究发现, 化学磷肥施入土壤后, 其累积主要集中在表层。而有机肥中的磷主要以有机态存在, 随着有机物质的分解被逐渐释放出来成为速效磷被作物吸收利用; 另外, 有机肥中的磷随有机肥在土壤中的分布相对更广泛, 与作物根系接触面积大, 也是易被作物利用的原因。CK 处理不同土层的速效氮、有效磷、速效钾含量均呈逐年下降趋势, 这是由于长期不施肥使果园土壤缺乏养分供应, 加之果树对土壤养分的持续吸收利用, 导致土壤速效氮的累积量逐年减少, 且随着土层深度加深而减少, 这与高义民等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

## 参考文献

- [1] Tong Y-A (同延安). The Fruit Trees Soil Testing and Fertilizer Technology in North China. Beijing: China Agriculture Press, 2011 (in Chinese)
- [2] Shaanxi Provincial Bureau of Statistics (陕西省统计局). Shaanxi Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2011: 241-244 (in Chinese)
- [3] Zhao Z-P (赵佐平), Tong Y-A (同延安), Liu F (刘芬), et al. Assessment of the current situation of household fertilization on apple in Weibei Plateau. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国农业生态学报), 2012, **20**(8): 1003-1009 (in Chinese)
- [4] Cai Z-J (蔡泽江), Sun N (孙楠), Wang B-R (王伯仁), et al. Effects of long-term fertilization on pH of red soil crop yields and uptakes of nitrogen, phosphorous and potassium. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2011, **17**(1): 71-78 (in Chinese)
- [5] Zhang Y-G (张云贵), Liu H-B (刘宏斌), Li Z-H (李志宏), et al. Study of nitrate leaching potential from agricultural land in Northern China under long-term fertilization conditions. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2005, **11**(6): 711-716 (in Chinese)
- [6] Tarkalson DD, Jolley VD, Robbins CW, et al. Mycorrhizal colonization and nutrition of wheat and sweet corn grown in manure-treated and untreated topsoil and subsoil. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, **21**: 1985-1999
- [7] Peng F-T (彭福田), Jiang Y-M (姜远茂). Characteristics of N, P, and K nutrition in different yield level apple orchards. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(2): 361-367 (in Chinese)
- [8] Peng L-F (彭令发), Hao M-D (郝明德), Lai L (来璐), et al. Effect of long-term fertilization on nutrients distribution of soil profiles in arid highland of Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2003, **23**(1): 36-38 (in Chinese)
- [9] Chen L (陈磊), Hao M-D (郝明德), Qi L-H (戚龙海). Effects of long-term fertilization on nutrient variety of soil and plant systems in dry-land of Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2007, **13**(6): 1006-1012 (in Chinese)
- [10] Titus JS, Kang S. Nitrogen metabolism, translocation and recycling in apple trees. *Horticultural Reviews*, 1982, **4**: 204-246
- [11] Millard P. Ecophysiology of the internal cycling of nitrogen for tree growth. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1996, **159**: 1-10
- [12] Lu K-G (路克国), Zhu S-H (朱树华), Zhang L-Z (张连忠). The effect of bio-fertilizer on soil property and fruit quality of red Fuji apple. *Journal of Shihezi*

- University (Nature Science) (石河子大学学报·自然科学版), 2003, **7**(3): 205–208 (in Chinese)
- [13] Wang S-R (王圣瑞), Ma W-Q (马文奇), Xu W-H (徐文华), *et al.* Evaluation on situation of fertilization for apple in Shaanxi Province. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2004, **22**(1): 146–151 (in Chinese)
- [14] Liu H-J (刘侯俊), Ju X-T (巨晓棠), Tong Y-A (同延安), *et al.* The status and problems of fertilization of main fruit trees in Shaanxi Province. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2002, **20**(1): 38–44 (in Chinese)
- [15] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemical Analysis. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 302–316 (in Chinese)
- [16] Zhao Z-P (赵佐平), Tong Y-A (同延安), Gao Y-M (高义民), *et al.* Effect of different fertilization on yield and quality of Fuji apple. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(5): 1130–1135 (in Chinese)
- [17] Liu R-L (刘汝亮), Tong Y-A (同延安), Fan H-Z (樊红柱), *et al.* Effect of spraying zinc fertilizer on apple growth and fruit quality in Weibei dry-land. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2007, **25**(3): 62–65 (in Chinese)
- [18] Jin H-C (金会翠), Zhang L-S (张林森), Li B-Z (李丙智), *et al.* Effect of potassium on the leaf nutrition and quality of red Fuji apple. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2007, **16**(3): 100–104 (in Chinese)
- [19] Gao J-S (高菊生), Xu M-G (徐明岗), Dong C-H (董春华), *et al.* Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2013, **39**(2): 343–349 (in Chinese)
- [20] Luo H (罗华), Li M (李敏), Hu D-G (胡大刚), *et al.* Effects of organic fertilization on fruit yield and quality of Feicheng peach. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(4): 955–964 (in Chinese)
- [21] Li Z-F (李忠芳), Xu M-G (徐明岗), Zhang H-M (张会民), *et al.* Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(5): 1264–1269 (in Chinese)
- [22] Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, *et al.* Evolution of soil organic matter changes using pyrolysis and metabolic indices: A comparison between organic and mineral fertilization. *Bioresource Technology*, 2007, **98**: 2495–2502
- [23] Xue F (薛峰), Yan T-M (颜廷梅), Yang L-Z (杨林章), *et al.* Influences of organic fertilizer application on soil biological properties. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, **18**(6): 1372–1377 (in Chinese)
- [24] Zhang G-R (张国荣), Li J-M (李菊梅), Xu M-G (徐明岗), *et al.* Effects of chemical fertilizer and organic manure on rice yield and soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2009, **42**(2): 543–551 (in Chinese)
- [25] Gu Q-Z (古巧珍), Yang X-Y (杨学云), Sun B-H (孙本华), *et al.* Effect of long-term fertilization on distribution and accumulation of  $\text{NO}_3^-$ -N in loess profile of dry-land. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2003, **21**(1): 48–52 (in Chinese)
- [26] Huang S-M (黄绍敏), Bao D-J (宝德俊), Huangfu X-R (皇甫湘荣), *et al.* Effect of long-term fertilization on utilization and accumulation of phosphate nutrient in fluvo-aquic soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2006, **39**(1): 102–108 (in Chinese)
- [27] Yang X-Y (杨学云), Sun B-H (孙本华), Gu Q-Z (古巧珍), *et al.* The effects of long-term fertilization on soil phosphorus status in manural loessial soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(4): 837–842 (in Chinese)
- [28] Gao Y-M (高义民), Tong Y-A (同延安), Lu Y-L (路永莉), *et al.* Effects of long-term application of nitrogen, phosphorus and potassium on apple yield and soil nutrients accumulation and distribution in orchard soil of Loess Plateau. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2012, **29**(3): 322–327 (in Chinese)

---

作者简介 赵佐平,男,1982年生,博士研究生,讲师.主要从事环境质量与果树营养研究. E-mail: zhaozuoping@126.com

责任编辑 张凤丽

---