

Research of Optimum Proposal of Soil Nutrient Ratio for Good Fruit Qualities and Plentiful Yield in “Fuji” Apple of Beijing Region*

Qiang Zhang, Qiping Wei[#], Songzhong Liu, Jian Sun, Jun Liu

Institute of Forestry & Pomology, Beijing Academy of Agriculture & Forestry Sciences, Beijing
Email: qpwei@sina.com

Received: May 15th, 2013; revised: May 22nd, 2013; accepted: Jun. 17th, 2013

Copyright © 2013 Qiang Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The objective of this study was to find out the major soil nutrient ratio factors affecting fruit qualities, and to obtain the optimum proposal of soil nutrient ratio for good fruit qualities. It will provide basis data for growers in making rational application and increasing utilization ratio of fertilizer in “Fuji” apple tree. The investigation and analysis were carried out on soil nutrient and fruit qualities in apple orchards of Beijing region from 2008 to 2009. 18 kinds of proportion between soil mineral elements were calculated; methods of canonical correlation analysis and linear program were used to screen major soil nutrient ratio factors affecting fruit qualities and to solve the optimum proposal of soil nutrient ratio for good fruit qualities and plentiful yield in “Fuji” apple. The results showed that soil nutrient ratios vary among different apple orchards, wherein the maximum value of alkaline hydrolysable N/available P, alkaline hydrolysable N/available K, alkaline hydrolysable N/available Zn, available K/Zn and available Ca/Zn was worth 7.95, 7.60, 10.58, 18.76 and 13.47 times the minimum value respectively. Canonical correlation and regression analysis obtained that both alkaline hydrolysable N/available P and available P/Ca were positively correlated with fruit mass, while alkaline hydrolysable N/available Ca was negatively correlated with it; both alkaline hydrolysable N/available Ca and alkaline hydrolysable N/available K were negatively correlated with firmness; alkaline hydrolysable N/available Fe had the greatest effect on fruit soluble solids content, and was negatively correlated with it, while available K/Fe was positively correlated with it. The optimum proposals of soil nutrient element ratio for good apple quality were alkaline hydrolysable N/available P 1.9, alkaline hydrolysable N/available K 0.18, alkaline hydrolysable N/available Ca 0.02 - 0.115, alkaline hydrolysable N/available Fe 1.6, alkaline hydrolysable N/available Zn 4.0 - 55, alkaline hydrolysable N/available B 80 - 420, available P/K 0.4, available P/Ca 0.028 - 0.22, available P/Fe 3 - 30, available P/Zn 9 - 80, available P/B 600, available K/Ca 280, available K/Fe 5.6 - 33, available K/Zn 125, available K/B 125 - 980, available Ca/Fe 500, available Ca/Zn 120 and available Ca/B 1300 - 11,500. Under this optimum proposal for soil nutrient ratio, the target of fruit qualities of 442.06 g mass, 13.87 kg/cm² firmness, 29.37% soluble solids, 0.51% titratable acid will be achieved theoretically. Taken together, it is the key to improve fruit soluble solids content by reducing soil alkaline hydrolysable N, increasing available K and stable available Fe.

Keywords: “Fuji” Apple; Soil Nutrient Ratio; Fruit Qualities; Multivariate Analysis; Optimum Proposal

北京地区富士苹果优质丰产的土壤养分比例优化方案研究*

张 强, 魏钦平[#], 刘松忠, 孙 健, 刘 军

北京市农林科学院林业果树研究所, 北京

*基金项目: 国家苹果产业技术体系建设专项(CARS-28); 公益性行业(农业)科研专项(200903003)资助。

[#]通讯作者。

摘要: 为了探讨影响富士苹果品质的主要土壤养分比例因子和获取果品优质的土壤养分比例优化方案, 为苹果园合理施肥、提高肥料利用效率等提供理论依据, 连续两年对北京地区苹果园的土壤养分含量和富士果实品质进行调查分析, 分别计算土壤矿质元素间的 18 种比例, 应用典型相关分析和线性规划等方法, 筛选影响果实品质因素的主要土壤养分比例因子, 求解富士苹果优质的土壤养分比例优化方案。结果表明, 苹果园间的土壤养分比例差异较大, 其中碱解 N/有效 K、碱解 N/有效 Fe、碱解 N/有效 Zn、有效 K/有效 Zn、有效 Ca/有效 Zn 的最大值是最小值的 7.95、7.60、10.58、18.76 和 13.47 倍。典型相关和回归分析获得了碱解 N/有效 P、有效 P/有效 Ca 与果实单果质量呈正相关, 而碱解 N/有效 Ca 与之呈负相关; 碱解 N/有效 Ca、碱解 N/有效 K 与果实硬度呈负相关; 碱解 N/有效 Fe 对果实可溶性固形物含量影响最大, 并与之呈负相关, 而有效 K/有效 Fe 与之呈正相关。线性规划求解出富士苹果优质的土壤养分比例优化方案为: 碱解 N/有效 P 为 1.9、碱解 N/有效 K 为 0.18、碱解 N/有效 Ca 为 0.02~0.115、碱解 N/有效 Fe 为 1.6、碱解 N/有效 Zn 为 4.0~55、碱解 N/有效 B 为 80~420、有效 P/有效 K 为 0.4、有效 P/有效 Ca 为 0.028~0.22、有效 P/有效 Fe 为 3~30、有效 P/有效 Zn 为 9~80、有效 P/有效 B 为 600、有效 K/有效 Ca 为 280、有效 K/有效 Fe 为 5.6~33、有效 K/有效 Zn 为 125、有效 K/有效 B 为 125~980、有效 Ca/有效 Fe 为 500、有效 Ca/有效 Zn 为 120 和有效 Ca/有效 B 为 1300~11,500 时, 其果实品质指标的理论优化结果为: 单果质量 442.06 g、果实硬度 11.87 kg/cm²、可溶性固形物含量 29.37%、可滴定酸含量 0.51%。综合以上结果, 降低土壤碱解 N、提高有效 K、稳定土壤有效 Fe 含量是提高果实可溶性固形物含量的关键。

关键词: 富士苹果; 土壤养分比例; 果实品质; 多元分析; 优化方案

1. 引言

中国是苹果生产大国, 栽培面积和产量均居世界首位; 富士是我国苹果主栽品种, 其种植面积和产量占 70%以上。长期以来, 我国苹果种植遵守“上山下滩, 不与粮棉争田”的原则, 多数苹果种植在土壤较瘠薄的丘陵山地、河滩地和旱塬地, 果园土壤有机质含量低, 氮肥施用量过多(我国苹果主产区纯氮用量 400~600 kg/hm², 为国外 150 kg/hm² 的 3~4 倍)^[1], 过量施用氮肥导致的土壤矿质元素含量不平衡等问题不仅造成果园的产量降低和品质下降, 而且易造成环境污染和生产成本增加。探讨富士苹果优质的果园土壤养分比例关系, 对指导果园合理施肥、提高品质、保持果园可持续生产等具有重要理论意义和应用价值。国外果树学者在果园土壤养分对果实品质影响^[2,3], 金冠苹果叶片和果实矿质营养与果实品质的关系^[4,5], 苹果优质高产营养需求和营养供应与负载量的关系^[6-9], 不同生长季节苹果叶片、果实营养变化^[9]等方面做了大量研究; 国内果树工作者在果园土壤养分含

量与果实品质的关系方面做了大量的工作, 分别进行了陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查^[10], 山东省苹果园果实品质指标、叶片营养与土壤营养元素的相关性分析^[11], 山东苹果不同产量水平氮磷钾营养特点^[1], 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系^[12], 太行山片麻岩区新垦苹果园土壤营养与果实品质的关系^[13], 山西省中南部苹果生产优势区果园土壤营养、植株营养现状及分析^[14], 苹果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及优化方案^[15], 北京苹果园土壤理化性状和果实品质评价分析^[16], 北京昌平苹果园土壤养分、pH 与果实矿质营养的多元分析^[17], 国光苹果丰产优质土壤营养含量和比例优化方案^[9]等研究工作, 这为苹果园合理施肥、提高产量和增加品质起到了重要的作用。前人的研究仅局限于土壤养分状态的评价、土壤养分对果实品质影响的相关分析及国光苹果优质的土壤养分比例优化方案; 由于果树对不同营养成分的吸收利用受营养成分间的协同与拮抗作用影响, 果园土壤养分的比例关系对产量、品质的影响比养分含量更重要, 关于富士苹果园土壤养分比例

对果实品质的影响及土壤养分比例优化方案尚不明确。本研究通过对成龄富士苹果园土壤养分和果实品质的调查,应用典型相关分析、回归分析和线性规划等方法,定量化探讨富士苹果果实品质优质的土壤养分最佳比例优化方案,为苹果优质丰产的土壤养分调节、配方施肥等提供理论依据和指导性方案。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料及处理

2008年6月~2009年11月间,在北京昌平区选择果园产量稳定在 $37.5\sim 45.0\text{ t/hm}^2$ 、果园面积 0.6 hm^2 以上、连续3年在北京市果品评选中获奖的苹果园34个,主栽品种为宫藤富士(*Malus domestica* Borkh CV. Red Fuji),砧木为八楞海棠(*M. micromalus* Makino),王林为授粉品种,树龄15~20年生,株行距为 $3\text{ m}\times 5\text{ m}$,苹果园0~40 cm土层的土壤容重为 $1.16\sim 1.65\text{ g/cm}^3$ 、孔隙度为 $0.37\%\sim 0.66\%$ 、pH值为 $6.45\sim 7.85$;每年6~8月间,在每个果园随机选取3~5个取样小区,每个小区选择3株树,分别在每株树冠外缘东、南、西、北4个方位垂直向内50 cm处用土钻采集0~40 cm土层的土壤,弃去植物残体后过2 mm筛,把每个取样小区的土样混合均匀,室内风干用于分析土壤养分;每年11月上旬果实成熟期,分别在土壤取样树的树冠东南方位取5个果实,每个果园共取果实45个左右,带回实验室用于分析果实品质。

2.2. 测定项目

用百分之一天平称量单果质量,GY-1型果实硬度计测量果实硬度,PR-100型数字糖度计测定可溶性固形物含量,用 0.1 mol/L NaOH 中和滴定法测定可滴定酸含量;风干后的土壤分别用碱解扩散法测定碱解N,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效P,乙酸铵浸提-火焰光度计法测定有效K,醋酸钠浸提-原子吸收法分析有效Ca,DTPA浸提-原子吸收分光光度法分析有效Fe、Zn,沸水浸提-甲亚胺-H酸比色法分析有效B。

2.3. 数据处理

用每年的土壤养分含量数据分别计算土壤碱解N/有效P、碱解N/有效K、碱解N/有效Ca、碱解N/

有效Fe、碱解N/有效Zn、碱解N/有效B、有效P/有效K、有效P/有效Ca、有效P/有效Fe、有效P/有效Zn、有效P/有效B、有效K/有效Ca、有效K/有效Fe、有效K/有效Zn、有效K/有效B、有效Ca/有效Fe、有效Ca/有效Zn、有效Ca/有效B,应用SAS、LINDO软件统计分析苹果园土壤养分比例与果实品质的关系,并求解优化方案。

3. 结果与分析

3.1. 苹果园土壤养分比例和果实品质基本状况

苹果园土壤养分比例和富士果实品质状况如表1。碱解N/有效P、碱解N/有效K、碱解N/有效Ca、碱解N/有效Fe、碱解N/有效Zn、碱解N/有效B的平均值分别为0.59、0.48、0.051、6.17、19.23和204.53,不同果园碱解N与有效P、K、Ca、Fe、Zn和B的比例差异较大,最大值分别为最小值的5.56、7.95、4.04、7.60、10.58和3.44倍,说明不同果园土壤氮素与其它矿质元素比例存在较大差异,这可能与果园间施肥不同有关;土壤其它矿质元素的比例也有类似的趋势,如调查果园的有效K/有效Zn、有效Ca/有效Zn的最大值分别为最小值的18.76和13.47倍,而对应的果实单果质量、硬度和可溶性固形物含量的最大值为最小值的倍数分别为2.41、1.70和1.53。

3.2. 苹果园土壤养分比例与果实品质的相关性

表2是土壤养分比例因子与果实品质因素间的相关性。从表2可看出,对果实单果质量影响较大的土壤养分比例因子分别为有效P/有效B、有效Ca/有效Zn和有效P/有效Zn,其相关系数分别为0.3896、0.3256和0.3206,且均呈正相关;土壤有效P/有效B、有效Ca/有效B、有效P/有效K和碱解N/有效B对果实硬度影响较大,其中土壤有效Ca/有效B和有效P/有效K与之呈正相关,而有效P/有效B和碱解N/有效B则与之呈负相关;对果实可溶性固形物影响较大的土壤养分比例因子分别为碱解N/有效B、有效P/有效B、有效Ca/有效B和有效P/有效K,其相关系数分别为-0.4338、0.3168、-0.2813、-0.2607,提高碱解N与有效B比值会降低果实可溶性固形物含量,而提高有效P与有效B比值可以增加果实可溶性固形物含量;土壤有效P/有效Zn是影响果实可滴定酸的主要因子,

Table 1. Survey data of soil nutrient ratio and fruit qualities in apple orchards
表 1. 苹果园土壤养分比例和果实品质概况

项目 Item	土壤养分比例 Soil nutrient ratio													果实品质 Fruit qualities								
	碱解 N/ 有效 P Alkaline hydrolysis N/available P	碱解 N/ 有效 Ca Alkaline hydrolysis N/available Ca	碱解 N/ 有效 Fe Alkaline hydrolysis N/available Fe	碱解 N/ 有效 Zn Alkaline hydrolysis N/available Zn	碱解 N/ 有效 B Alkaline hydrolysis N/available B	有效 P/ 有效 K P/K	有效 P/ 有效 Ca P/Ca	有效 P/ 有效 Fe P/Fe	有效 P/ 有效 Zn P/Zn	有效 P/ 有效 B P/B	有效 K/ 有效 Ca K/Ca	有效 K/ 有效 Fe K/Fe	有效 K/ 有效 Zn K/Zn	有效 Ca/ 有效 Zn Ca/Zn	有效 Ca/ 有效 Fe Ca/Fe	有效 Ca/ 有效 B Ca/B	单果质量 Mass per fruit /g	硬度 Firmness /kg.cm ²	可溶性固 形物 Soluble solids/%	可滴定酸 Titratable acidity /%		
平均值 Mean	0.59	0.48	0.051	6.17	19.23	204.53	0.81	0.094	10.91	31.95	365.56	123.04	13.57	42.62	475.11	128.70	451.10	4421.60	247.09	8.43	14.97	0.285
最小值 Minimum	0.27	0.20	0.024	2.01	4.84	101.89	0.46	0.034	3.25	11.11	135.00	41.16	5.99	5.63	155.94	51.60	140.40	1511.10	161.01	6.43	11.63	0.219
最大值 Maximum	1.50	1.59	0.097	15.28	51.21	350.77	1.43	0.190	28.27	67.51	671.05	233.46	28.94	105.67	823.08	344.70	1891.70	9606.10	387.28	10.93	17.81	0.394
标准差 STD	0.28	0.29	0.020	3.36	10.55	58.30	0.22	0.041	5.60	14.01	133.21	58.14	6.09	20.69	155.65	66.00	359.70	1851.50	44.715	0.858	1.367	0.0452

Table 2. Correlation coefficient between soil nutrient ratio and fruit qualities
表 2. 土壤养分比例与果实品质间的相关系数

项目 Item	土壤养分比例 Soil nutrient ratio													果实品质 Fruit qualities									
	碱解 N/ 有效 P Alkaline hydrolysis N/available P	碱解 N/ 有效 Ca Alkaline hydrolysis N/available Ca	碱解 N/ 有效 Fe Alkaline hydrolysis N/available Fe	碱解 N/ 有效 Zn Alkaline hydrolysis N/available Zn	碱解 N/ 有效 B Alkaline hydrolysis N/available B	有效 P/ 有效 K P/K	有效 P/ 有效 Ca P/Ca	有效 P/ 有效 Fe P/Fe	有效 P/ 有效 Zn P/Zn	有效 P/ 有效 B P/B	有效 K/ 有效 Ca K/Ca	有效 K/ 有效 Fe K/Fe	有效 K/ 有效 Zn K/Zn	有效 Ca/ 有效 Zn Ca/Zn	有效 Ca/ 有效 Fe Ca/Fe	有效 Ca/ 有效 B Ca/B	单果质量 Mass per fruit /g	硬度 Firmness /kg.cm ²	可溶性固 形物 Soluble solids/%	可滴定酸 Titratable acidity /%			
平均值 Mean	-0.1652	-0.1393	-0.0392	-0.1470	-0.0443	0.0546	-0.0423	0.1959	-0.1504	-0.2919	0.0722	-0.2461	0.0741	-0.1982	-0.4000	-0.1072	0.2433	-0.1027	-0.2248	0.1234	-0.2123	-0.2790	-0.0613
最小值 Minimum	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350
最大值 Maximum	-0.1652	-0.1393	-0.0392	-0.1470	-0.0443	0.0546	-0.0423	0.1959	-0.1504	-0.2919	0.0722	-0.2461	0.0741	-0.1982	-0.4000	-0.1072	0.2433	-0.1027	-0.2248	0.1234	-0.2123	-0.2790	-0.0613
标准差 STD	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350	0.1350

且与之呈负相关。从表 2 也可看出, 土壤中不同营养元素的比例对果实品质影响的重要程度各异, 用简单的相关分析只能说明一些现象, 需要借助多元统计分析方法进一步探讨其相关性。

3.3. 影响果实品质的土壤养分比例因子筛选和回归方程建立

果园土壤养分比例因子和果实品质因素间的关系错综复杂, 本研究应用典型相关分析的方法, 以碱解 N/有效 P (x_1)、碱解 N/有效 K (x_2)、碱解 N/有效 Ca (x_3)、碱解 N/有效 Fe (x_4)、碱解 N/有效 Zn (x_5)、碱解 N/有效 B (x_6)、有效 P/有效 K (x_7)、有效 P/有效 Ca (x_8)、有效 P/有效 Fe (x_9)、有效 P/有效 Zn (x_{10})、有效 P/有效 B (x_{11})、有效 K/有效 Ca (x_{12})、有效 K/有效 Fe (x_{13})、有效 K/有效 Zn (x_{14})、有效 K/有效 B (x_{15})、有效 Ca/有效 Fe (x_{16})、有效 Ca/有效 Zn (x_{17})和有效 Ca/有效 B (x_{18})为一个正态总体, 果实单果质量(y_1)、果实硬度(y_2)、果实可溶性固形物(y_3)和可滴定酸(y_4)为另一总体, 依据典型相关系数的大小, 结合专业知识和统计分析特点等, 筛选出影响果实品质因素的土壤养分比例因子, 并建立了果实品质因素与主要土壤养分比例因子的回归方程(表 3)。从表 3 的方程可看出, 对富士苹果单果质量影响较大的土壤养分比例因子分别为

碱解 N/有效 P (x_1)、碱解 N/有效 Ca (x_3)和有效 P/有效 Ca (x_8), 其中碱解 N/有效 P (x_1)和有效 P/有效 Ca (x_8)比例与果实单果质量呈正相关, 而碱解 N/有效 Ca (x_3)与之呈负相关, 表明土壤养分中碱解 N、有效 P 和有效 Ca 的相互比例关系是决定果实单果质量的关键因子; 对果实硬度影响较大的土壤养分比例因子分别为碱解 N/有效 Ca (x_3)、有效 P/有效 Ca (x_8)、有效 P/有效 K (x_7)和碱解 N/有效 K (x_2), 碱解 N 与有效 Ca 的比例与果实硬度呈负相关, 结合果实单果质量分析, 果实个头增加, 果实硬度就会降低; 碱解 N/有效 Fe (x_4)、碱解 N/有效 Zn (x_5)、碱解 N/有效 B (x_6)、有效 K/有效 Fe (x_{13})、有效 Ca/有效 Fe (x_{16})和有效 Ca/有效 Zn (x_{17})均影响果实可溶性固形物含量, 其中以碱解 N/有效 Fe (x_4)影响程度最大, 且与之呈负相关, 而有效 K/有效 Fe (x_{13})则与之呈正相关; 同理, 可以找出影响果实可滴定酸含量的土壤养分比例因子。

3.4. 果实品质优质的土壤养分比例优化方案

从上面的果园土壤养分比例因子与果实品质因素的相关性及回归方程可看出, 土壤养分比例因子与果实品质因素间的关系较复杂, 果实品质某一指标的提高, 可能导致另一指标的降低。为进一步探讨果实品质优质的土壤养分比例的适宜范围, 以果实单果质

Table 3. Selection of the factors of soil nutrient ratio affecting fruit qualities and establishment of regression equation
表 3. 影响果实品质的主要土壤养分比例因子筛选和回归方程建立

果实品质(y) Fruit qualities	影响果实品质的土壤养分比例因子(x) The proportion soil nutrient factors affecting fruit qualities	回归方程 Regression equations	方程 F 值 F value of equations	Pr > F
y_1 单果质量 Mass per fruit	$x_1; x_3; x_8; x_{11}; x_{14}$	$y_1 = 135.1996 + 45.8845x_1 - 276.0179x_3 + 351.165x_8 + 0.1156x_{11} + 0.6287x_{14}$	2.06	0.1009
y_2 果实硬度 Firmness	$x_2; x_3; x_7; x_8; x_{10}; x_{12}; x_{13}; x_{16}; x_{18}$	$y_2 = 10.9504 - 1.6721x_2 + 8.9299x_3 - 1.6959x_7 - 6.8899x_8 - 0.00304x_{10} + 0.00687x_{12} - 0.09967x_{13} + 0.01424x_{16} - 0.0003042x_{18}$	3.25	0.0101
y_3 可溶性固形物 Soluble solids	$x_4; x_5; x_6; x_{13}; x_{16}; x_{17}$	$y_3 = 15.7349 - 0.3882x_4 + 0.0992x_5 - 0.0085x_6 + 0.0618x_{13} + 0.01561x_{16} - 0.00299x_{17}$	2.49	0.0808
y_4 可滴定酸 Titratable acidity	$x_5; x_6; x_9; x_{11}; x_{13}; x_{15}; x_{18}$	$y_4 = 0.3118 - 0.00196x_5 + 0.0002438x_6 + 0.00353x_9 + 0.000313x_{11} - 0.0047x_{13} + 0.000245x_{15} - 0.00000362x_{18}$	1.97	0.0986

注: 1) x_1 碱解 N/有效 P; x_2 碱解 N/有效 K; x_3 碱解 N/有效 Ca; x_4 碱解 N/有效 Fe; x_5 碱解 N/有效 Zn; x_6 碱解 N/有效 B; x_7 有效 P/有效 K; x_8 有效 P/有效 Ca; x_9 有效 P/有效 Fe; x_{10} 有效 P/有效 Zn; x_{11} 有效 P/有效 B; x_{12} 有效 K/有效 Ca; x_{13} 有效 K/有效 Fe; x_{14} 有效 K/有效 Zn; x_{15} 有效 K/有效 B; x_{16} 有效 Ca/有效 Fe; x_{17} 有效 Ca/有效 Zn; x_{18} 有效 Ca/有效 B。2) 尽管应用典型相关分析筛选出影响果实品质因素的主要土壤养分比例因子, 在建立方程时, 为了确保方程的有效性, 选择了方程在 10%显著水平的影响因子。

量最大($y_{\max 1}$)为目标函数(A), 而果实硬度(y_2)、可溶性固形物(y_3)、果实可滴定酸(y_4)和土壤养分比例碱解 N/有效 P (x_1)、碱解 N/有效 K (x_2)、碱解 N/有效 Ca (x_3)、碱解 N/有效 Fe (x_4)、碱解 N/有效 Zn (x_5)、碱解 N/有效 B (x_6)、有效 P/有效 K (x_7)、有效 P/有效 Ca (x_8)、有效 P/有效 Fe (x_9)、有效 P/有效 Zn (x_{10})、有效 P/有效 B (x_{11})、有效 K/有效 Ca (x_{12})、有效 K/有效 Fe (x_{13})、有效 K/有效 Zn (x_{14})、有效 K/有效 B (x_{15})、有效 Ca/有效 Fe (x_{16})、有效 Ca/有效 Zn (x_{17})和有效 Ca/有效 B (x_{18})为约束条件(B), 其中方程中土壤养分比例的约束条件依据调查的数据资料, 同时参考国内外土壤养分适宜水平等给出约束范围; 果实品质因素的约束条件依据调查的数据资料和国家鲜苹果标准^[18]中的富士苹果品质指标, 建立了求解果实单果质量最大的线性规划方程组:

$$y_{\max 1} = 135.1996 + 45.8845x_1 - 276.0179x_3 + 351.165x_8 + 0.1156x_{11} + 0.6287x_{14} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 10.9504 - 1.6721x_2 + 8.9299x_3 - 1.6959x_7 - 6.8899x_8 - 0.00304x_{10} + 0.00687x_{12} - 0.09967x_{13} + 0.01424x_{16} - 0.0003042x_{18} \geq 8.8 \\ 15.7349 - 0.3882x_4 + 0.0992x_5 - 0.0085x_6 + 0.0618x_{13} + 0.01561x_{16} - 0.00299x_{17} \geq 14.5 \\ 0.3118 - 0.00196x_5 + 0.0002438x_6 + 0.00353x_9 + 0.000313x_{11} - 0.0047x_{13} + 0.000245x_{15} - 0.00000362x_{18} \leq 0.45 \\ 0.2 \leq x_1 \leq 1.9, \quad 0.18 \leq x_2 \leq 2, \quad 0.02 \leq x_3 \leq 0.115 \\ 1.6 \leq x_4 \leq 18, \quad 4 \leq x_5 \leq 55, \quad 80 \leq x_6 \leq 420 \\ 0.4 \leq x_7 \leq 1.6, \quad 0.028 \leq x_8 \leq 0.22, \quad 3 \leq x_9 \leq 30 \\ 9 \leq x_{10} \leq 80, \quad 100 \leq x_{11} \leq 600, \quad 35 \leq x_{12} \leq 280 \\ 5.6 \leq x_{13} \leq 33, \quad 5.2 \leq x_{14} \leq 125, \quad 125 \leq x_{15} \leq 980 \\ 50 \leq x_{16} \leq 500, \quad 120 \leq x_{17} \leq 2100, \quad 1300 \leq x_{18} \leq 11,500 \end{cases} \quad (2)$$

应用相同的方法, 可建立求解果实硬度最大($y_{\max 2}$)、可溶性固形物最大($y_{\max 3}$)和果实可滴定酸最大($y_{\max 4}$)的线性规划方程, 其中果实单果质量的约束条件为 300 g。通过求解, 获得了富士果实品质优质的土壤养分比例因子的最适范围(表 4)。从表 4 可看出, 碱解 N/有效 P 为 1.9、碱解 N/有效 K 为 0.18、碱解 N/有效 Ca 为 0.02~0.115、碱解 N/有效 Fe 为 1.6、碱

解 N/有效 Zn 为 4.0~55、碱解 N/有效 B 为 80~420、有效 P/有效 K 为 0.4、有效 P/有效 Ca 为 0.028~0.22、有效 P/有效 Fe 为 3~30、有效 P/有效 Zn 为 9~80、有效 P/有效 B 为 600、有效 K/有效 Ca 为 280、有效 K/有效 Fe 为 5.6~33、有效 K/有效 Zn 为 125、有效 K/有效 B 为 125~980、有效 Ca/有效 Fe 为 500、有效 Ca/有效 Zn 为 120 和有效 Ca/有效 B 为 1300~11,500 时, 其果实品质指标的理论优化结果为: 单果质量为 442.06 g, 果实硬度为 11.87 kg/cm², 可溶性固形物含量为 29.37%, 可滴定酸含量为 0.51%。

4. 讨论

4.1. 果园土壤养分比例的差异及与果实品质的相关关系

在苹果园土壤管理中, 合理施肥不仅能提高产量和增加品质, 还可提高肥料利用效率, 降低不合理施肥造成的果树缺素或毒害作用及污染环境等问题。本研究发现不同果园间碱解 N 与有效 P、K、Ca、Fe、Zn 和 B 比例的最大值分别为最小值的 5.56、7.95、4.04、7.60、10.58 和 3.44 倍; 有效 K/有效 Zn、有效 Ca/有效 Zn 的最大值分别为最小值的 18.76 和 13.47 倍, 说明了不同果园间土壤养分比例存在较大差异。土壤养分比例与果实品质因素的相关性分析, 土壤有效 Ca/有效 B、有效 P/有效 K 与果实硬度呈正相关, 而有效 P/有效 B、碱解 N/有效 B 则与之呈负相关; 提高碱解 N 与有效 B 比值会降低果实可溶性固形物含量, 而提高有效 P 与有效 B 比值可以增加果实可溶性固形物含量; 土壤有效 P/有效 Zn 是影响果实可滴定酸的主要因子, 且与之呈负相关。Fallahi^[5]研究认为, 在土壤矿质养分中, N、K、P、Ca 和 B 与果实品质和生理病害的相关性最强, N 含量高会降低果实硬度和可溶性固形物含量; 魏钦平^[14]研究认为, 土壤有效 P/有效 K 与果实着色和可溶性固形物含量呈正相关, 表明了土壤养分含量和比例关系对果实品质因素的影响比较复杂, 仅用简单的相关分析不够全面, 需要应用多元分析方法。

4.2. 富士苹果优质的土壤养分比例优化方案

本研究应用典型相关分析的方法, 筛选出影响果实品质因素的土壤养分比例因子, 并建立了果实品质

Table 4. The optimum proposal of soil nutrient ratio and good fruit quality
表 4. 土壤养分比例与果实品质优化方案

项目 Item	单果质量 Mass per fruit/g	硬度 Firmness/kg·cm ⁻²	可溶性固形物 Soluble solids/%	可滴定酸 Titratable acidity/%	取值范围 Range of value
x ₁ 碱解N/有效P Alkaline hydrolysable N/Available P	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
x ₂ 碱解N/有效K Alkaline hydrolysable N/Available K	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
x ₃ 碱解N/有效Ca Alkaline hydrolysable N/Available Ca	0.02	0.115	0.115	0.115	0.02~0.115
x ₄ 碱解N/有效Fe Alkaline hydrolysable N/Available Fe	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
x ₅ 碱解N/有效Zn Alkaline hydrolysable N/Available Zn	55	55	55	4	4~55
x ₆ 碱解N/有效B Alkaline hydrolysable N/Available B	80	80	80	420	80~420
x ₇ 有效P/有效K Available P/K	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
x ₈ 有效P/有效Ca Available P/Ca	0.22	0.028	0.22	0.028	0.028~0.22
x ₉ 有效P/有效Fe Available P/Fe	3	3	3	30	3~30
x ₁₀ 有效P/有效Zn Available P/Zn	9	9	9	80	9~80
x ₁₁ 有效P/有效B Available P/B	600	600	600	600	600
x ₁₂ 有效K/有效Ca Available K/Ca	280	280	280	280	280
x ₁₃ 有效K/有效Fe Available K/Fe	5.6	5.6	33	5.6	5.6~33
x ₁₄ 有效K/有效Zn Available K/Zn	125	125	125	125	125
x ₁₅ 有效K/有效B Available K/B	125	125	125	980	125~980
x ₁₆ 有效Ca/有效Fe Available Ca/Fe	500	500	500	500	500
x ₁₇ 有效Ca/有效Zn Available Ca/Zn	120	120	120	120	120
x ₁₈ 有效Ca/有效B Available Ca/B	1300	1300	11500	1300	1300~11,500
y 优化值 Optimized values	442.06	11.87	29.37	0.51	-

因素与主要土壤养分比例因子的回归方程, 线性规划求解出果实单果质量 ≥ 300 g、果实硬度 ≥ 8.8 kg/cm²、可溶性固形物含量 $\geq 14.5\%$ 和可滴定酸含量 $\leq 0.45\%$ 时的土壤养分比例的优化方案为: 碱解 N/有效 P 为 1.9、碱解 N/有效 K 为 0.18、碱解 N/有效 Ca 为 0.02~0.115、碱解 N/有效 Fe 为 1.6、碱解 N/有效 Zn 为 4.0~55、碱解 N/有效 B 为 80~420、有效 P/有效 K 为 0.4、有效 P/有效 Ca 为 0.028~0.22、有效 P/有效 Fe 为 3~30、有效 P/有效 Zn 为 9~80、有效 P/有效 B 为 600、有效 K/有效 Ca 为 280、有效 K/有效 Fe 为 5.6~33、有效 K/有效 Zn 为 125、有效 K/有效 B 为 125~980、有效 Ca/有效 Fe 为 500、有效 Ca/有效 Zn 为 120 和有效 Ca/有效 B 为 1300~11,500。彭富田和姜远茂^[1]研究认为, 山东高产苹果园(亩产 > 4000 kg)的土壤碱解 N/有效 P 为 1.21~5.89、碱解 N/有效 K 为 0.36~1.35、有效 P/有效 K 为 0.1~0.67; 王海云等^[9]研究山东省苹果园土壤碱解 N/有效 P 为 1.83, 碱解 N/有效 K 为 0.61、有效 P/有效 K 为 0.33; 魏钦平^[14]研究认为, 优质丰产园的土壤有效 P/有效 K 为 0.48。除土壤碱解 N/有效 K 略低外, 其它比例均与前人的研究结果一致。表明了

在果园土壤养分管理中, 研究土壤养分比例关系, 对指导果园合理配方施肥具有重要的指导意义。

5. 结论

1) 北京地区苹果园间土壤养分比例差异较大, 碱解 N 与有效 P、K、Ca、Fe、Zn 和 B 的比例最大值分别为最小值的 5.56、7.95、4.04、7.60、10.58 和 3.44 倍; 有效 K/有效 Zn、有效 Ca/有效 Zn 的最大值分别为最小值的 18.76 和 13.47 倍, 调整果园土壤养分比例关系对提高养分利用效率和改善果实品质具有重要作用。

2) 土壤养分中碱解 N、有效 P 和有效 Ca 的相互比例关系是决定果实单果质量的关键因子, 碱解 N/有效 P、有效 P/有效 Ca 与之呈正相关, 而碱解 N/有效 Ca 则与之呈负相关; 碱解 N/有效 Ca、碱解 N/有效 K 与果实硬度呈负相关; 碱解 N/有效 Fe 对果实可溶性固形物含量影响最大, 并与之呈负相关, 而有效 K/有效 Fe 则与之呈正相关, 降低土壤碱解 N、提高有效 K、稳定土壤有效 Fe 含量是提高果实可溶性固形物含量的关键。

3) 北京地区富士苹果优质的土壤养分比例优化方案为: 碱解 N/有效 P 为 1.9、碱解 N/有效 K 为 0.18、碱解 N/有效 Ca 为 0.02~0.115、碱解 N/有效 Fe 为 1.6、碱解 N/有效 Zn 为 4.0~55、碱解 N/有效 B 为 80~420、有效 P/有效 K 为 0.4、有效 P/有效 Ca 为 0.028~0.22、有效 P/有效 Fe 为 3~30、有效 P/有效 Zn 为 9~80、有效 P/有效 B 为 600、有效 K/有效 Ca 为 280、有效 K/有效 Fe 为 5.6~33、有效 K/有效 Zn 为 125、有效 K/有效 B 为 125~980、有效 Ca/有效 Fe 为 500、有效 Ca/有效 Zn 为 120 和有效 Ca/有效 B 为 1300~11,500。

参考文献 (References)

- [1] 彭福田, 姜远茂. 不同产量水平苹果园氮磷钾营养特点研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(2): 361-367.
- [2] D. Neilsen, G. Neilsen. Nutritional effects on fruit quality for apple trees. *New York Fruit Quarterly*, 2009, 17(3): 21-24.
- [3] R. Dris, R. Niskanen and E. Fallahi. Nitrogen and calcium nutrition and fruit quality of commercial apple cultivars grown in Finland. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(11): 2389-2402.
- [4] R. Dris, R. Niskanen and E. Fallahi. Relationships between leaf and fruit minerals and fruit quality attributes of apples grown under northern conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(12): 1839-1851.
- [5] E. Fallahi, R. S. Brenda. Interrelations among leaf and fruit mineral nutrients and fruit quality in "Delicious" apples. *Journal of Tree Fruit Production*, 1996, 1(1): 15-25.
- [6] L. Cheng, R. Rada. Accumulation of micronutrients and nitrogen demand-supply relationship of "Gala"/M.26 trees grown in sand culture. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 2009, 134(1): 3-13.
- [7] E. Fallahi, W. M. Colt and B. Fallahi. Optimum ranges of leaf nitrogen for yield, fruit quality, and photosynthesis in "BC-2 Fuji" apple. *Journal of American Pomology Society*, 2001, 55(2): 68-75.
- [8] I. B. Ferguson, C. B. Watkins. Crop load affects mineral concentrations and incidence of bitter pit in Orange Pippin apple fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1992, 117: 373-376.
- [9] 王海云, 姜远茂, 彭福田, 赵凤霞, 隋静, 刘丙花. 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2008, 39(1): 31-38.
- [10] 刘子龙, 张广军, 赵政阳, 梁俊. 陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 50-53.
- [11] 路超, 薛晓敏, 王翠玲, 安国宁, 王金政. 山东省苹果园果实品质指标、叶片营养与土壤营养元素的相关性分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(25): 168-172.
- [12] M. Siddique, M. T. Siddique, S. Ali and A. S. Javed. Macronutrient assessment in apple growing region of Punjab. *Soil & Environ*, 2009, 28(2): 184-192.
- [13] 李保国, 齐国辉, 郭素平, 李惠卓, 张林平. 太行山片麻岩区新垦苹果园土壤营养与果实品质的关系研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(3): 17-20.
- [14] 魏钦平. 苹果丰产优质土壤营养含量和比例优化方案研究[J]. 山东农业大学学报, 1993, 24(1): 7-13.
- [15] 武怀庆. 山西省中南部苹果生产优势区果园土壤营养、植株营养现状及分析[J]. 山西农业大学学报, 2005, 25(4): 361-364.
- [16] 张强, 魏钦平, 刘惠平, 蒋瑞山, 刘旭东, 王小伟. 苹果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及优化方案[J]. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1654-1661.
- [17] 张强, 魏钦平, 刘旭东, 刘惠平, 蒋瑞山, 王小伟. 北京昌平苹果园土壤养分、pH 与果实矿质营养的多元分析[J]. 果树学报, 2011, 28(3): 377-383.
- [18] GB/T 10651-2008, 鲜苹果[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.