



李泰, 卢士军, 黄家章, 孙君茂. 土壤养分对‘富士’苹果品质的影响——基于3省6县苹果园调查[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(11): 30-38.
LI Tai, LU Shijun, HUANG Jiazhang, SUN Junmao. Effects of soil nutrients on the quality of ‘Fuji’ apple: Based on a survey of apple orchards in 6 counties in 3 provinces[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11): 30-38.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.11.04

土壤养分对‘富士’苹果品质的影响 ——基于3省6县苹果园调查

李泰 卢士军 黄家章 孙君茂*

(农业农村部食物与营养发展研究所, 北京 100081)

摘要 为探究不同土壤养分对‘富士’苹果品质的影响,以山东省、山西省和陕西省46个成熟果园的‘富士’苹果及土壤为材料,采集并测定7项‘富士’苹果品质指标和6项果园土壤养分因子指标,采用相关性分析、偏最小二乘法和多元线性回归等方法,筛选影响‘富士’苹果品质的最主要土壤养分因子,并建立土壤养分因子与‘富士’苹果品质回归方程。结果表明:1)土壤碱解氮含量与着色面积、可溶性固形物含量和固酸比呈显著正相关;有效磷含量与果实硬度和固酸比呈显著正相关;有效铁含量与着色面积、可溶性固形物含量、固酸比和果形指数呈显著正相关;pH与着色面积、可溶性固形物和固酸比呈显著负相关,与可滴定酸含量呈极显著正相关。2)影响苹果品质的土壤养分因子(影响程度由大到小)分别为:单果质量,pH和有效钙;果形指数,有效铁和pH;着色面积,有效铁、pH和碱解氮;果实硬度,有效磷、速效钾和pH;可溶性固形物含量,有效铁、pH和碱解氮影响;可滴定酸含量,pH、有效铁和碱解氮;固酸比,pH、有效铁和碱解氮影响。在此基础上构建了‘富士’苹果品质回归方程,依据土壤养分因子回归系数可得出对果实品质的正负效应及影响程度。

关键词 ‘富士’苹果; 果实品质; 土壤养分; pH; 偏最小二乘回归

中图分类号 S661.2

文章编号 1007-4333(2024)11-0030-09

文献标志码 A

Effects of soil nutrients on the quality of ‘Fuji’ apple: Based on a survey of apple orchards in 6 counties in 3 provinces

LI Tai, LU Shijun, HUANG Jiazhang, SUN Junmao*

(Institute of Food and Nutrition Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract To study the effects of different soil nutrients on the quality of ‘Fuji’ apples, seven quality indicators of ‘Fuji’ apple and six indicators of soil nutrient factors in orchards were selected and measured by taking ‘Fuji’ apples and soils from 46 mature orchards in Shandong, Shanxi and Shaanxi provinces as study materials. The correlation analysis, partial least squares and multiple linear regression were used to screen the most important soil nutrient factors affecting the quality of ‘Fuji’ apples and establish a regression equation between soil nutrient factors and the quality of ‘Fuji’ apples. The results showed that: 1) Soil alkaline dissolved nitrogen content was significantly and positively correlated with coloring area, soluble solids content and acid-fixing ratio; Effective phosphorus content was significantly and positively correlated with fruit firmness and acid-fixing ratio; effective iron content was significantly and positively correlated with coloring area, soluble solids content, acid-fixing ratio and fruit shape index; pH was

收稿日期: 2024-01-03

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(Y2023ZK18)

第一作者: 李泰(ORCID:0000-0002-8172-8719), 博士研究生, E-mail: litai1010@163.com

通讯作者: 孙君茂(ORCID:0009-0001-8061-9465), 研究员, 博士生导师, 主要从事食物营养经济学与农产品营养标准体系研究, E-mail: sunjunmao@caas.cn

significantly and negatively correlated with coloring area, soluble solids and acid-fixing ratio, and highly and significantly correlated with titratable acid content. significant positive correlation with titratable acid content. 2) The soil nutrient factors affecting apple quality (in descending order of impact) are as follows: Single fruit quality, pH and available calcium; Fruit shape index, available iron and pH; Coloring area, available iron, pH and alkali-hydrolyzed nitrogen; Fruit firmness, available phosphorus, available potassium and pH; Soluble solid content, available iron, pH and alkali-hydrolyzed nitrogen; Titratable acid content, pH, available iron and alkali-hydrolyzed nitrogen; Effects of solid acid ratio, pH, available iron and alkali-hydrolyzed nitrogen. On this basis, the regression equation of ‘Fuji’ apple quality was established, and the positive and negative effects on fruit quality and the degree of influence could be obtained according to the regression coefficient of soil nutrient factors.

Keywords ‘Fuji’ apple; fruit quality; soil nutrients; pH; partial least squares regression

‘富士’苹果是我国最主要的苹果品种,产量占我国苹果总产量的 72.7%^[1]。我国‘富士’苹果主产区分别为渤海湾产区(包括鲁、冀、辽、津、京),黄土高原产区(包括陕、甘、晋、宁、青),黄河故道产区(包括豫、皖、苏),西南冷凉高地产区(包括川、渝、云、贵、藏),特色产区(包括内蒙古、黑、吉、鄂、新)^[2]。不同主产区之间由于成土母质、土壤类型、生物活动、气候变化、人类耕作和时间迁移等因素影响,造成土壤养分含量存在很大差异^[3-4],直接影响了苹果的产量和果实品质。因此,探讨土壤养分对‘富士’苹果品质的定量关系,对提高果实品质、指导果园合理施肥和减少果实生理病害有重要的理论意义和应用价值。

已有研究表明,不同‘富士’苹果产区之间土壤养分存在显著差异,土壤中有有机质含量、氮磷钾等矿质元素含量、pH 等均会对苹果品质产生重要影响^[3,5-9]。Ramdane Dris 等^[10]研究土壤中氮含量与果实直径呈正相关。Bennewitz 等^[11]研究显示土壤中的 Ca、Mg 和 K 含量增加会提升果实品质和质量。土壤养分含量与果实品质的相关性研究表明,苹果的可溶性固形物含量受到土壤中有有机质、总氮、有效钾、有效钙和有效铁的含量影响。可滴定酸含量受到土壤碱解氮、速效钾、铁、锌和硼的含量是其主要影响因素^[3]。土壤有机质,氮磷钾水平影响果形指数、可溶性固形物含量、固酸比,土壤有机质含量与果实固酸比呈正相关^[5]。‘富士’苹果品质的研究多数集中在对某一地区或局部区域的土壤养分调查和果实品质的相关性分析,关于不同区域土壤养分对‘富士’苹果品质影响的主要因子筛选的研究较少,存在研究区域较小且经常忽略土壤养分之间共线性的问题。

基于此,本研究拟对不同主产区‘富士’苹果品

质及果园土壤养分进行调查,应用偏最小二乘法筛选影响‘富士’苹果品质的主要土壤养分因子,以此建立土壤养分与‘富士’苹果品质回归方程,以期为量化土壤养分对‘富士’苹果品质影响、果园合理施肥、提高‘富士’苹果品质提供依据和方案。

1 材料与方法

1.1 试验材料

根据中国苹果优势产区生产布局、主产区地理位置、气候条件、产业发展以及各地方实际生产情况,选择山东省栖霞市和蓬莱区,陕西省白水縣和洛川县,山西省万荣县和临猗县,累计 6 个苹果主产区。各县(市、区)选择果园面积 0.6 hm² 以上,连续 3 年稳产在 45 t/hm² 以上,果树树龄为 5~10 年,人工疏花疏果、果实套双层纸袋,管理水平较好的‘富士’果园≥5 个,累计果园 46 个。主产区(市、区)位置及试验果园数量见表 1。

1.2 试验方法

1.2.1 样品采集及分析

2020 年 10 月—11 月对果品和土样进行采样。每个果园随机选择 3 个采样小区,每个采样小区选择 1 棵苹果树,分别在离果树 1.5 m 东、西、南、北 4 个方位随机摘取 1 或 2 个果实样品,每个果园采集≥12 个苹果样品,取下后 8 h 内贮藏在 4℃ 的保鲜盒中。苹果随机分为 3 份,分别用于苹果外观品质检测、理化品质检测和复测。土壤采样在果品取样树东、西、南、北 4 个方位距树干 50 cm 处,用土钻采集 0~40 cm 土层土样,将每棵树周围土样采集去除杂质后混合,带回实验室自然风干,过 2 mm 孔筛。土壤样品分为 2 份,分别用于土壤养分检测和样品备存。

1.2.2 苹果样品品质指标选择及检测

样品取回后,天平称量单果质量,游标卡尺测

表1 主产区(市、区)位置及试验果园数量

Table 1 Location of main producing counties (cities and districts) and number of experimental orchards

省份 Provinces	县(市、区) County	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	年降水量/mm Annual precipitation	年均温度/℃ Mean annual temperature	果园数量 Apple orchard
山东 Shandong	栖霞市 Qixia	120°33'~121°15'	37°05'~37°32'	149.00	743.00	11.40	6
	蓬莱区 Penglai	120°35'~121°09'	37°25'~37°50'	18.00	606.20	11.70	10
陕西 Shaanxi	洛川县 Luochuan	109°13'~109°45'	35°26'~36°04'	1 148.00	622.00	9.20	5
	白水縣 Baishui	109°16'~109°45'	35°40'~35°27'	785.00	577.80	11.40	10
山西 Shanxi	万荣县 Wanrong	110°25'~110°59'	35°13'~35°31'	596.00	500.00	11.90	6
	临猗县 Linyi	110°17'~110°54'	34°58'~35°18'	400.00	508.70	13.50	9

量果实直径/纵径并计算果形指数,目测法测量着色面积,用果实硬度计(GY-1型,上海沪沁仪器设备有限公司)测定果实硬度,糖度计(阿贝折射仪WAY-2W,上海仪电物理光学仪器有限公司)测量可溶性固形物含量,用NaOH(0.1 mol/L)中和滴定法测定可滴定酸含量,并计算固酸比^[12]。

1.2.3 土壤样品选择及检测

碱解氮用碱解扩散法测量;有效磷用酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测量;速效钾用乙酸铵浸提剂-火焰光度计法测量;有效钙和有效铁用DTPA浸提-原子吸收分光光度法测量;pH用电位计法测量^[13]。

1.2.4 多元统计分析

1)多重共线性诊断。多重共线性(Multicollinearity)是指进行多元线性回归分析时,自变量之间有着高度的相关性,且自变量之间有近似地线性关系。若其中某个自变量可以近似的用其他自变量的线性函数进行描述,会造成模型方程的严重不稳定,若不考虑自变量之间的多重共线性,盲目使用回归分析不仅会使回归方程得不到想要的结果,反而会导致错误的结论。因此在多变量线性回归分析中,需要对自变量进行多重共线性诊断^[14-15]。一般来说,多重共线性诊断可以通过分析特征根中的条件指数和分解比例判定,条件指数<30为弱相关,条件指数≥30~100为中等相关,条件指数>100为强相关,且2个或多个的估计回归系数有较大的方差分解比,一般大于0.5时,可认为自变量间存在共线性。应用SPSS24.0分析土壤养分因子之间的多重共线性。

2)偏最小二乘回归。为筛选主要影响苹果品质

的土壤养分因素,对土壤养分和‘富士’苹果品质因子进行偏最小二乘回归分析,通过分析变量投影重要性(Variable importance projection, VIP),选择对果实品质产生重要影响的土壤养分因子^[16-17],投影重要性VIP值表示模型上自变量的重要性。当VIP<0.6时,说明自变量对模型的贡献很小,可以消除。当VIP=1.0时,说明自变量对模型具有相同的解释作用。当VIP>1.0时,意味着自变量对模型的影响很大。根据偏最小二乘法选取的主要土壤养分因子,构建苹果品质与土壤养分因子的回归方程,应用SIMCA 14.1进行偏最小二乘回归分析^[4]。

2 结果与分析

2.1 不同产区苹果品质及土壤养分

采用SPSS 24.0对不同产区‘富士’苹果各项品质指标进行差异性分析,结果见表2。单果质量平均值为256.62 g,山西‘富士’苹果单果质量显著高于陕西和山东($P<0.05$)。果形指数平均值为0.88,山东‘富士’苹果果形指数要显著高于山西和陕西($P<0.05$)。着色面积平均值为87.27%,山东‘富士’苹果着色面积显著高于陕西和山西($P<0.05$)。果实硬度均值为9.56 kg/cm²,陕西‘富士’苹果果实硬度要显著低于山西和山东($P<0.05$)。可溶性固形物含量平均值为12.64%,山东‘富士’苹果可溶性固形物含量显著高于陕西($P<0.05$)。可滴定酸含量平均值为0.16%,山西‘富士’苹果可溶性固形物含量显著高于陕西和山东($P<0.05$)固酸比均值为84.07,山东‘富士’苹果固酸比显著高于陕西和山西($P<0.05$)。

表 2 不同产区‘富士’苹果品质

Table 2 Quality of ‘Fuji’ apples in different production areas

项目 Items	单果质量/g Mean fruit weight	果形指数 Fruit shape index	着色面积/% Red color area	果实硬度/ (kg/cm ²) Firmness	w(可溶性固 形物)/% Soluble solids	w(可滴定酸)/% Titratable acidity	固酸比 Soluble solids to titratable acidity ratio
山东 Shandong	257.34±25.94b	0.92±0.06a	92.25±5.29a	9.82±0.40a	13.31±0.53a	0.14±0.02b	102.51±12.21a
陕西 Shaanxi	242.77±33.57b	0.85±0.02b	87.69±5.29b	9.04±0.25b	12.45±0.39b	0.16±0.03b	66.65±12.41b
山西 Shanxi	275.32±23.13a	0.87±0.15b	85.45±5.94b	9.71±0.77a	12.64±0.33ab	0.19±0.05a	71.86±21.90b
平均值 Mean	256.62	0.88	87.27	9.56	12.64	0.16	84.07
变幅 Luffing	193.38~317.38	0.55~1.05	73.25~97.25	8.18~10.73	11.48~14.04	0.11~0.24	51.88~123.09
极差 Range	124.00	0.50	24.00	2.55	2.56	0.13	71.22
标准差 Standard deviation	29.82	10.97	4.10	0.07	6.15	5.09	0.52

注：同一列中，不同字母代表不同产区苹果品质平均值显著差异($P<0.05$)，表 3 同。

Note: In the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$) in the mean values of apple quality in different production areas, Table 3 is the same as.

不同‘富士’苹果产区土壤养分状况见表 3，不同产区土壤养分间均存在显著差异。主产区果园土壤中平均碱解氮质量分数为 97.23 mg/kg，山东显著高于陕西和山西土壤碱解氮含量($P<0.05$)。主产区果园土壤平均有效磷质量分数为 51.88 mg/kg，与其他产区相比，山东果园土壤有效磷含量显著高于山西和陕西($P<0.05$)。主产区果园土壤平均速效钾质量分数为 343.20 mg/kg，其中山西土壤中速效钾含

表 3 不同‘富士’苹果产区土壤养分

Table 3 Soil nutrients and pH in different ‘Fuji’ apple production areas

项目 Items	质量分数/(mg/kg) Moss fraction					pH
	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	有效钙 Available Ca	有效铁 Available Fe	
山东 Shandong	158.28±66.44a	69.86±75.00a	260.18±155.32b	354.50±24.55b	118.01±30.40a	5.33±0.54b
陕西 Shaanxi	60.49±25.05b	31.44±14.62b	346.67±234.62ab	386.29±22.00a	12.97±30.54b	8.20±0.74a
山西 Shanxi	72.92±43.40b	34.51±44.78b	413.86±243.15a	343.21±134.88b	12.64±3.98b	8.35±0.34a
平均值 Mean	97.23	51.88	343.20	380.54	37.26	7.27
变幅 Luffing	27.00~337.00	3.80~259.00	102.00~854.00	331.00~420.00	6.03~168.00	4.86~10.06
极差 Range	310.00	255.20	752.00	89.00	161.97	4.86

量显著高于山东($P<0.05$)。主产区果园土壤平均有效钙质量分数为380.54 mg/kg,陕西和山西显著高于山东果园土壤有效钙含量($P<0.05$)。主产区果园土壤平均有效铁质量分数37.26 mg/kg,山东显著高于山西和陕西($P<0.05$)。主产区果园土壤pH平均值为7.27,山西和山东果园土壤均pH高于8,显著高于山东($P<0.05$)。

2.2 土壤养分和果实品质相关性分析

主产区果园土壤养分和果实品质之间的相关

性见表4。土壤碱解氮含量与着色面积和固酸比呈显著正相关,与可溶性固形物含量呈极显著正相关,与可滴定酸含量呈显著负相关。有效磷含量与果实硬度和固酸比呈显著正相关。有效铁含量与果形指数和固酸比呈显著正相关,与着色面积呈极显著正相关,与可溶性固形物含量呈极显著负相关。pH与着色面积呈显著负相关,与可溶性固形物、固酸比呈极显著负相关,pH与可滴定酸含量呈极显著正相关。

表4 果园土壤养分与果实品质指标的相关系数
Table 4 Correlation coefficient between soil nutrients and fruit quality indexes in orchard

果实品质指标 Fruit quality indexes	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Rapidly K	有效钙 Available Ca	有效铁 Available Fe	pH
单果质量 Mean fruit weight	0.017	-0.025	0.003	0.151	-0.053	0.159
果形指数 Fruit shape index	0.212	0.001	0.018	-0.123	0.346*	-0.163
着色面积 Red color area	0.298*	0.153	0.131	-0.029	0.416**	-0.358*
果实硬度 Firmness	0.212	0.325*	0.271	-0.268	0.280	-0.244
可溶性固形物 Soluble solids	0.400**	0.219	0.092	-0.240	-0.535**	-0.434**
可滴定酸 Titratable acidity	-0.311*	-0.249	0.189	-0.069	-0.372	0.450**
固酸比 Soluble solids to titratable acidity ratio	0.361*	0.295*	-0.163	-0.089	0.477*	-0.501**

注:*和**分别表示0.05和0.01水平显著,表5同。
Note:* and ** denote significant at 0.05 and 0.01 levels, Table 5 is the same as.

2.3 多重共线性诊断

多重共线性诊断是回归分析和方程建立的必要步骤,果园不同土壤养分因子之间的相关性见表5。碱解氮与有效磷和有效铁呈显著正相关,与pH呈极显著负相关;有效磷与pH呈极显著负相关;有效钙与有效铁之间呈极显著负相关,与pH呈显著正相关;有效铁与pH呈极显著负相关。

土壤养分共线性诊断结果见表6,土壤养分的条件指数最大为65.370,处于中等相关,土壤养分的特征值最大为5.587。由此可知,果园土壤不同养分因子间存在多重共线性。

2.4 影响果实品质的土壤养分因子筛选

变量投影重要性(Variable importance projection, VIP)代表自变量对应变量的重要程度,以VIP>1.0为筛选标准,从而获得影响果实品质的主要土壤养分因子,结果见表7。影响苹果品质的土壤养分因子分别为:单果质量,pH和有效钙(影响程度由大到小);果形指数,有效铁和pH;着色面积,有效铁、pH和碱解氮;果实硬度,有效磷、速效钾和pH;可溶性固形物含量,有效铁、pH和碱解氮;可滴定酸含量,pH、有效铁和碱解氮;固酸比,pH、有效铁和碱解氮。

表 5 果园土壤不同养分因子之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between different nutrient factors in orchard soils

土壤养分因子 Soil nutrient factors	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Rapidly K	有效钙 Available Ca	有效铁 Available Fe	pH
碱解氮 Alkaline N	1					
有效磷 Available P	0.353*	1				
速效钾 Rapidly K	0.107	−0.037	1			
有效钙 Available Ca	−0.057	−0.026	−0.199	1		
有效铁 Available Fe	0.608**	0.163	−0.073	−0.383**	1	
pH	−0.711**	−0.536**	0.099	0.297*	−0.722**	1

表 6 土壤养分共线性诊断

Table 6 Soil nutrient covariance diagnostics

因子数量 Number	特征值 Eigenvalue	条件指数 Index	方差比例 Variance proportion					
			碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Rapidly K	有效钙 Available Ca	有效铁 Available Fe	pH
1	5.587	1.000	0.002 8	0.004 4	0.004 4	0.000 1	0.003 6	0.000 3
2	0.662	2.904	0.144 4	0.069 0	0.022 0	0.000 2	0.126 4	0.002 4
3	0.461	3.482	0.002 4	0.505 7	0.001 4	0.000 0	0.113 5	0.000 1
4	0.171	5.722	0.042 0	0.001 2	0.645 0	0.001 3	0.019 6	0.005 7
5	0.113	7.044	0.612 9	0.102 3	0.169 0	0.000 1	0.320 8	0.000 2
6	0.005	32.294	0.277 8	0.301 5	0.049 4	0.113 6	0.185 2	0.984 8
7	0.001	65.370	0.047 6	0.014 3	0.108 6	0.880 0	0.230 0	0.006 6

表 7 影响‘富士’苹果果实品质的土壤养分变量投影重要性(VIP)

Table 7 Projected importance of soil nutrient variables affecting fruit quality in ‘Fuji’ apples (VIP)

品质指标 Quality indexes	碱解氮 Alkaline N	有效磷 Available P	速效钾 Rapidly K	有效钙 Available Ca	有效铁 Available Fe	pH
单果质量 Mean fruit weight	0.18	0.27	0.03	1.62	0.57	1.71
果形指数 Fruit shape index	0.94	0.91	0.26	0.75	1.59	1.06
着色面积 Red color area	1.12	0.65	0.80	0.74	1.37	1.13
果实硬度 Firmness	0.88	1.12	1.12	0.90	0.95	1.01
可溶性固形物 Soluble solids	1.13	0.62	0.26	0.68	1.52	1.23
可滴定酸 Titratable acidity	1.04	0.83	0.63	0.23	1.24	1.50
固酸比 Soluble solids to titratable acidity ratio	1.03	0.85	0.46	0.26	1.37	1.44

2.5 土壤养分因子对‘富士’苹果品质影响的回归方程

通过果实品质的土壤养分因子筛选,建立‘富士’苹果品质与土壤养分因子的回归方程见表8。土壤养分对苹果品质影响的回归方程均达到显著相关水平,表明回归方程有较高的稳定性。由回归方程土壤养分因子回归系数可知,单果质量与有效钙质量分数和pH呈正相关;果形指数与有效铁质量分数和pH呈

正相关;着色面积与碱解氮质量分数和有效铁质量分数呈正相关,与土壤pH呈负相关;果实硬度与有效磷质量分数和速效钾质量分数之间呈正相关,与pH呈负相关;可溶性固形物含量与碱解氮质量分数呈正相关,与土壤有效铁质量分数和pH呈负相关;可滴定酸含量碱解氮质量分数和pH呈正相关,与有效铁质量分数呈负相关;固酸比与碱解氮质量分数和pH呈正相关,与土壤有效铁质量分数呈正相关。

表8 土壤养分因子对‘富士’苹果果实品质影响的回归方程
Table 8 Regression equation for the effect of soil nutrient factors on fruit quality of ‘Fuji’ apple

品质指标 Quality indexes	影响因子 Impact factor	回归方程 Regression equation	F	P
单果质量(y_1) Mean fruit weight	x_4 ,有效钙质量分数; x_6 ,pH	$y_1=184.248+0.143x_4+2.467x_6$	2.344	0.044
果形指数(y_2) Fruit shape index	x_5 ,有效铁质量分数; x_6 ,pH	$y_2=0.788+0.0001x_5+0.0008x_4$	3.375	0.043
着色面积(y_3) Red color area	x_1 ,碱解氮质量分数; x_5 ,有效铁质量分数; x_6 ,pH	$y_3=88.378+0.003x_1+0.048x_5-0.431x_6$	3.077	0.038
果实硬度(y_4) Firmness	x_2 ,有效磷质量分数; x_3 ,速效钾质量分数; x_6 ,pH	$y_4=9.466+0.002x_3+0.001x_4-0.045x_6$	3.444	0.025
可溶性固形物(y_5) Soluble solid content	x_1 ,碱解氮质量分数; x_5 ,有效铁质量分数; x_6 ,pH	$y_5=12.467+0.001x_1-0.005x_5-0.014x_6$	5.891	0.002
可滴定酸(y_6) Titratable acid content	x_1 ,碱解氮质量分数; x_5 ,有效铁质量分数; x_6 ,pH	$y_6=0.086+0.001x_1-0.001x_5+0.010x_6$	3.608	0.019
固酸比(y_7) Soluble solids to titratable acidity ratio	x_1 ,碱解氮质量分数; x_5 ,有效铁质量分数; x_6 ,pH	$y_7=112.364-0.012x_1+0.112x_5-4.305x_6$	5.426	0.003

3 讨论与结论

‘富士’苹果品质受到多种土壤因子影响,本研究发现,土壤碱解氮含量与着色面积、可溶性固形物含量和固酸比呈显著正相关,与可滴定酸含量呈显著负相关。一方面与氮与果实呼吸强度有关,另一方面,施氮量也会影响果实中碳水化合物含量^[18]。张艳珍等^[19]研究显示,施氮量过高或者过低,果实内可溶性固形物、可溶性糖和维生素C含量均降低,可滴定酸含量升高。有效磷含量与果实硬度和固酸比呈显著正相关。磷能促进CO₂的还原和固定,有利于碳水化合物的形成,不仅能够提高产量,增加含糖量,还能提高果实色泽度^[20]。对于果园土壤中的微量元素,有效铁含量与果形指数呈显著正相关,与着色面积、可溶性固形物含量、固酸比

呈极显著正相关,与韩建等^[5]研究基本一致。除此之外,本研究还显示,pH与着色面积、可溶性固形物和固酸比呈显著负相关,与可滴定酸含量呈显著正相关。

果树生长需要适宜的土壤pH,本研究对不同主产区果园土壤pH的检测结果表明,山东产区果园土壤pH明显低于山西和陕西产区,这与张强等^[21]对环渤海湾的土壤养分检测结果一致。通过与其他主产区的土壤养分调查数据对比,均表现出山东(栖霞和蓬莱)地区果园土壤pH较低的特点,土壤酸化明显,而黄土高原产区pH普遍为8.00左右^[22-26],与20世纪80年代的土壤调查结果对比,烟台地区土壤酸化问题日益严重,土壤酸化可能是果园长期大量施用氮肥和缺少有机质的结果^[27]。

本研究对土壤养分因子与‘富士’苹果品质的相关性分析显示,‘富士’苹果品质是由多个土壤养分因子的共同作用结果,在此基础上定量化地分析了土壤养分因子对不同果实品质影响的大小顺序,并建立了‘富士’苹果品质与土壤养分因子的回归方程。由于本研究是根据现有研究区域和样本构建的回归方程,有效性还需要通过田间实验验证和进一步研究。

参考文献 References

- [1] 匡立学,徐国锋,陈志军,李银萍,程杨,沈友明. 2017 年中国‘富士’苹果品质数据集[J]. 农业大数据学报, 2022, 4(3): 49-53
Kuang L X, Xu G F, Chen Z J, Li Y P, Cheng Y, Shen Y M. Quality datasets of ‘Fuji’ apples cultivated in China in 2017 [J]. *Journal of Agricultural Big Data*, 2022, 4(3): 49-53 (in Chinese)
- [2] 张聪颖, 畅倩, 霍学喜. 中国苹果生产区域变迁分析[J]. 经济地理, 2018, 38(8): 141-151
Zhang C Y, Chang Q, Huo X X. Analysis on the layout of China’s apple production transition [J]. *Economic Geography*, 2018, 38(8): 141-151 (in Chinese)
- [3] 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
Zhang Q, Wei Q P, Liu H P, Jiang R S, Liu X D, Wang X W. Multivariate analysis and optimum proposals of the relationship between soil nutrients and fruit qualities in apple orchard [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1654-1661 (in Chinese)
- [4] 张强. ‘富士’苹果果实品质与土壤养分和气象因子关系的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018
Zhang Q. Study on relationship between fruit quality of ‘Fuji’ apple and soil nutrition [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [5] 韩建, 霍增起, 尹兴, 吉艳芝, 张杰, 张丽娟. 太行山南部苹果园土壤养分特征及其与果实品质关系的多元分析[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(5): 69-74
Han J, Huo Z Q, Yin X, Ji Y Z, Zhang J, Zhang L J. Multiple analyses of soil nutrition characteristic in apple orchard and its relation to the fruit quality in South of Taihang Mountain [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2018, 41(5): 69-74 (in Chinese)
- [6] 柴媛媛. 渭北旱塬水土环境状况与苹果品质的关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009
Chai Y Y. Relationship between soil and water environment and apple quality in Weibei Plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009 (in Chinese)
- [7] Mészáros M, Béliková H, Čonka P, Náměstek J. Effect of hail nets and fertilization management on the nutritional status, growth and production of apple trees [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 255: 134-144
- [8] Yan M Y, Zeng X Q, Zhang B H, Zhang H, Tan D, Cai B H, Qu S C, Wang S H. Prediction of apple fruit quality by soil nutrient content and artificial neural network [J]. *Phyton*, 2023, 92(1): 193-208
- [9] He Z J, Hu Q Y, Zhang Y, Cao H X, Nan X P. Effects of irrigation and nitrogen management strategies on soil nitrogen and apple yields in loess plateau of China [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 280: 108220
- [10] Dris R, Niskanen R, Fallahi E. Nitrogen and calcium nutrition and fruit quality of commercial apple cultivars grown in finland [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(11): 2389-2402
- [11] Bennewitz E Von, Cooper T, Benavides C, Losak T, Hlusek J. Response of ‘jonagold’ apple trees to Ca, K and Mg fertilization in an andisol in southern chile. [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 11(3): 71-81
- [12] 白晏霖. 鲜食苹果外观品质及贮藏指标测量仪研发[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021
Bai Y L. Measuring prototype on appearance quality and storage indices of fresh apple [D]. Northwest Yangling: Northwest A & F University, 2021 (in Chinese)
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [14] 范立新. 回归分析中多重共线性诊断方法[J]. 国外医学卫生学分册, 1994(1): 34-37
Fan L X. Diagnostic method of multicollinearity in regression analysis [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 1994(1): 34-37 (in Chinese)
- [15] 吴琼, 原忠虎, 王晓宁. 基于偏最小二乘回归分析综述[J]. 沈阳大学学报, 2007, 19(2): 33-35
Wu Q, Yuan Z H, Wang X N. Summary of partial least squares regression [J]. *Journal of Shenyang University*, 2007, 19(2): 33-35 (in Chinese)
- [16] 秦浩, 林志娟, 陈景武. 偏最小二乘回归原理、分析步骤及程序[J]. 数理医药学杂志, 2007, 20(4): 450-451
Qin H, Lin Z J, Chen J W. Principle, analysis steps and program of partial least squares regression [J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2007, 20(4): 450-451 (in Chinese)
- [17] 周贝贝, 张强, 孙健, 李兴亮, 魏钦平. 偏最小二乘回归在苹果土壤养分与果实品质关系的研究与应用[J]. 果树学报, 2016, 33(1): 106-112
Zhou B B, Zhang Q, Sun J, Li X L, Wei Q P. Study and application of partial least squares regression on relationship between soil nutrient and fruit quality [J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(1): 106-112 (in Chinese)
- [18] 彭福田. 氮素对苹果果实发育与产量、品质的调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2001
Peng F T. Regulation of nitrogen to apple fruit development, yield and quality [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2001 (in Chinese)
- [19] 张艳珍, 程存刚, 赵德英, 周江涛, 陈艳辉, 张海棠, 解斌. 施氮水平对富士苹果果实钙形态及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1): 87-96
Zhang Y Z, Cheng C G, Zhao D Y, Zhou J T, Chen Y H, Zhang H T, Xie B. Effects of nitrogen application levels on fruit Ca forms and quality of ‘Fuji’ apples [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 87-96 (in Chinese)
- [20] 季萌萌, 彭玲, 文焰, 姜翰, 葛顺峰, 姜远茂. 供磷水平对苹果砷素氮、磷吸收和利用特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1016-1021
Ji M M, Peng L, Wen Z, Jiang H, Ge S F, Jiang Y M. Nitrogen and phosphorus absorption and utilization characteristics of apple rootstocks under different phosphorus levels [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 1016-1021 (in Chinese)
- [21] 张强, 李民吉, 周贝贝, 李兴亮, 张军科, 魏钦平. 环渤海湾和黄土地高原

- ‘富士’苹果园土壤养分与果实矿质元素关系的多变量分析[J]. 园艺学报, 2017, 44(8): 1439-1449
- Zhang Q, Li M J, Zhou B B, Li X L, Zhang J K, Wei Q P. Multivariate analysis of relationship between soil nutrient and fruit mineral elements of ‘Fuji’ apple orchards in circum-bohai and Loess Plateau producing regions of China[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, 44(8): 1439-1449 (in Chinese)
- [22] 袁嘉玮, 张健, 薛琴琴, 张鹏飞, 张战备, 王玉香, 段国琪, 杨印斌, 梁哲军. 运城市苹果主产区丰产果园土壤养分状况分析[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1034-1039
- Yuan J W, Zhang J, Xue Q Q, Zhang P F, Zhang Z B, Wang Y X, Duan G Q, Yang Y B, Liang Z J. Study on the state of soil nutrient of high-yield apple orchards in the major production area of Yuncheng [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(6): 1034-1039 (in Chinese)
- [23] 杨明霞, 刘政海, 张战备, 陈明昌, 冯两瑞. 山西临猗苹果园土壤肥力现状评价及相关性分析[J]. 果树资源学报, 2020, 1(4): 11-15
- Yang M X, Liu Z H, Zhang Z B, Chen M C, Feng L R. The status evaluation and correlation analysis of soil fertility of apple orchard in Linyi, Shanxi [J]. *Journal of Fruit Resources*, 2020, 1(4): 11-15 (in Chinese)
- [24] 杨玥, 同延安, 路永莉, 林文, 梁婷, 陈联英. 陕西省苹果园土壤肥力与施肥现状评估[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 166-171, 179
- Yang Y, Tong Yan'an, Lu Y L, Lin W, Liang T, Chen L Y. Evaluation on the situation of fertilization and soil fertility in apple fields in Shaanxi Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 166-171, 179 (in Chinese)
- [25] 葛顺峰, 郝文强, 姜翰, 魏绍冲, 姜远茂. 烟台苹果产区土壤有机质和pH分布特征及其与土壤养分的关系[J]. 中国农学通报, 2014, 30(13): 274-278
- Ge S F, Hao W Q, Jiang H, Wei S C, Jiang Y M. Distribution characteristics of soil organic matter and pH and the correlation to soil nutrients in apple orchards of Yantai [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(13): 274-278 (in Chinese)
- [26] 李柳莹, 王延平, 韩明玉, 张林森, 穆艳. 洛川苹果园土壤的理化特征分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2016, 44(4): 185-194, 202
- Li L Y, Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, Mu Y. Physical and chemical properties of soil in apple orchards of Luochuan [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2016, 44(4): 185-194, 202 (in Chinese)
- [27] 陈昕楠, 王丽霞, 庞力豪, 邵蕾. 山东烟台苹果产区土壤pH值、有机质含量和速效养分含量调查[J]. 中国果树, 2019(5): 25-28, 40
- Chen X N, Wang L X, Pang L H, Shao L. Analysis of soil pH, organic matter and available nutrient contents in apple growing areas of Yantai in Shandong [J]. *China Fruits*, 2019(5): 25-28, 40 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 李泰, 中共党员, 农业农村部食物与营养发展研究所读博士研究生。主要从事食物营养品质评价、农户技术采纳行为、产地冷藏设施运行和评估等相关研究。获得2022—2023年曾获得中国农业科学院博士研究生二等学业奖学金。



通讯作者简介: 孙君茂, 研究员, 博士生导师, 营养导向农业与食物发展创新团队首席科学家。现任国家食物与营养咨询委员会副秘书长, 农业农村部农产品营养标准专委会秘书长, 《中国食物与营养》杂志副主编等。从事食物营养经济学与农产品营养标准体系研究。主要研究方向有: 营养导向农业理论与实践, 中长期食物营养发展战略, 农产品营养标准体系与标准制订, 农产品优质优价机制以及食物营养教育示范等。先后主持和参与科技部、农业农村部、国家自然科学基金委、中国工程院、中国农科院等项目课题30余项。作为核心成员参与三部中国食物与营养发展纲要的研究编制与解读, 参与国民营养计划、中国居民膳食指南(2016版)等多个全国性、行业性政策文件的研究起草。