

环渤海湾和黄土高原‘富士’苹果园土壤养分与果实矿质元素关系的多变量分析

张 强, 李民吉, 周贝贝, 李兴亮, 张军科, 魏钦平*

(北京市林业果树科学研究院, 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 北京 100093)

摘 要: 探讨中国环渤海湾和黄土高原两大苹果产区土壤养分对‘富士’苹果果实矿质元素含量的影响及相互关系, 为两大苹果产区提高果实矿质元素含量的果园合理施肥等提供理论依据。2010—2011年分别在中国环渤海湾和黄土高原两大苹果产区各选择 22 个县, 每县 3 个果园, 共计 132 个乔砧‘富士’苹果园, 对每个果园的土壤养分和果实矿质元素含量进行调查和分析, 比较两大产区土壤养分、果实矿质元素含量的差异, 应用偏最小二乘回归方法筛选不同产区影响果实矿质元素含量的主要土壤养分因子, 线性规划求解优质果实矿质营养丰富的土壤养分含量优化方案。结果表明: 环渤海湾产区的土壤碱解氮、有效磷、钙、铁和锌含量极显著高于黄土高原产区, 而土壤 pH 和有效钾含量显著低于黄土高原产区; 环渤海湾产区‘富士’果实氮、磷含量显著高于黄土高原区, 而钙、铁和锌含量则显著低于黄土高原产区。黄土高原产区土壤有效铁、环渤海湾产区土壤有效硼含量分别与果实中的铁、硼呈显著和极显著相关。环渤海湾产区影响果实钙含量的主要土壤养分因子的大小顺序为土壤有机质、全氮、有效锌、有效硼、有效铁和有效钾, 土壤有效锌对果实钙有最大的正效应系数, 而土壤有效硼和全氮负效应系数较大; 黄土高原产区对果实钙含量影响的主要土壤养分因子的大小顺序为土壤有效磷、有效锌、有机质、有效铁和有效钾, 土壤有效锌、铁对果实钙含量有较大的正效应系数。线性规划求解出两大苹果产区果实矿质元素含量丰富的土壤养分优化方案。环渤海湾苹果产区增加果实钙含量的主要土壤养分管理措施为降低土壤全氮、碱解氮含量, 提高土壤有效钾、铁、锌含量, 维持较高的土壤有机质含量 ($17.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上); 黄土高原产区则为提高土壤有机质、有效锌含量, 降低土壤全氮、碱解氮含量, 保持适宜的土壤有效磷、钾含量。

关键词: 苹果; 土壤养分; 果实矿质元素; 偏最小二乘回归; 优化方案

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2017) 08-1439-11

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

ZHANG Qiang, LI Minji, ZHOU Beibei, LI Xingliang, ZHANG Junke, and WEI Qinpings*

(Beijing Academy of Forestry and Pomology Sciences, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture, Beijing 100093, China)

Abstract: Objective of the experiment is to probe into influence and interrelation of soil nutrient

收稿日期: 2017-03-01; **修回日期:** 2017-08-03

基金项目: 林业公益性行业科研专项 (201404720); 国家科技支撑计划课题 (2014BAD16B02-3); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJCX20150403)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: qpwei@sina.com)

contents on fruit mineral elements of 'Fuji' apple, and to provide respectively theoretical basis in reasonable orchard soil fertilizer application for improving content of mineral elements in Circum-Bohai and Loess Plateau apple production regions in China. The contents of soil nutrient and fruit mineral elements were respectively analyzed at 66 commercial apple orchards with standard rootstock of 22 counties (each county 3 orchards) in Circum-Bohai and Loess Plateau apple production regions from 2011 to 2012. Partial least squares regressions (PLSR) was used to screen major soil nutrient factors affecting fruit mineral elements, and to establish regression equation of relationship between fruit mineral elements and major soil nutrition factors. Linear programming was used to obtain optimum proposals of soil nutrient elements for higher fruit mineral elements. The results showed that alkaline hydrolytic N, available P, Ca, Fe and Zn of soil in Circum-Bohai region were significantly higher than in Loess Plateau apple production region, while pH and available K were significantly lower than those. The contents of 'Fuji' fruit N and P in Circum-Bohai region were significantly higher than those of Loess Plateau region, while Ca, Fe and Zn were significantly lower than those. Soil available Fe in Loess Plateau region, soil available B in Circum-Bohai region were significantly correlated with fruit Fe and B respectively. The Ca content of fruit in Circum-Bohai region were mainly affected by soil organic matter, total N, available Zn, B, Fe and K, and soil available Zn had the biggest positive effect coefficient, while available B and total N had greater negative effect coefficient on fruit Ca. While fruit Ca content in Loess Plateau were mainly affected by soil available P, Zn, organic matter, available Fe and K, and soil available Zn and Fe had greater positive effect coefficient on fruit Ca. Linear programming was used to obtain optimum proposals of soil nutrients for higher fruit mineral elements in two apple producing regions. The key soil nutrient management measures which improving fruit Ca content in Circum-Bohai apple region are the reduction of soil total N and alkaline hydrolytic N, increased available K, Fe and Zn, stable higher soil organic matter content (more than $17.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), while in Loess Plateau apple production region are the increased soil organic matter and available Zn, reduction of soil total N and Alkaline hydrolytic N, appropriate available P and K.

Keywords: apple; soil nutrition; fruit mineral element; PLSR; optimum proposal

苹果优势区域布局规划(2008—2015年)明确提出环渤海湾和黄土高原为中国两大苹果优势区域,其中环渤海湾产区有53个苹果重点县市,黄土高原产区有69个苹果重点县市,这两大优势产区的苹果种植面积和产量均占中国的80%以上(佚名,2010)。「富士」是中国主要栽培的苹果品种,约占种植面积的70%以上。果实矿质元素含量不仅与果实的品质特性、营养价值和贮藏期间的生理病害有密切关系(Fallahi et al., 1997; Bennewitz et al., 2011),而且对人们身体健康起到关键作用(Gupta & Gupta, 2014),探讨土壤养分与富士苹果果实矿质元素含量间的定量关系及生产矿质元素含量丰富果实的适宜土壤养分含量等对指导果园合理施肥,提高果实营养价值和减少果实生理病害等具有重要理论意义和应用价值。果树工作者在中国苹果园土壤养分含量与果实品质关系的调查方面做了大量工作,分别对北京、山东胶东半岛、陕西渭北等苹果园土壤养分状况和果实品质进行了调查分析(王海云等,2008;张强等,2011a;高义民等,2013;梁关会等,2013;王富林等,2013);在不同养分对苹果品质影响(Davenport & Peryea, 1990; Ramdane et al., 1998; Raese & Drake, 2007; Bennewitz et al., 2011)、果实矿质营养含量与贮藏生理病害(Fallahi et al., 1997, 2010; Grzegorz,

2013)等方面也做了大量的研究工作;在‘富士’苹果果实矿质元素与品质指标的相关性(徐慧等, 2014)、苹果园土壤养分与果实矿质营养的多元分析(张强等, 2011b)、“新红星”苹果土壤养分状况与产量的相关性(Awasthi & Upadhyay, 1996)和“澳洲青苹”苹果品质与果实矿质养分含量的多变量分析等方面也有一些报道; Fallahi等(2010)认为, 尽管果树叶片矿质元素分析是优化果树矿质营养的工具, 但叶片矿质营养与果实品质的相关性非常弱, 应用果实分析更加有用。应用偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)分析方法筛选环渤海湾和黄土高原两大苹果优势产区影响果实矿质元素含量的主要土壤养分因子、不同产区富士果实矿质元素含量丰富的最适土壤养分含量的研究报道尚少。通过对中国两大苹果优势产区乔砧富士苹果园土壤养分和果实矿质元素含量的分析, 应用偏最小二乘回归变量投影方法筛选影响果实不同矿质元素含量的土壤养分因子, 定量化探讨富士果实矿质元素含量丰富的土壤养分优化方案, 为果树多变量、多目标关系的变量筛选研究提供方法, 为富士苹果园合理施肥、提高果实矿质元素含量、减少生理病害等提供理论依据和指导性方案。

1 材料与方法

1.1 试材及取样

于2010年5月—2011年11月间, 分别在环渤海湾苹果产区3省(山东、辽宁、河北)和黄土高原产区3省(山西、陕西、甘肃)各选择22个县市, 每个县市选择3个以‘富士’苹果为主要栽培品种的果园, 要求果实着色和果形较好, 树龄15~20年生, 树形为自由纺锤形或小冠疏层形, 连续5年以上丰产、稳产, 产量幅度为30~45 t·hm⁻²。每个果园面积0.6 hm²以上。每个产区共计66个果园, 土壤为壤土或沙壤土。每年8—9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, 分别在树冠外缘东、南、西、北方位垂直向内50 cm处用土钻采集0~40 cm土层的土壤, 把每个取样小区的土样混合均匀, 装入塑料封口袋内; 每年10月下旬—11月上旬, 分别于当地果实成熟期, 在土壤取样树的树冠东南和西南离地面1.5 m以上的方位随机取10个果实, 每个果园共取果实90个左右, 装入塑料袋内, 4 h内放入果品保鲜库或冰箱中贮藏。

1.2 测定指标与方法

每个果园的土壤样品在室内风干, 弃去植物残体, 过2 mm筛, 混合均匀, 研细, 使之全部通过1 mm孔径的筛子, 用于分析土壤养分。采用高温加热重铬酸钾氧化—容量法测定土壤有机质, 凯氏定氮法测定土壤全氮, 碱解扩散法测定土壤碱解氮, 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定土壤有效磷, 乙酸铵浸提—火焰光度计法测定土壤有效钾, DTPA浸提—原子吸收分光光度法测定土壤有效铁、锌, 醋酸钠浸提—原子吸收法测定土壤有效钙, 沸水浸提—甲亚胺-H酸比色法测定土壤有效硼, 电位计法测定土壤pH(鲍士旦, 2005)。

每个样品随机选择30个果实, 用去离子水洗净后, 将果实阴、阳两面沿果核至果皮切成薄片, 烘干用于分析果实矿质元素。采用H₂SO₄-H₂O₂消解—凯氏蒸馏法测定果实全氮, 钒钼黄比色法测定果实全磷, 火焰光度法测定果实全钾, HNO₃-HClO₄消解—原子吸收分光光度法测定果实全钙、铁和锌, 干灰化—甲亚胺-H酸比色法测定全硼(鲍士旦, 2005)。

以每个产区66个果园连续2年的土壤养分和果实矿质元素资料, 应用SAS 8.1软件(ANOVA)进行差异分析、相关分析、偏最小二乘回归分析, LINDO 10.0软件进行土壤养分优化方案求解。

2 结果与分析

2.1 两大产区土壤养分、果实矿质元素的差异

环渤海湾和黄土高原两大产区的土壤养分含量存在明显差异(表1)。环渤海湾产区的土壤碱解氮、有效磷、钙、铁和锌含量极显著高于黄土高原产区;黄土高原产区土壤 pH 和有效钾含量分别极显著和显著高于环渤海湾产区,其中环渤海湾产区的土壤 pH 值小于 6.5,黄土高原产区 pH 值则大于 7.5,均超出了苹果最适宜的 pH 值范围(6.5~7.5),这说明两大苹果优势产区在土壤养分含量、pH 值等方面存在一定的差异,在土壤管理中应区别对待。

环渤海湾产区富士果实的全氮、磷含量显著高于黄土高原产区,而果实中的钙、铁和锌含量则显著低于黄土高原产区(表2)。

表1 两大苹果产区土壤养分的差异
Table 1 Differences of soil nutrients in two apple production regions

产区 Producing region	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter				全氮/(g·kg ⁻¹) Total N				碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkaline hydrolytic N			
	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max
环渤海湾 Circum-Bohai	14.15	3.28	8.06	21.40	0.94	0.46	0.06	2.22	106.35**	44.53	24.40	217.00
黄土高原 Loess Plateau	14.06	3.75	6.69	25.70	0.76	0.30	0.25	1.43	68.09	25.43	24.00	157.00
产区 Producing region	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available P				有效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K				有效钙/(mg·kg ⁻¹) Available Ca			
	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max
环渤海湾 Circum-Bohai	132.2**	66.70	22.0	318.0	309.8	200.20	56.0	900.0	5.83**	1.47	0.94	6.44
黄土高原 Loess Plateau	61.1	46.77	13.1	238.0	320.7*	166.62	55.0	898.0	2.93	0.63	3.69	7.47
产区 Producing region	有效铁/(mg·kg ⁻¹) Available Fe				有效锌/(mg·kg ⁻¹) Available Zn				有效硼/(mg·kg ⁻¹) Available B			
	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max
环渤海湾 Circum-Bohai	46.54**	29.23	9.33	137.0	4.34**	3.41	0.32	17.70	0.41*	0.25	0.09	1.13
黄土高原 Loess Plateau	9.34	3.05	3.62	20.70	1.57	0.86	0.29	3.94	0.36	0.17	0.11	0.96
产区 Producing region	pH											
	\bar{X}	Sd	Min	Max								
环渤海湾 Circum-Bohai	6.36	1.04	4.08	8.18								
黄土高原 Loess Plateau	8.19**	0.20	7.60	8.74								

注: *和**分别表示区域间平均值差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。 \bar{X} : 平均值; Sd: 标准差; Min: 最小值; Max: 最大值, 下同。

Note: The * and ** meant significant difference regional average at 0.05 and 0.01 levels, respectively (t method). \bar{X} : Mean; Sd: Standard deviation; Min: Minimum; Max: Maximum. The same below.

表2 两大苹果产区‘富士’果实矿质养分的差异
Table 2 Differences of 'Fuji' fruit mineral elements in two apple producing regions

产区 Producing region	N/%				P/%				K/%			
	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max
环渤海湾 Circum-Bohai	0.31*	0.054	0.21	0.41	0.078*	0.014	0.051	0.13	0.73	0.091	0.54	1.00
黄土高原 Loess Plateau	0.21	0.094	0.13	0.37	0.069	0.011	0.050	0.11	0.68	0.093	0.48	0.97
产区 Producing regions	Ca/(mg·kg ⁻¹)				Fe/(mg·kg ⁻¹)				Zn/(mg·kg ⁻¹)			
	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max	\bar{X}	Sd	Min	Max
环渤海湾 Circum-Bohai	596.35	189.13	302.00	1 040.00	85.70	37.16	40.60	175.00	3.48	1.66	1.74	13.40
黄土高原 Loess Plateau	789.98*	122.34	427.00	1 190.00	118.89*	29.99	29.80	184.00	4.66*	1.34	2.85	12.70
产区 Producing regions	B/(mg·kg ⁻¹)											
	\bar{X}	Sd	Min	Max								
环渤海湾 Circum-Bohai	16.07	6.32	4.89	32.40								
黄土高原 Loess Plateau	17.77	7.05	4.02	41.30								

2.2 土壤养分与果实矿质元素的相关性

由两大产区土壤养分与果实矿质元素的相关系数(表 3)可看出, 黄土高原产区土壤有效铁、环渤海湾产区土壤有效硼含量分别与果实中的铁、硼含量呈显著和极显著相关, 其他的土壤养分含量与果实中相应元素含量的相关性均不显著。不同产区的土壤养分因子与果实矿质元素的相关性存在较大差异, 环渤海湾产区的土壤有机质与果实钙、铁含量呈显著负相关; 环渤海湾产区的土壤有效磷与果实硼含量呈显著正相关, 黄土高原产区的土壤有效磷含量则与果实钙含量呈极显著正相关; 环渤海湾产区的土壤有效钙含量分别与果实磷、钾含量呈显著和极显著负相关, 土壤有效铁与果实磷含量呈显著正相关, 土壤锌则与果实铁含量呈显著正相关; 黄土高原产区的土壤有效铁和锌含量均与果实钙含量呈正相关, 土壤有效硼含量与果实铁含量则呈极显著正相关。说明果实矿质元素含量与土壤养分含量的关系比较复杂, 不同土壤养分因子间在根系吸收、分配和向果实运输中存在协同与拮抗作用, 仅从单因素相关分析难以判断出土壤养分因子与果实矿质元素含量的内在关系, 需要应用多变量、多目标统计分析方法探讨。

表 3 两大苹果产区土壤养分与果实矿质元素的相关系数

Table 3 The correlation coefficient between soil nutrients and fruit mineral elements in two apple producing regions

土壤养分 Soil nutrient	产区 Producing region	果实矿质养分 Fruit mineral element						
		N	P	K	Ca	Fe	Zn	B
有机质 Organic matter	环渤海湾 Circum-Bohai	0.1622	0.0393	0.1368	-0.2354*	-0.2656*	-0.0371	0.1930
	黄土高原 Loess Plateau	0.0155	0.0163	0.1026	0.1063	0.0211	-0.0465	0.0341
全氮 Total N	环渤海湾 Circum-Bohai	0.0544	-0.0476	0.0368	-0.2011	-0.1646	0.0892	0.0214
	黄土高原 Loess Plateau	0.0641	-0.1014	0.0393	0.1139	0.0098	-0.1089	0.0909
碱解氮 Alkaline hydrolytic N	环渤海湾 Circum-Bohai	0.0914	0.0120	0.0701	-0.0401	-0.0608	0.0030	0.1681
	黄土高原 Loess Plateau	-0.0066	-0.0694	-0.0974	0.1156	0.0021	-0.0606	0.1341
有效磷 Available P	环渤海湾 Circum-Bohai	0.1041	0.1256	0.2026	0.0007	0.0419	0.1445	0.2484*
	黄土高原 Loess Plateau	0.2003	-0.0347	0.0024	0.3243**	0.1331	-0.0352	0.0893
有效钾 Available K	环渤海湾 Circum-Bohai	-0.1927	-0.0871	0.0804	0.0528	0.0774	0.0850	0.2284
	黄土高原 Loess Plateau	0.0345	-0.0277	0.0597	0.0661	0.2602*	-0.0522	0.1379
有效钙 Available Ca	环渤海湾 Circum-Bohai	-0.1837	-0.2935*	-0.3614**	-0.0868	-0.1303	-0.1918	-0.0195
	黄土高原 Loess Plateau	-0.0385	-0.1526	-0.0464	0.0253	-0.0935	-0.0653	-0.0160
有效铁 Available Fe	环渤海湾 Circum-Bohai	0.1574	0.2389*	0.3553	-0.1418	-0.1541	0.2337	0.0891
	黄土高原 Loess Plateau	-0.1392	0.0329	0.1478	0.2380*	0.2730*	0.0110	0.0353
有效锌 Available Zn	环渤海湾 Circum-Bohai	0.1029	-0.0186	0.0495	0.1457	0.2565*	0.0983	0.1527
	黄土高原 Loess Plateau	0.0654	0.0757	0.0869	0.3063**	0.0799	-0.0515	0.1270
有效硼 Available B	环渤海湾 Circum-Bohai	-0.0076	0.0593	0.2233	-0.1630	-0.1157	-0.0372	0.4281**
	黄土高原 Loess Plateau	-0.1355	-0.1107	0.0470	0.1891	0.3029**	-0.0856	0.0828
pH	环渤海湾 Circum-Bohai	-0.1805	-0.0678	-0.1911	0.0889	0.1076	-0.2337	0.1070
	黄土高原 Loess Plateau	-0.1807	0.1752	0.0959	-0.0610	0.0255	0.1693	-0.2016

2.3 土壤养分对果实矿质营养影响的因子筛选

为了清晰地表明土壤养分对果实矿质元素影响的重要性, 应用偏最小二乘回归的变量投影重要性(variable importance for projection, VIP)技术方法(周贝贝等, 2016)分别计算了土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、有效钾、有效铁、有效锌、有效硼和 pH 对果实全氮、磷、钾、钙、铁、锌和硼含量影响的 VIP 值(表 4), 以 VIP 值大于 1.0 为筛选标准, 获得了两大优势苹果产区影响果实矿质元素的主要土壤养分因子。环渤海湾产区, 影响果实全氮含量的土壤养分因子的大小顺序为土壤有效钾、有效铁、pH、有效钙和有机质含量, 影响果实钙含量的依次是土壤有机质、全氮、有效锌、有效硼、有效铁和有效钾含量, 影响果实硼含量的依次是土壤有效硼、全氮、有效磷和有效

钾含量；在黄土高原苹果产区，影响果实全氮含量的土壤养分因子的大小顺序为土壤有效磷、pH、有效铁和有效硼含量，影响果实钙含量的依次是土壤有效磷、有效锌、有机质、有效铁和有效钾含量，影响果实硼含量的依次是土壤 pH、有机质、有效铁、有效磷、有效钾和碱解氮含量。从两产区土壤养分对果实矿质元素影响的 VIP 值可看出，两产区土壤钙含量对果实钙含量影响均较小，相同果实矿质元素在不同产区受土壤养分因子的影响各异。进一步说明了土壤养分因子对果实矿质元素影响的关系错综复杂。

表 4 两大产区影响果实矿质营养因素的土壤养分 VIP 值

Table 4 Variable Importance for Projection (VIP) of soil nutrient factors affecting the fruit mineral elements in two apple producing regions

土壤养分 Soil nutrient	产区 Producing region	果实矿质养分 Fruit mineral element						
		N	P	K	Ca	Fe	Zn	B
有机质 Organic matter	环渤海湾 Circum-Bohai	1.2886	1.0492	0.6876	1.9563	2.0396	0.5809	0.8593
	黄土高原 Loess Plateau	0.2745	0.9919	1.3203	1.3193	1.2420	1.1559	1.4130
全氮 Total N	环渤海湾 Circum-Bohai	0.5577	0.3454	0.6928	1.6847	1.2988	0.6233	1.4437
	黄土高原 Loess Plateau	0.7229	1.1461	0.8447	0.8508	1.0476	1.1456	0.8182
碱解氮 Alkaline hydrolytic N	环渤海湾 Circum-Bohai	0.6417	0.1107	0.8328	0.8827	0.7523	1.2632	0.8097
	黄土高原 Loess Plateau	0.9286	1.1650	1.4830	0.7573	0.7342	0.9958	1.0561
有效磷 Available P	环渤海湾 Circum-Bohai	0.7900	0.8583	1.1533	0.8791	0.5953	1.0431	1.0960
	黄土高原 Loess Plateau	1.9787	0.9711	0.4960	1.6517	0.9252	1.2279	1.1002
有效钾 Available K	环渤海湾 Circum-Bohai	2.0452	0.9608	0.7372	1.0794	0.7918	0.5938	1.0915
	黄土高原 Loess Plateau	0.5976	0.7483	0.8077	1.0316	1.4874	0.8806	1.0850
有效钙 Available Ca	环渤海湾 Circum-Bohai	1.3163	1.8530	1.9559	0.7229	1.0104	1.3090	0.9087
	黄土高原 Loess Plateau	0.5119	1.7303	0.6679	0.2437	0.6969	0.6975	0.7367
有效铁 Available Fe	环渤海湾 Circum-Bohai	1.5034	1.5607	1.6794	1.1781	1.2082	1.6339	0.4027
	黄土高原 Loess Plateau	1.5226	0.8606	1.8332	1.0932	1.5474	1.5010	1.1943
有效锌 Available Zn	环渤海湾 Circum-Bohai	0.7815	0.3559	0.4780	1.6680	2.0737	0.9227	0.9314
	黄土高原 Loess Plateau	0.6447	1.3571	1.1232	1.5203	0.8392	0.8635	0.9969
有效硼 Available B	环渤海湾 Circum-Bohai	0.3828	0.7087	1.0839	1.3944	0.9597	1.1152	2.0096
	黄土高原 Loess Plateau	1.3933	1.2680	0.8161	0.8748	1.7333	0.9242	0.6669
pH	环渤海湾 Circum-Bohai	1.4441	2.5744	1.1457	0.7328	0.8454	1.5936	0.6108
	黄土高原 Loess Plateau	1.8574	2.0048	1.2585	0.5757	0.4445	1.9765	1.8580

2.4 土壤养分对果实矿质营养影响的回归方程

VIP 值仅能说明土壤养分对果实矿质元素含量的重要程度，并不能反应出其影响的正负效应。为了进一步表明不同产区土壤养分因子对果实矿质元素影响的正负效应，以不同产区影响果实不同矿质元素的主要土壤养分因子为自变量，果实矿质元素为依变量，应用偏最小二乘回归方法建立了不同产区土壤养分因子对果实矿质元素影响的回归方程。从表 5 看出，土壤养分对果实矿质元素影响回归方程的 P 值均小于 0.05，差异达到显著水平，说明建立的回归方程稳定可靠；从回归方程的系数可以判断出不同土壤养分因子对果实矿质元素影响的正负效应和重要程度。以对果实品质和生理病害影响较大的钙、硼元素为例，两产区的土壤有效锌含量与果实钙含量均有最大的正效应系数，说明在两大产区均需要增加土壤有效锌含量来提高果实的钙含量；在环渤海湾产区，对果实钙含量负效应系数较大的是土壤有效硼和全氮含量；土壤有效硼含量与果实硼含量有较大的正效应系数，而与土壤全氮含量有较大的负效应系数；降低土壤全氮含量可以提高果实钙、硼含量。在黄土高原产区，土壤有效锌、铁含量对果实钙含量有较大的正效应系数；土壤 pH 值对果实硼含量的负效应系数最大。综合分析得出，环渤海湾苹果产区，提高土壤有效锌、保持适宜的土壤有效硼、降低土壤全氮含量等是提高果实钙、硼含量的土壤养分管理重点；黄土高原产区提高土壤有效锌和铁含量、降低土壤 pH 值等是提高果实钙、硼含量的土壤养分管理重点。

表 5 两大产区主要土壤养分对果实矿质营养影响的回归方程

Table 5 Regression equation of major soil nutrient factors affecting fruit mineral elements in two producing regions

果实矿质养分 Fruit mineral element	产区 Producing region	回归方程 Regression equation	F	P
N	CB	$Y1 = 0.2799 + 0.00496X1 - 0.00007X5 - 0.0040X6 + 0.00017X7 - 0.0025X10$	2.56	0.0476
	LP	$Z1 = 0.5063 + 0.0006X4 - 0.0063X7 - 0.0902X9 - 0.0298X10$	2.92	0.0406
P	CB	$Y2 = 0.0427 + 0.001X1 - 0.004X6 + 0.0001X7 + 0.0044X10$	3.64	0.0010
	LP	$Z2 = 0.00446 - 0.0057X2 + 0.00004X3 - 0.0036X6 + 0.0033X8 - 0.0132X9 + 0.0106X10$	2.12	0.0499
K	CB	$Y3 = 0.5424 - 0.00009X4 - 0.0315X6 + 0.0010X7 + 0.1091X9 + 0.0319X10$	4.73	0.0011
	LP	$Z3 = 0.47346 + 0.00135X1 - 0.00049X3 + 0.0043X7 + 0.0024X8 + 0.0218X10$	2.61	0.0440
Ca	CB	$Y4 = 833.696 - 12.315X1 - 149.959X2 + 0.21644X5 - 0.3867X7 + 24.426X8 - 192.475X9$	3.30	0.0073
	LP	$Z4 = 730.4615 - 4.2333X1 + 0.8037X4 - 0.0903X5 + 4.4206X7 + 35.0398X8$	2.81	0.0234
Fe	CB	$Y5 = 162.46621 - 4.3037X1 - 18.705X2 - 4.4314X6 - 0.2394X7 + 6.6448X8 - 4.9089X9$	5.33	0.0002
	LP	$Z5 = 736.66 - 6.374X1 + 0.7177X4 - 0.0716X5 + 6.2301X7 + 39.1308X8$	2.81	0.0230
Zn	CB	$Y6 = 3.4729 - 0.0017X3 + 0.0027X4 - 0.1269X6 + 0.0083X7 - 0.517X9$	2.33	0.0380
	LP	$Z6 = -5.4772 + 0.0001X1 - 0.437X2 + 0.0008X4 + 0.0289X7 + 1.2402X10$	2.29	0.0340
B	CB	$Y7 = 13.0246 - 2.2674X2 + 0.0089X4 + 0.0016X5 - 0.0079X8 + 9.5366X9$	3.02	0.0170
	LP	$Z7 = 64.0669 - 0.0793X1 + 0.0148X3 - 0.0051X4 + 0.0049X5 - 0.0042X7 - 5.7850X10$	2.84	0.0166

注: CB: 环渤海湾; LP: 黄土高原。X1: 有机质; X2: 全氮; X3: 碱解氮; X4: 有效磷; X5: 有效钾; X6: 有效钙; X7: 有效铁; X8: 有效锌; X9: 有效硼; X10: pH。

Note: CB: Loess Plateau; LP: Circum-Bohai. X1: Organic matter; X2: Total N; X3: Alkaline hydrolytic N; X4: Available P; X5: Available K; X6: Available Ca; X7: Available Fe; X8: Available Zn; X9: Available B; X10: pH.

2.5 果实矿质营养丰富的土壤养分优化方案

为了进一步说明果实矿质元素含量较高的土壤养分间的平衡关系, 根据表 5 的回归方程, 分别建立了两大产区土壤养分对果实矿质元素含量影响的线性规划方程组, 并当求解某一果实矿质元素含量最大时, 确保其他果实矿质元素含量达到较高水平, 同时给定土壤养分因子一定的约束范围。果实矿质元素含量的约束条件分别为两产区各 66 个果园果实矿质元素含量的平均值; 考虑到土壤养分因子可以通过土壤改良和施肥措施等进行提高, 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、有效钾、有效铁、有效锌、有效硼含量以两产区 66 个果园的平均值为最小值, 最大值为上限, 土壤 pH 值约束范围为 6.5 ~ 8.0。分别建立了求解两产区果实矿质营养最大的线性规划方程 (1) 和 (2)。

(1) 环渤海湾产区土壤养分与果实矿质养分线性规划方程组, 以果实全氮含量 (Y1) 最大为例:

$$\begin{cases}
 \text{Max } Y1 = 0.2799 + 0.00496X1 - 0.00007X5 - 0.0040X6 + 0.00017X7 - 0.0025X10 \\
 Y2 = 0.0427 + 0.001X1 - 0.004X6 + 0.0001X7 + 0.0044X10 \geq 0.078; \\
 Y3 = 0.5424 - 0.00009X4 - 0.0315X6 + 0.0010X7 + 0.1091X9 + 0.0319X10 \geq 0.73; \\
 Y4 = 833.696 - 12.315X1 - 149.959X2 + 0.21644X5 - 0.3867X7 + 24.426X8 - 192.475X9 \geq 596.35; \\
 Y5 = 162.46621 - 4.3037X1 - 18.705X2 - 4.4314X6 - 0.2394X7 + 6.6448X8 - 4.9089X9 \geq 85.70; \\
 Y6 = 3.4729 - 0.0017X3 + 0.0027X4 - 0.1269X6 + 0.0083X7 - 0.517X9 \geq 3.48; \\
 Y7 = 13.0246 - 2.2674X2 + 0.0089X4 + 0.0016X5 - 0.0079X8 + 9.5366X9 \geq 16.07; \\
 14.15 \leq X1 \leq 21.40; \\
 0.94 \leq X2 \leq 2.22; \\
 106.35 \leq X3 \leq 217.00; \\
 132.20 \leq X4 \leq 318.00; \\
 309.80 \leq X5 \leq 900.00; \\
 5.83 \leq X6 \leq 6.44; \\
 46.54 \leq X7 \leq 137.00; \\
 4.34 \leq X8 \leq 17.70; \\
 0.41 \leq X9 \leq 1.13; \\
 6.5 \leq X10 \leq 8.0
 \end{cases}$$

(2) 黄土高原产区土壤养分与果实矿质养分线性规划方程组，以果实全氮含量 (Z1) 最大为例：

$$\text{Max}Z1 = 0.5063 + 0.0006X4 - 0.0063X7 - 0.0902X9 - 0.0298X10$$

$$Z2 = 0.00446 - 0.0057X2 + 0.00004X3 - 0.0036X6 + 0.0033X8 - 0.0132X9 + 0.0106X10 \geq 0.069;$$

$$Z3 = 0.47346 + 0.00135X1 - 0.00049X3 + 0.0043X7 + 0.0024X8 + 0.0218X10 \geq 0.68;$$

$$Z4 = 730.4615 - 4.2333X1 + 0.8037X4 - 0.0903X5 + 4.4206X7 + 35.0398X8 \geq 789.98;$$

$$Z5 = 736.66 - 6.374X1 + 0.7177X4 - 0.0716X5 + 6.2301X7 + 39.1308X8 \geq 118.89;$$

$$Z6 = -5.4772 + 0.0001X1 - 0.437X2 + 0.0008X4 + 0.0289X7 + 1.2402X10 \geq 4.66;$$

$$Z7 = 64.0669 - 0.0793X1 + 0.0148X3 - 0.0051X4 + 0.0049X5 - 0.0042X7 - 5.7850X10 \geq 17.77;$$

$$14.06 \leq X1 \leq 25.70;$$

$$0.76 \leq X2 \leq 1.43;$$

$$68.09 \leq X3 \leq 157.00;$$

$$61.10 \leq X4 \leq 238.00;$$

$$320.70 \leq X5 \leq 898.00;$$

$$2.93 \leq X6 \leq 7.47;$$

$$9.34 \leq X7 \leq 20.70;$$

$$1.57 \leq X8 \leq 3.94;$$

$$0.36 \leq X9 \leq 0.96;$$

$$6.5 \leq X10 \leq 8.0$$

应用 LINGO 10.0 分析软件计算，分别对两大苹果产区果实矿质元素含量求解最大值，获得了环渤海湾和黄土高原苹果产区的果实矿质元素含量丰富的土壤养分优化值（表 6）。

表 6 两大产区果实矿质营养因素最大的土壤养分优化值

Table 6 Optimal value of soil nutrient for the largest fruit mineral elements factor in two producing regions

果实矿质养分 Fruit mineral element	产区 Producing region	土壤养分 Soil nutrient										目标函数优化值 Optimal value of objective function	
		OM	T-N	A-N	P	K	Ca	Fe	Zn	B	pH	CB	LP
全氮 Total N	CB	21.4	1.0	99.9	133.4	309.7	2.9	137.0	12.0	0.4	6.5	0.359	0.292
	LP	25.7	0.8	65.6	238.0	480.0	5.8	13.8	3.9	0.4	8.0		
全磷 Total P	CB	21.4	1.0	99.9	133.4	309.7	2.9	137.0	12.0	0.4	8.0	0.101	0.079
	LP	25.7	0.8	157.0	147.0	320.0	5.8	19.8	3.9	0.4	8.0		
全钾 Total K	CB	14.2	1.0	99.9	133.4	309.7	2.9	137.0	11.8	1.1	8.0	0.955	0.748
	LP	25.7	0.8	65.6	156.8	401.4	5.8	20.7	3.9	0.4	8.0		
全钙 Total Ca	CB	17.7	1.0	99.9	133.4	900.0	2.9	137.0	17.7	0.4	6.5	976.5	1061.3
	LP	25.7	0.8	65.6	156.8	401.4	5.8	20.7	3.9	0.4	8.0		
全铁 Total Fe	CB	14.2	1.0	99.9	139.9	309.7	2.9	46.5	17.7	0.4	7.0	175.4	176.3
	LP	14.1	0.8	65.6	238.0	320.0	5.8	20.7	3.9	0.4	7.8		
全锌 Total Zn	CB	14.2	1.0	99.9	318.0	309.7	2.9	137.0	7.4	0.4	6.5	4.74	4.89
	LP	25.7	0.8	65.6	238.0	485.9	5.8	20.7	3.9	0.4	8.0		
全硼 Total B	CB	20.8	1.0	99.9	318.0	900.0	2.9	46.5	8.9	1.1	6.5	25.85	22.72
	LP	14.1	0.8	128.6	151.6	900.0	5.8	20.7	3.9	0.4	7.9		

注：CB：环渤海湾；LP：黄土高原。OM：有机质 (g·kg⁻¹)；T-N：全氮 (g·kg⁻¹)；A-N：碱解氮 (mg·kg⁻¹)；P、K、Ca、Fe、Zn 和 B 为土壤有效含量 (mg·kg⁻¹)。

Note: CB: Loess Plateau; LP: Circum-Bohai. OM: Organic matter (g·kg⁻¹); T-N: Total N (g·kg⁻¹); A-N: Alkaline hydrolytic N (mg·kg⁻¹); P, K, Ca, Fe, Zn and B were alkaline content (mg·kg⁻¹).

两大主要苹果产区的果实矿质元素含量较大时土壤全氮、碱解氮、有效钙和有效硼含量均取了最低值，不同果实矿质元素在不同产区对土壤养分的需求各异，环渤海湾产区的果实钙含量需要较

高的土壤有效钾、铁、锌和适宜的土壤有机质; 而黄土高原产区则需要高的土壤有机质、有效锌和适宜的有效磷和钾。环渤海湾产区增加果实钙含量的主要土壤养分管理措施为降低土壤全氮、碱解氮含量, 提高土壤有效钾、铁、锌含量, 维持较高的土壤有机质含量 ($17.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上); 黄土高原产区则为提高土壤有机质和有效锌含量, 降低土壤全氮、碱解氮含量, 保持适宜的土壤有效磷和钾含量。

3 讨论

3.1 土壤养分与果实矿质元素关系的统计分析

果园土壤养分的可利用性受土壤养分含量、pH 值和元素间的平衡作用等多种因素交互影响, 土壤养分与果实矿质元素含量的关系属于多自变量与多目标的关系, 土壤养分、果实矿质元素含量之间有较强的线性相关性, 即多重共线性, 盲目地应用回归分析或建立回归方程不仅得不到理想的结果, 反而导致错误的结论 (周贝贝 等, 2016)。偏最小二乘回归是一种新型的多元分析方法, 它可以在自变量多重相关的条件下, 有效地构造出对系统解释性最强的子空间, 进行回归建模, 使模型的精度和可靠性得到很大的提高 (王惠文 等, 2000)。本研究中, 首先对两大苹果产区土壤养分和果实矿质元素含量进行特征值、条件数、方差分解比例等诊断, 明确了两大苹果产区土壤养分和果实矿质元素含量间均存在复共线性; 不同产区土壤养分与果实矿质元素间的单因子相关分析得出, 土壤养分与果实矿质元素间的关系错综复杂, 仅用单因子的相关分析不能表明土壤养分与果实矿质元素间的复杂关系, 需要应用多变量分析方法进行深入研究。Casero 等 (2009) 应用偏最小二乘回归方法研究 ‘Golden Smoothee’ 苹果叶片和果实矿质营养元素与果实品质特性的关系时, 获得了影响果实不同品质因子的叶片和果实矿质元素; Rajib 等 (2013) 研究了 M9 自根砧金冠苹果施用 3 种有机肥后土壤、叶片养分含量与果实糖酸类型和香味成分的关系, 应用偏最小二乘回归方法的模型效应权重找出了影响果实糖酸的主要土壤和叶片养分的变量因子。本研究中应用偏最小二乘回归的变量投影重要性方法和 VIP 值 (大于 1.0) 筛选出自变量对目标函数影响的重要程度, 降低了自变量数量, 建立的回归方程更加稳定可靠; 线性规划方法求解出目标函数与自变量间的定量关系; 偏最小二乘回归与线性规划相结合的统计分析, 为多变量、多目标的定量研究提供了方法。

3.2 果实矿质元素与土壤养分的关系和优化方案

苹果树体、叶片和果实的矿质营养元素主要依赖于根系对从土壤中吸收的大量、微量元素运输和分配能力, 果实中的矿质营养元素含量, 不仅与果实品质和贮藏中的生理病害有关 (Fallahi et al., 2010; Grzegorz, 2013; 徐慧 等, 2014), 而且与人类的健康有密切关系 (Gupta & Gupta, 2014)。本研究得出, 土壤养分含量与果实矿质元素含量的相关性均非常弱, 不同产区间也有较大的差异, 除黄土高原产区土壤有效铁、环渤海湾区土壤有效硼含量与果实中的铁、硼含量达到显著和极显著相关外, 其他土壤养分因子与果实矿质元素的直接相关性均较差。这与之前对北京昌平苹果园土壤养分、pH 与果实矿质营养的多元分析 (张强 等, 2011b) 的研究结果基本一致; 环渤海湾产区土壤有效硼含量与果实中的硼含量呈极显著相关性, 这与 Neilsen 和 Neilsen (2009) 的土壤有效硼含量与果实硼含量密切相关的结论相同。环渤海湾产区的土壤全氮、碱解氮与果实钙、铁含量呈负相关, 这与 Fallahi 等 (1997, 2010) 的土壤中氮含量与果实钙含量呈负相关的结论相同。本研究中, 应用偏最小二乘回归建立回归方程与线性规划相结合, 分别获得了环渤海湾产区果实矿质元素含

量的优化值为氮 0.359%、磷 0.101%、钾 0.955%、钙 976.5 mg · kg⁻¹、铁 175.4 mg · kg⁻¹、锌 4.74 mg · kg⁻¹、硼 25.85 mg · kg⁻¹；黄土高原产区果实矿质元素含量的优化值为氮 0.292%、磷 0.079%、钾 0.748%、钙 1 061.3 mg · kg⁻¹、铁 176.3 mg · kg⁻¹、锌 4.89 mg · kg⁻¹、硼 22.72 mg · kg⁻¹。Bennewitz 等 (2011) 研究认为, 乔纳金苹果果实的矿质元素的最佳含量 (干质量) 为氮 0.19%、磷 0.033%、钾 0.62%和钙 0.03%; Malakouti 和 Tarbiat (2006) 研究认为, 苹果果实每百克鲜样中矿质元素最好的含量 (mg) 是氮 40、磷 12、钾 150、钙 7.0、铁 0.20、锌 0.10、硼 0.5, N/Ca 小于 10、K/Ca 小于 20、Ca/Mg 1.4; Ramdane 等 (1998) 研究认为, 苹果生长期 (6—8 月) 果实每百克鲜样中矿质元素含量 (mg) 为氮 47、磷 10、钾 125、钙 5。本优化结果的果实 N/Ca 和 K/Ca 比值均小于报道结果。由于本研究是根据现有的苹果园土壤养分和果实矿质元素的调查资料进行理论计算结果, 关于提高果实矿质元素的施肥措施, 还需根据各个果园土壤养分水平进行相应的田间验证与调整, 最终达到合理配方施肥, 这些工作还有待于进一步研究。

References

- Anonymous. 2010. Apple advantage regional layout plan (from 2008 to 2015). *Agriculture Engineering Technology (Agricultural Product Processing Industry)*, (3): 16 - 17. (in Chinese)
- 佚名. 2010. 苹果优势区域布局规划 (2008—2015年). *农业工程技术 (农产品加工业)*, (3): 16 - 17.
- Awasthi R P, Upadhayay S K. 1996. Correlation and regression analysis of nutrient status in soil and yield of Starking Delicious apple. *Indian Journal of Horticulture*, 53 (2): 92 - 96.
- Bao Shi-dan. 2005. *Soil agricultural chemical analysis*. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- 鲍士旦. 2005. *土壤农化分析*. 3版. 北京: 中国农业出版社.
- Bennewitz E V, Cooper T, Benavides C, Losak T, Hlusek J. 2011. Response of 'Jonagold' apple trees to Ca, K and Mg fertilization in an andisol in southern Chile. *Journal of Soil Science & Plant Nutrition*, 11 (3): 71 - 81.
- Casero T, Benavides A L, Recasens I. 2009. Interrelation between fruit mineral content and preharvest calcium treatments on 'Golden Smoothee' apple quality. *Journal of Plant Nutrition*, 33 (1): 27 - 37.
- Davenport J R, Peryea F J. 1990. Whole fruit mineral element composition and quality of harvested 'Delicious' apples. *Journal of Plant Nutrition*, 13 (6): 701 - 711.
- Fallahi E, Conway W S, Hickey K D, Sams C E. 1997. The role of calcium and nitrogen in postharvest quality and disease resistance of apples. *HortScience*, 32 (5): 831 - 835.
- Fallahi E, Fallahi B, Neilsen G H, Neilsen D, Peryea F J. 2010. Effects of mineral nutrition on fruit quality and nutritional disorders in apples. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 868: 49 - 59.
- Gao Yi-min, Tong Yan-an, Lu Yong-li, Wang Xiao-ying. 2013. Effects of soil available nutrients and long-term fertilization on yield of Fuji apple orchard of Weibei area in Shaanxi, China. *Acta Horticulturae Sinica*, 40 (4): 613 - 622. (in Chinese)
- 高义民, 同延安, 路永莉, 王小英. 2013. 陕西渭北红富士苹果园土壤有效养分及长期施肥对产量的影响. *园艺学报*, 40 (4): 613 - 622.
- Grzegorz L. 2013. The influence of harvest maturity and basic macroelement content in fruit on the incidence of diseases and disorders after storage of the 'Ligol' apple cultivar. *Folia Horticulturae*, 25 (1): 31 - 39.
- Gupta U C, Gupta S C. 2014. Sources and deficiency diseases of mineral nutrients in human health and nutrition. *Pedosphere*, 24 (1): 13 - 38.
- Liang Guan-hui, Liu Lin, Quan Ding-guo, Lü Jia-long. 2013. Soil nutrients of apple orchard in loess tableland of Weibei arid plateau. *Shanxi Porest Science and Technology*, (5): 1 - 4. (in Chinese)
- 梁关会, 刘林, 权定国, 吕家珑. 2013. 渭北黄土台塬区苹果园土壤养分状况分析. *陕西林业科技*, (5): 1 - 4.
- Malakouti M, Tarbiat M. 2006. Quality indices and optimum levels of nutrient in fruits grown on the calcareous soils of Iran. <http://acs.confex.com/crops/wc2006/techprogram/P12599.HTM>.

- Neilsen D, Neilsen G. 2009. Nutritional effects on fruit quality for apple trees. *New York Fruit Quarterly*, 17 (3): 21 - 24.
- Raese J T, Drake S R. 2007. Nitrogen fertilizer influences fruit quality, soil nutrients and cover crops, leaf color and nitrogen content, biennial bearing and cold hardiness of ‘Golden Delicious’. *Journal of Plant Nutrition*, 30 (10): 1585 - 1604.
- Rajib M, Debalina S, Sikdar S K. 2013. Parsimonious use of indicators for evaluating sustainability systems with multivariate statistical analyses. *Clean Technology Environment Policy*, 15 (4): 699 - 706.
- Ramdane D, Raina N, Esmaeil F. 1998. Nitrogen and calcium nutrition and fruit quality of commercial apple cultivars grown in Finland. *Journal of Plant Nutrition*, 21 (11): 2389 - 2402.
- Wang Fu-lin, Men Yong-ge, Ge Shun-feng, Chen Ru, Ding Ning, Peng Fu-tian, Wei Shao-chong, Jiang Yuan-mao. 2013. Research on soil and leaf nutrient diagnosis of ‘Red Fuji’ apple orchard in two-dominant producing areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 46 (14): 2970 - 2978. (in Chinese)
- 王富林, 门永阁, 葛顺峰, 陈 汝, 丁 宁, 彭福田, 魏绍冲, 姜远茂. 2013. 两大优势产区‘红富士’苹果园土壤和叶片营养诊断研究. *中国农业科学*, 46 (14): 2970 - 2978.
- Wang Hai-yun, Jiang Yuan-mao, Peng Fu-tian, Zhao Feng-xia, Sui Jing, Liu Bing-hua. 2008. Study on the relationship between the soil available nutrition and yield in apple orchard of Jiaodong. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 39 (1): 31 - 38. (in Chinese)
- 王海云, 姜远茂, 彭福田, 赵凤霞, 隋 静, 刘丙花. 2008. 胶东苹果园土壤有效养分状况及与产量关系研究. *山东农业大学学报 (自然科学版)*, 39 (1): 31 - 38.
- Wang Hui-wen, Liu Qiang, Tu Yong-ping. 2000. Identification of optimal subspace from PLS regression. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 26 (4): 473 - 476. (in Chinese)
- 王惠文, 刘 强, 屠永平. 2000. 偏最小二乘回归模型内涵分析方法研究. *北京航空航天大学学报*, 26 (4): 473 - 476.
- Xu Hui, Chen Xin-xin, Wang Yong-zhang, Liu Cheng-lian, Yuan Yong-bing. 2014. Correlation and path analysis between mineral element and quality indicators of ‘Fuji’ apple fruits. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30 (25): 116 - 121. (in Chinese)
- 徐 慧, 陈欣欣, 王永章, 刘成连, 原永兵. 2014. ‘富士’苹果果实矿质元素与品质指标的相关性与通径分析. *中国农学通报*, 30 (25): 116 - 121.
- Zhang Qiang, Wei Qin-ping, Liu Hui-ping, Jiang Rui-shan, Liu Xu-dong, Wang Xiao-wei. 2011a. Multivariate analysis and optimum proposals of the relationship between soil nutrients and fruit qualities in apple orchard. *Scientia Agricultura Sinica*, 44 (8): 1654 - 1661. (in Chinese)
- 张 强, 魏钦平, 刘惠平, 蒋瑞山, 刘旭东, 王小伟. 2011a. 苹果园土壤养分与果实品质关系的多元分析及优化方案. *中国农业科学*, 44 (8): 1654 - 1661.
- Zhang Qiang, Wei Qin-ping, Liu Xu-dong, Liu Hui-ping, Jiang Rui-shan, Wang Xiao-wei. 2011b. Multivariate analysis of relationship between soil nutrients, pH and fruit mineral nutrition in Fuji apple orchards of Changping, Beijing. *Journal of Fruit Science*, 28 (3): 377 - 383. (in Chinese)
- 张 强, 魏钦平, 刘旭东, 刘惠平, 蒋瑞山, 王小伟. 2011b. 北京昌平苹果园土壤养分、pH 与果实矿质营养的多元分析. *果树学报*, 28 (3): 377 - 383.
- Zhou Bei-bei, Zhang Qiang, Sun Jian, Li Xing-liang, Wei Qin-ping. 2016. Study and application of partial least squares regression on relationship between soil nutrient and fruit quality. *Journal of Fruit Science*, 33 (1): 106 - 112. (in Chinese)
- 周贝贝, 张 强, 孙 健, 李兴亮, 魏钦平. 2016. 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. *果树学报*, 33 (1): 106 - 112.