

基于最小数据集的贺兰山东麓 葡萄园土壤肥力评价

朱娟娟^{1,2}, 马海军^{1,2}, 李 敏^{1,2}, 倪志婧^{1,2}, 刘雅琴^{1,2}, 王 薇^{1,2}

(1. 北方民族大学生物科学与工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏葡萄与葡萄酒技术创新中心, 宁夏 银川 750021)

摘 要:在宁夏贺兰山东麓银川芦花台、青铜峡甘城子和永宁黄羊滩 3 个葡萄产区选取具有代表性的酿酒葡萄园,通过测定表征土壤肥力的 16 个指标,利用主成分分析建立贺兰山东麓葡萄园土壤肥力质量评价的最小数据集,并结合模糊数学评价各产区葡萄园土壤肥力质量。结果表明,研究区 16 个土壤理化指标中速效磷为强度变异,碱解氮、速效钾、有效铜、交换态盐基钙、胡敏酸、富里酸、腐殖质、硒、有效硼、有机质、胡敏素、全钙、全硼和全铜为中等变异,pH 值为弱变异。不同产区相比较,银川芦花台土壤有机质、胡敏素、有效硼和速效磷含量比青铜峡甘城子和永宁黄羊滩分别高 53.7%、20.3%、17.2%、334.8%和 44.4%、19.9%、13.8%、15.4%;永宁黄羊滩土壤腐殖质、富里酸、胡敏酸、碱解氮、速效钾、全钙、交换态盐基钙、全铜和有效铜含量比银川芦花台和青铜峡甘城子分别高 13.1%、6.1%、9.9%、5.9%、25.8%、4.5%、63.7%、36.1%、30.6%和 31.9%、25.5%、45.4%、77.7%、30.8%、10.9%、59.3%、28.6%、79.3%;土壤 pH 值比银川芦花台和青铜峡甘城子分别低 4.28%和 4.95%;青铜峡甘城子土壤全硼含量比银川芦花台和永宁黄羊滩分别高 12.6%和 14.4%。通过主成分分析,贺兰山东麓葡萄园土壤肥力评价的最小数据集为有机质、pH 值、速效磷、全硼和有效硼 5 个指标。综合评价,银川芦花台土壤肥力指数为 0.543,属于中等肥力;青铜峡甘城子和黄羊滩土壤肥力指数分别为 0.343 和 0.460,属于低等肥力。通过相关性分析,全部数据集指标建立的 SFI 值(SFI-TDS)与最小数据集指标建立的 SFI 值(SFI-MDS)间呈极显著正相关,相关系数达到 0.914,故利用最小数据集指标能够代替全部数据集指标评价宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤肥力状况。

关键词:葡萄园;土壤肥力;主成分分析;最小数据集;贺兰山东麓

中图分类号:S158;S663.1 **文献标志码:**A

Comprehensive evaluation of vineyards soil fertility in the eastern foothills of Helan Mountain based on the minimum data set

ZHU Juanjuan^{1,2}, MA Haijun^{1,2}, LI Min^{1,2}, NI Zhijing^{1,2}, LIU Yaqin^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2 Ningxia Grape & Wine Innovation Center, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Soil fertility assessment of vineyards in the eastern foothills of Helan Mountain was performed using the minimum data set (MDS) established by Principal Component Analysis (PCA) and soil fertility index (SFI) calculated with PCA and fuzzy mathematics. The investigated zone included the grape production regions of Luhutai of Yinchuan, Ganchengzi of Qingtongxia, and Huangyangtan of Yongning. Sixteen soil physico-chemical indicators were measured including organic matter, humus, fulvic acid, humic acid, humin, available potassium (K), alkaline hydrolyzable-nitrogen (N), available phosphorus (P), pH values, total calcium (Ca), exchangeable Ca, total copper (Cu), available Cu, total boron (B), available B, and selenium (Se). Results showed that soil available P was the severe variation parameter; alkaline hydrolyzable-N, available K, available Cu, exchangeable Ca, humic acid, fulvic acid, humus, Se, available B, organic matter, humin, total Ca, total B, and total Cu were the intermediate variations parameters; and pH value was least variation parameter. The content of soil organic

收稿日期:2019-08-03

修回日期:2020-02-19

基金项目:宁夏高等学校科学研究项目 (NGY2016158);宁夏自然科学基金项目 (2018AAC03104);北方民族大学人才引进启动基金项目

作者简介:朱娟娟 (1981-),女,宁夏隆德人,博士,讲师,研究方向为葡萄栽培与酿造。E-mail:zj0954@163.com

通信作者:马海军 (1974-),男,副教授,主要从事葡萄栽培与酿造研究。E-mail:mahaijun2007@126.com

matter, humin, available B and available P in Luhutai of Yinchuan were higher by 53.7%, 20.3%, 17.2%, 334.8%, 44.4%, 19.9%, 13.8%, and 15.4% than those in Ganchengzi of Qingtongxia and Huangyangtan of Yongning, respectively. The content of humus, fulvic acid, humic acid, alkaline hydrolyzable-N, available K, total Ca, exchangeable Ca, total Cu and available Cu in Huangyangtan of Yongning were higher by 13.1%, 6.1%, 9.9%, 5.9%, 25.8%, 4.5%, 63.7%, 36.1%, 30.6%, and 31.9%, 25.5%, 45.4%, 77.7%, 30.8%, 10.9%, 59.3%, 28.6%, 79.3% than those in Luhutai of Yinchuan and Ganchengzi of Qingtongxia, respectively, while the soil pH value was lower by 4.28% and 4.95%, respectively. The content of total B in Ganchengzi of Qingtongxia was higher by 12.6% and 14.4% than that in Luhutai of Yinchuan and Huangyangtan of Yongning, respectively. Through principal component analysis, the minimum data set was organic matter, pH value, available P, total B and available B for soil fertility evaluation of vineyards in the eastern foothills of Helan Mountain. Comprehensive evaluation showed that SFI of Luhutai of Yinchuan was 0.543 being classified as medium fertility, SFI of Ganchengzi of Qingtongxia and Huangyangtan of Yongning were 0.343 and 0.460, respectively, being classified as low fertility. According to analysis of correlation, SFI-TDS values were positively correlated with SFI-MDS values and the correlation coefficient reached to 0.914. Therefore, the minimum data set can be used to evaluate the soil fertility of vineyards in the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia instead of whole data set.

Keywords: vineyards; soil fertility; PCA; the minimum data set; the eastern foothills of Helan Mountain

葡萄(*Vitisvinifera* L.)属于葡萄科葡萄属植物,是比较耐旱的果树树种。目前,宁夏葡萄种植面积达到4万 hm^2 ,其中酿酒葡萄3.5万 hm^2 ,葡萄酒庄184家,年产葡萄酒10.0万t,产值200亿元,已初步形成以银川市、青铜峡市、红寺堡区、农垦系统和石嘴山市五大葡萄种植基地为主体的贺兰山东麓葡萄产业带,成为中国最大葡萄酒产区之一^[1]。葡萄酒质量主要取决于原料品质,而葡萄园土壤肥力的高低直接影响葡萄养分的供应,并进一步影响果实的生长发育、产量和品质^[2]。因此,对贺兰山东麓葡萄园土壤肥力综合评价对宁夏葡萄酒产业的可持续发展具有指导性的作用。

有机质是土壤的重要组成部分,在土壤形成过程中都具有极其重要的作用^[3],直接影响土壤属性和土壤结构^[4],也是土壤微生物生命活动所需养分和能量的重要来源,故有机质含量的高低通常表明土壤质量的优劣^[5]。腐殖质是土壤有机质的主要组成物质,一般占有有机质总量的50%~70%,且腐殖质组成成分是衡量其品质的重要指标,直接与土壤理化性状相关,最终影响土壤肥力。胡敏酸是土壤腐殖质最重要组分,其组成、结构和性质的变化直接与土壤的保肥和供肥性质相关,对土壤结构的形成起着重要作用。富里酸是腐殖质中分子量较小、活性和氧化程度较高的组分,它既是形成胡敏酸的一级物质,又是胡敏酸分解的一级产物,在胡敏酸的积累和更新中起着重要作用^[6]。胡敏素是腐殖质中与土壤矿物质结合最紧密的组分,占大部分腐殖质中的有机C和有机N,从而影响碳截获、土壤结

构、养分保持性、氮素循环以及生物地球化学循环等^[7]。同时,土壤中矿质元素为葡萄生长发育提供营养,氮、磷、钾是植物生长发育的基本元素;钙离子参与植物种子萌发、生长分化、形态建成、开花结果等生长时期的整个过程,对其生理活动具有广泛的调节作用^[8];铜是多种酶的活性中心和辅因子,广泛参与植物生长发育过程中的多种代谢^[9];硼促进花粉萌发和花粉管的伸长,对果树受精有着显著的影响^[9];硒能够提高作物体内营养成分的含量,从而改善果实品质,且调控光合和呼吸作用。硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组分,GSH-Px可清除脂氢过氧化物所产生的自由基,降低膜受氧化损害,具有抗氧化和拮抗环境毒害功能^[10-11]。此外,土壤酸碱性是土壤许多化学性质的综合反映,不仅表征土壤肥力状况,还直接影响着土壤养分的有效性以及调控土壤中微量元素的形态与迁移,对植物生长发育有着重要影响^[12]。利用土壤物理、化学和生物指标对土壤肥力状况进行综合评价在农业科学工作中占重要地位,为精准农业发展奠定基础^[13]。

前人^[14-16]从土壤质地、土壤团聚体、土壤容重、土壤表层孔隙、土壤酸碱度以及土壤常规营养元素等方面剖析了宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园土壤肥力质量,而对土壤腐殖质及其组成含量鲜有报道。因此,本研究选取贺兰山东麓银川产区、青铜峡产区和永宁产区的酿酒葡萄通过测定土壤有机质、腐殖质、富里酸、胡敏酸和胡敏素含量,结合土壤酸碱度以及土壤营养元素,采用主成分分析与模糊数学

相结合的方法,构建贺兰山东麓葡萄园土壤肥力评价最小数据集(MDS),实现本区土壤肥力质量综合评价,旨在为宁夏优势特色酿酒葡萄的高产优质高效栽培提供科学依据,为宁夏葡萄酒产业可持续发展奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于宁夏回族自治区贺兰山东麓酿酒葡萄产区(105°45′~106°47′E,37°43′~39°23′N),属中温带干旱气候区,气候干燥,风大沙多,多年平均降水量 180~200 mm,多年平均蒸发量 1 312.0~2 204.0 mm,温差大、光热资源丰富,年平均日照时数 2 800~3 000 h,年均气温 8.5℃、≥10℃有效积温 3 135~3 272℃、昼夜温差 10℃~15℃,日照率 67%,无霜期 180 d。该区域为贺兰山洪积扇与黄河冲积平原之间的狭长地带,土壤类型以灰钙土为主。

1.2 样品采集与分析

2016 年 10 月—2017 年 10 月在宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄主产区银川芦花台、青铜峡甘城子和永宁黄羊滩选取具有代表性的酿酒葡萄园,采集土样 150 个。每个果园采用“S”型布点选取采样树 10~15 株,在采样树的树冠滴水线(避开施肥穴、施肥沟)四周选 5 个采样点,每个采样点取 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 五层土壤约 200 g,除去植物根、石块等杂质,10~15 株树的采样点采集的土壤混合均匀后,采用四分法取土样约 500 g,编号登记后带回实验室,风干、磨细,过 20 目尼龙筛,置于干燥、避光容器中保存,待测定分析用。

为建立土壤肥力质量评价最小数据集,共选择 16 个指标,包括:有机质、腐殖质、富里酸、胡敏酸、胡敏素、碱解氮、有效钾、有效磷、pH 值、全钙、交换态盐基钙、全铜、有效铜、全硼、有效硼、硒。其中有机质测定用重铬酸钾-浓硫酸-外加热法;碱解氮用碱解扩散法;速效钾用乙酸铵浸提-上分 FP-6450 火焰光度计;有效磷用钼锑抗比色法;pH 值用电位法测定;腐殖质、富里酸、胡敏酸和胡敏素用腐殖质组成修改法,主要是参照索森等^[17]测定方法。微量元素全量分析,全铜和全钙采用王水-高氯酸-火焰法;有效铜和交换态盐基钙采用 DTPA 浸提-原子吸收测定法;全硼采用磷酸-硝酸-高氯酸-氢氟酸四酸分解,电感耦合等离子体发射光谱法测定;有效硼采用甲亚胺法测定;硒采用微波消解-原子吸收法测定,各指标进行 3 次平行测定,结果取平均值。

1.3 土壤肥力评价方法

1.3.1 最小数据集建立 首先利用 AVOVA 分析贺兰山东麓 3 个产区葡萄园之间土壤肥力差异情况,剔除差异不显著指标,随后对差异性指标进行主成分分析(PAC),选择特征值≥1 的主成分,每个主成分中选取因子载荷绝对值达到该主成分中最大因子载荷 90%的指标进入最小数据集中的候选指标。当一个主成分中仅有一个高因子载荷指标,则该指标进入最小数据集(MDS);当一个主成分中不止有一个高因子载荷指标,则对其进行相关性分析。若相关系数高($r>0.5$)时,则相关系数之和最大的高因子载荷指标进入 MDS;若相关系数低($r<0.5$)时,各候选指标均被选入 MDS。

1.3.2 土壤肥力评价指数构建 土壤肥力评价指标(SFI)的计算公式为:

$$SFI = \sum_i^n W_i N_i$$

式中, W_i 为指标权重, N_i 为指标隶属度, n 为指标个数,SFI 值的范围为 0~1,高 SFI 值代表土壤肥力质量良好。其中,各指标权重均由主成分分析获得,评价指标权重值为各指标公因子方差与总公因子方差之比^[18-19]。

评价指标的隶属度由其所属的隶属度函数确定。因土壤因子的变化具有连续性,故采用具有连续性的隶属度函数对各土壤因子评价指标进行标准化,并运用主成分因子负荷量值的正负性来确定隶属度函数分布的升降型,评价指标的最小值和最大值作为函数的转折点^[20-21]。由于土壤中某一养分含量不可能为零,因此最小值参考金慧芳等^[21]设置为 0.1,则隶属度值取值范围为 0.1~1.0,最大值 1.0 表示土壤肥力非常适合作物生长,最低值 0.1 表示土壤肥力严重缺乏。

1.4 统计分析

采用 SPSS 16.0 软件进行数据描述性统计(Descriptive Statistics)和方差分析(AVOVA),利用因子分析(Factor Analysis)对土壤性质进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤理化指标一般性描述

对宁夏贺兰山东麓酿酒葡萄园 0~100 cm 土层的有机质、腐殖质、富里酸、胡敏酸、胡敏素、碱解氮、速效钾、速效磷、pH 值以及矿质元素全钙、交换态钙、全铜、有效铜、全硼、有效硼、硒含量等 16 项土壤肥力指标一般性描述(表 1)可知:不同产区土壤养分含量存在差异,其中差异最大指标为速效磷,

含量变幅为 0.20~476.0 mg · kg⁻¹,相差 474 mg · kg⁻¹,相对极差达到 16.8%,变异系数超过 100%,属于强变异;碱解氮、速效钾、有效铜、交换态钙、胡敏酸、富里酸、腐殖质、硒、有效硼、有机质、胡敏素、全钙、全硼和全铜变异系数均在 10%~100%,属于中等变异;pH 值变异系数低于 10%,属于弱变异。

2.2 宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤理化指标分析

2.2.1 土壤有机质含量 由表 2 可知,有机质、腐殖质、富里酸、胡敏酸和胡敏素含量均随土层的加深逐渐减少。不同产区相比较,0~100 cm 各土层中有机质含量均存在显著差异($P<0.05$),而腐殖质、富里酸、胡敏酸和胡敏素含量因土层不同差异性有所不同。整体而言,银川芦花台产区有机质、胡敏素含量最高,较青铜峡甘城子和永宁黄羊滩产区分别平均高 53.7%、44.4%和19.9%、20.3%;永宁黄羊滩产区腐殖质、富里酸、胡敏酸含量最高,分别比银川芦花台和青铜峡甘城子产区平均高 13.1%、

6.1%、9.9%和 31.9%、25.5%、45.4%。

2.2.2 土壤酸碱度和大量元素含量 由表 3 可知,宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤均为碱性土壤,但不同产区间 0~20 cm 土层的 pH 值存在显著差异,而 20~100 cm 各土层中均无显著差异;其中青铜峡甘城子葡萄园土壤 pH 值最高,银川芦花台次之,永宁黄羊滩最低。同时,碱解氮、速效钾和速效磷含量均随土层深度的增加逐渐减少。与表土层(0~20 m)相比,碱解氮、速效钾和速效磷在 20~40 cm 土层分别平均减少 10.9%、10.3%和 34.2%;在 40~60 cm 土层分别平均减少 28.0%、18.8%和 78.3%;在 60~80 cm 土层分别平均减少 54.0%、61.3%和88.5%;在 80~100 cm 土层分别平均减少 48.0%、59.3%和 88.1%。不同产区间相比较,青铜峡甘城子产区的土壤碱解氮、速效钾和速效磷含量明显低于银川芦花台和永宁黄羊滩产区,而银川芦花台和永宁黄羊滩产区区间无显著性差异。

表 1 宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤肥力指标描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistical analysis of soil fertility indexes in vineyardsof the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia								
描述性 统计量 Descriptive statistics	有机质 Organic matter /(g · kg ⁻¹)	腐殖质 Humus /(g · kg ⁻¹)	富里酸 Fulvic acid /(g · kg ⁻¹)	胡敏酸 Humic acid /(g · kg ⁻¹)	胡敏素 Humin /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N /(mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg · kg ⁻¹)
极小值 Minimum	4.02	0.581	0.223	0.301	1.14	6.44	47.5	0.2
极大值 Maximum	13.74	4.17	2.87	1.73	3.98	70.8	320.7	476
极差 Rang	9.71	3.59	2.64	1.42	2.84	64.4	273.2	474
均值 Mean	8.38	1.72	0.973	0.784	2.07	24	100.7	28.4
标准差 Standard deviation	2.55	0.626	0.381	0.31	0.571	13.4	49.1	76.1
相对极差/% Relative rang	1.16	2.1	2.72	1.82	1.37	2.68	2.71	16.8
变异系数/% CV	30.4	36.5	39.1	39.5	27.6	55.9	48.7	268.6

描述性 统计量 Descriptive statistics	pH 值 pH values	全钙 Total Ca /(g · kg ⁻¹)	交换态钙 Exchange Ca /(cmol · kg ⁻¹)	全铜 Total Cu /(mg · kg ⁻¹)	有效铜 Available Cu /(mg · kg ⁻¹)	全硼 Total B /(mg · kg ⁻¹)	有效硼 Available B /(mg · kg ⁻¹)	硒 Selenium /(mg · kg ⁻¹)
极小值 Minimum	7.84	20.7	1.96	10.2	0.347	12.4	0.25	0.062
极大值 Maximum	9.1	87.4	11.7	27.3	2.27	57.9	1.00	0.53
极差 Rang	1.26	66.7	9.72	17.11	1.92	45.6	0.75	0.468
均值 Mean	8.29	57.4	4.28	15.9	1.08	44.9	0.547	0.242
标准差 Standard deviation	0.352	13.4	1.76	3.00	0.499	7.3	0.178	0.088
相对极差/% Relative rang	0.152	1.16	2.27	1.07	1.78	1.01	1.37	1.93
变异系数/% CV	4.3	23.4	41.1	18.7	46.2	16.3	32.5	36.2

表 2 宁夏贺兰山东麓葡萄酒园土壤有机质垂直分布

Table 2 Vertical distribution of soil organic matter in different vineyards in Helan Mountain of Ningxia

土层/cm Soil layer	产区 Planting region	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	腐殖质/(g·kg ⁻¹) Humus	富里酸/(g·kg ⁻¹) Fulvic acid	胡敏酸/(g·kg ⁻¹) Humic acid	胡敏素/(g·kg ⁻¹) Humin
0~20	芦花台 Luhutai	12.1±0.228a	2.45±0.060a	1.29±0.029a	1.07±0.036a	2.74±0.094a
	甘城子 Ganchengzi	8.3±0.327c	1.93±0.092b	1.00±0.041b	0.94±0.060a	1.99±0.066b
	黄羊滩 Huangyangtan	10.2±0.253b	2.71±0.379a	1.52±0.355a	1.19±0.042a	2.22±0.151b
20~40	芦花台 Luhutai	11.4±0.458a	2.22±0.214a	1.04±0.201ab	1.00±0.076a	2.97±0.074a
	甘城子 Ganchengzi	6.8±0.250c	1.46±0.084b	0.88±0.130b	0.58±0.086b	1.75±0.062b
	黄羊滩 Huangyangtan	9.7±0.827b	2.54±0.420a	1.35±0.342a	1.19±0.091a	2.41±0.111ab
40~60	芦花台 Luhutai	9.7±0.852a	1.51±0.180a	1.00±0.072a	0.75±0.080a	2.63±0.203a
	甘城子 Ganchengzi	7.5±1.422b	1.68±0.332a	0.95±0.213a	0.73±0.121a	1.76±0.217b
	黄羊滩 Huangyangtan	8.2±0.583a	1.73±0.092a	0.90±0.039a	0.827±0.068a	2.21±0.261ab
60~80	芦花台 Luhutai	8.6±0.335a	1.19±0.216a	0.83±0.175a	0.55±0.049a	1.94±0.217a
	甘城子 Ganchengzi	4.5±0.498b	0.79±0.204a	0.40±0.177b	0.39±0.027a	1.52±0.109a
	黄羊滩 Huangyangtan	6.8±0.175ab	1.36±0.123a	0.70±0.096ab	0.66±0.039a	1.65±0.112a
80~100	芦花台 Luhutai	8.0±0.286a	1.04±0.139a	0.82±0.061a	0.60±0.028ab	2.04±0.094a
	甘城子 Ganchengzi	5.3±0.199b	1.35±0.391a	0.98±0.343a	0.36±0.049b	1.51±0.373a
	黄羊滩 Huangyangtan	7.2±0.590a	1.32±0.115a	0.71±0.070a	0.61±0.065a	1.63±0.137a

注:不同字母表示相同指标在同一土层不同产区间存在差异显著性($P<0.05$),下同。
Note: Different letters indicate that the same index has significant difference among different production areas under the same soil layer. The same below.

表 3 宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤酸碱度和大量元素含量垂直分布

Table 3 Vertical distribution of soil acidity and microelements in different vineyards in Helan Mountain of Ningxia

土层/cm Soil layer	产区 Planting region	pH 值 pH values	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkaline N	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available K	速效磷/(g·kg ⁻¹) Available P
0~20	芦花台 Luhutai	8.5±0.040b	36.2±2.012a	137.1±5.98ab	97.5±21.26a
	甘城子 Ganchengzi	8.8±0.037a	23.2±2.560b	113.4±9.17b	19.8±5.58b
	黄羊滩 Huangyangtan	8.1±0.091c	38.4±2.191a	172.5±12.03a	84.9±16.26a
20~40	芦花台 Luhutai	8.4±0.069a	34.6±2.522a	121.5±11.33ab	61.9±9.07a
	甘城子 Ganchengzi	8.4±0.076a	15.8±2.034b	105.2±6.43b	17.4±6.73b
	黄羊滩 Huangyangtan	8.0±0.086a	36.7±3.900a	152.9±16.23a	53.9±16.62a
40~60	芦花台 Luhutai	8.4±0.053a	23.8±3.204a	105.0±24.22a	20.0±4.17a
	甘城子 Ganchengzi	8.4±0.062a	21.4±5.734a	106.4±17.90a	6.4±3.22b
	黄羊滩 Huangyangtan	8.1±0.063a	25.2±1.804a	132.1±33.97a	17.4±5.11a
60~80	芦花台 Luhutai	8.4±0.031a	20.9±3.484a	48.1±10.28a	13.5±2.33a
	甘城子 Ganchengzi	8.5±0.160a	6.4±0.125b	54.7±7.20a	1.5±0.60b
	黄羊滩 Huangyangtan	8.0±0.017a	17.6±2.543a	61.1±6.38a	8.3±2.44a
80~100	芦花台 Luhutai	8.4±0.075a	16.7±1.134ab	48.6±6.79a	10.6±1.52a
	甘城子 Ganchengzi	8.3±0.030a	12.0±5.600b	63.0±13.25a	1.7±1.48b
	黄羊滩 Huangyangtan	8.1±0.044a	22.1±2.597a	60.5±7.32a	11.9±3.18a

2.2.3 土壤中量和微量元素含量 由表 4 可知,土壤全钙、交换态盐基钙和全硼含量随着土层深度的增加呈先增后降趋势,而全铜、有效铜、有效硼和硒含量随土层深度的增加逐渐降低。银川芦花台土壤全铜、有效铜、全硼、有效硼和硒含量均在 0~20 cm 土层中最高,全钙含量在 20~40 cm 土层中最高,交换态盐基钙含量在 40~60 cm 土层中最高;青铜峡甘城子葡萄园全钙含量也为 20~40 cm 土层中最高,交换态盐基钙、全铜、有效铜、全硼和有效硼含量在 40~60 cm 土层中最高,硒含量 60~80 cm 土层中最高。永宁黄羊滩土壤全铜、有效铜、有效硼和硒含量在 0~20 cm 土层中最高;全硼含量在 20~

40 cm 土层中最高;全钙和交换态盐基钙含量在 40~60 cm 土层中最高。不同产区相比较,土壤全钙、交换态盐基钙、全铜、有效铜、全硼、有效硼和硒含量在 0~20 cm 土层均存在显著性差异,银川芦花台和永宁黄羊滩产区土壤钙、铜、硼和硒含量均显著高于青铜峡甘城子产区。

2.3 宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤肥力指标间相关性分析

主成分分析(PAC)是综合评价宁夏贺兰山东麓不同产区土壤肥力质量的基础,而肥力指标间存在显著相关性是进行 PAC 分析的前提条件。由表 5 可知,土壤有机质、腐殖质、富里酸、胡敏酸和胡敏

表 4 宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤宏观-和微量元素在贺兰山不同葡萄园中的垂直空间变化

Table 4 Vertically spatial variation of soil macro- and micro-nutrients in different vineyards of the eastern foothills of Helan Mountain in Ningxia

土层/cm Soil layer	产区 Planting region	全钙/(g·kg ⁻¹) Total Ca	交换态钙/(cmol·kg ⁻¹) Exchangeable Ca	总铜/(mg·kg ⁻¹) Total Cu	有效铜/(mg·kg ⁻¹) Available Cu	全硼/(mg·kg ⁻¹) Total B	有效硼/(mg·kg ⁻¹) Available B	硒/(mg·kg ⁻¹) Selenium
0~20	芦花台 Luhuatai	51.3±0.764b	3.67±0.102b	17.5±0.461b	1.62±0.037b	47.5±1.491a	0.732±0.0254a	0.319±0.0084a
	甘城子 Ganchengzi	36.5±1.896c	3.17±0.199b	12.9±0.341c	0.67±0.039c	39.2±1.164b	0.456±0.0238c	0.160±0.0129b
	黄羊滩 Huangyangtan	59.6±2.635a	6.21±0.400a	19.6±0.601a	1.85±0.156a	43.1±1.541ab	0.593±0.0949b	0.324±0.0553a
20~40	芦花台 Luhuatai	63.9±6.344a	4.03±0.143a	16.6±0.734a	1.05±0.053ab	41.7±5.76a	0.608±0.0201a	0.253±0.0185a
	甘城子 Ganchengzi	64.6±8.901a	4.63±0.083a	13.9±0.159a	0.81±0.062b	47.8±4.95a	0.450±0.0341a	0.218±0.0253a
	黄羊滩 Huangyangtan	64.0±6.024a	5.68±0.375a	17.8±0.575a	1.31±0.053a	44.0±1.88a	0.501±0.0251a	0.260±0.0281a
40~60	芦花台 Luhuatai	61.1±5.177a	4.84±0.286b	16.9±2.299a	0.85±0.049a	42.1±7.108 a	0.538±0.0359a	0.250±0.0214a
	甘城子 Ganchengzi	55.6±9.991a	4.84±0.383b	14.7±1.685a	0.81±0.052a	51.6±4.032 a	0.543±0.0320a	0.209±0.0167a
	黄羊滩 Huangyangtan	67.3±2.190a	7.71±0.883a	17.75±0.615a	1.03±0.046a	41.2±0.526 a	0.360±0.0417b	0.266±0.0222a
60~80	芦花台 Luhuatai	52.9±6.405a	3.51±0.327b	15.0±0.642a	0.43±0.021b	39.4±3.392 a	0.447±0.0385a	0.205±0.0157b
	甘城子 Ganchengzi	52.0±3.110a	3.42±0.232b	12.6±0.445a	0.42±0.017b	51.2±0.495 a	0.463±0.0274a	0.291±0.0131a
	黄羊滩 Huangyangtan	56.5±5.714a	7.16±0.621a	16.4±0.520a	0.77±0.036a	41.0±1.911 a	0.496±0.0419a	0.216±0.0205b
80~100	芦花台 Luhuatai	53.9±3.751a	3.69±0.136a	15.2±0.964a	0.43±0.056a	41.8±4.280 a	0.403±0.0436a	0.202±0.0174a
	甘城子 Ganchengzi	58.1±9.445a	4.22±0.067a	13.3±0.185a	0.48±0.035a	49.4±0.969 a	0.410±0.0582a	0.262±0.016 a
	黄羊滩 Huangyangtan	48.4±3.623a	5.55±0.541a	15.4±0.457a	0.76±0.106a	39.8±1.269 a	0.448±0.0409a	0.206±0.0188a

表 5 贺兰山东麓葡萄园土壤肥力指标间相关性系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix of soil fertility indexes in different vineyards of the eastern foothill of Helan Mountain

土壤肥力指标 Soil fertilizer indicator	有机质 Organic matter	腐殖质 Humus	富里酸 Fulvic acid	胡敏酸 Humic acid	胡敏素 Hummin	pH 值 pH values	碱解氮 Alkaline N	速效钾 Available K	速效磷 Available P	全钙 Total Ca	交换态钙 Exchange Ca	全铜 Total Cu	有效铜 Available Cu	有效硼 Available B
腐殖质 Humus	0.79 **	1												
富里酸 Fulvic acid	0.67 **	0.93 **	1											
胡敏酸 Humic acid	0.80 **	0.89 **	0.64 **	1										
胡敏素 Hummin	0.83 **	0.61 **	0.47 **	0.65 **	1									
pH 值 pH values	-0.10	-0.07	-0.09	-0.02	-0.03	1								
碱解氮 Alkaline hydrolyzable-N	0.76 **	0.73 **	0.57 **	0.78 **	0.64 **	-0.26 **	1							
速效钾 Available K	0.52 **	0.58 **	0.46 **	0.61 **	0.47 **	0.002	0.55 **	1						
速效磷 Available P	0.49 **	0.37 **	0.32 **	0.35 **	0.36 **	-0.23 *	0.55 **	0.32 **	1					
全钙 Total Ca	0.17	0.10	0.10	0.08	0.20 *	-0.73 **	0.21 *	0.15	0.06	1				
交换态钙 Exchange Ca	-0.08	0.001	0.04	-0.04	-0.05	-0.77 **	0.08	-0.002	0.01	0.59 **	1			
全铜 Total Cu	0.56 **	0.48 **	0.46 **	0.41 **	0.54 **	-0.60 **	0.52 **	0.31 **	0.22 *	0.62 **	0.49 **	1		
有效铜 Available Cu	0.76 **	0.63 **	0.61 **	0.54 **	0.65 **	-0.37 **	0.64 **	0.44 **	0.40 **	0.43 **	0.14	0.81 **	1	
全硼 Total B	0.20 *	0.16	0.17 *	0.11	0.21 *	-0.30 **	0.18 *	0.17 *	0.14	0.37 **	0.07	0.36 **	0.44 **	1
有效硼 Available B	0.70 **	0.47 **	0.35 **	0.52 **	0.60 **	-0.19	0.70 **	0.29 **	0.59 **	0.19	-0.11	0.49 **	0.63 **	0.33 **
硒 Selenium	0.57 **	0.44 **	0.45 **	0.35 **	0.46 **	-0.48 **	0.45 **	0.31 **	0.33 **	0.53 **	0.26 *	0.67 **	0.77 **	0.51 **

注: * 表示在 0.05 水平上达到显著相关; * * 表示在 0.01 水平上达到显著相关。
Note: * indicates a significant correlation at the 0.05 level; * * indicates a significant correlation at the 0.01 level.

素含量与碱解氮、速效钾、速效磷、全铜、有效铜、有效硼和硒含量间在 0.01 置信水平上均存在极显著正相关;pH 值与碱解氮、速效磷、全钙、交换态钙、全铜、有效铜、全硼、硒含量间均存在显著性负相关;碱解氮与速效钾含量呈极显著正相关;全硼含量与有机质、富里酸、胡敏素、碱解氮、速效钾、全钙、全铜、有效铜、硒含量间均存在显著正相关;有效硼含量与碱解氮、速效钾、速效磷、全铜、有效铜、全硼和硒含量间也存在显著正相关。如果直接用上述指标进行土壤肥力质量的综合评价,必然造成信息的重叠,从而影响评价结果的客观性。因此,以主成分分析为基础,运用加权综合法和模糊数学中的加乘法综合评价宁夏贺兰山东麓不同产区酿酒葡萄园土壤肥力质量。

2.4 贺兰山东麓葡萄园土壤肥力质量评价

2.4.1 最小数据集建立 经 ANOVA 分析,不同产区间 16 个土壤肥力指标均存在显著差异性,随后将 16 个指标进行主成分分析,如表 6 所示。由表 6 可知,特征值≥1 的 4 个主成解释方差变异累积达到 78.95%,说明提取的 4 个主成分能够解释绝大多数变异。PC1 中高因子载荷的指标包括有机质、腐殖质、碱解氮和有效铜 4 个指标,然而有机质、腐殖质、碱解氮和有效铜之间的相关系数>0.5(表 5),达到极显著水平,从而 PC1 中有机质选入最小数据集。PC2 中高因子载荷的指标有 pH 值、全钙和交换态盐基钙 3 个指标,其中 pH 值与全钙和交换态盐基钙的相关系数均>0.5(表 5),达到极显著水平,且 pH 值与其他两个指标的相关系数之和最大,从而 PC2 中 pH 值选入最小数据集。PC3 中高因子载荷的指标是全硼和有效硼,但全硼和有效硼相关系数<0.5(表 5),从而全硼和有效硼均选入最小数据集。PC4 中高因子载荷的指标只有速效磷,则速效磷进入最小数据集。因此,贺兰山东麓酿酒葡萄园土壤肥力评价的最小数据集包括有机质、pH 值、速效磷、全硼和有效硼 5 个指标。

2.4.2 土壤肥力评价指数 土壤肥力评价指数(SFI)构建涉及肥力指标的权重和隶属度。首先对全部数据集指标和最小数据集指标分别做主成分分析,获得各指标的公因子方差,计算各指标的权重值,如表 7 所示。由表 7 可知,全部数据集中有机质、腐殖质、pH 值和交换态盐基钙含量具有较高的权重含量;速效磷含量具有较低的权重含量;在最小数据集中,有机质和有效硼的权重含量最高,pH 值次之,速效磷和全硼的权重含量最低。

土壤肥力评价指标的隶属度由各指标所属的隶属度函数确定。隶属度函数一般分为升型和降型,根据贺兰山东麓葡萄园各指标对土壤肥力的正负效应,16 个肥力指标中 pH 值对土壤肥力为负效应,则采用降型隶属度函数,而其它肥力指标对土壤

表 6 显著差异性土壤肥力指标主成分载荷矩阵

Table 6 Rotated principal component matrix of each soil indicator

土壤肥力指标 Soil nutrient indicator	主成分变量(载荷值) Principal component variable			
	1	2	3	4
有机质 Organic matter	0.895	0.281	0.047	-0.007
腐殖质 Humus	0.834	0.332	-0.339	0.102
富里酸 Fulvic acid (FA)	0.733	0.233	-0.345	0.192
胡敏酸 Humic acid (HA)	0.786	0.385	-0.263	-0.030
胡敏素 Humin (HM)	0.773	0.223	0.093	0.060
pH 值 pH values	-0.371	0.826	0.080	0.268
碱解氮 Alkaline N	0.842	0.170	-0.038	-0.284
速效钾 Available K	0.607	0.248	-0.231	0.076
速效磷 Available P	0.542	0.122	0.330	-0.596
全钙 Total Ca	0.417	-0.757	-0.053	0.057
交换态钙 Exchange Ca	0.169	-0.781	-0.434	-0.232
全铜 Total Cu	0.764	-0.459	-0.069	0.085
有效铜 Available Cu	0.879	-0.142	0.141	0.173
全硼 Total B	0.393	-0.330	0.498	0.464
有效硼 Available B	0.725	0.123	0.475	-0.258
硒 Selenium	0.725	-0.363	0.186	0.243
主成分特征值 Eigenvalues	7.524	2.899	1.209	1.000
主成分贡献率/% Variance explained	47.02	18.12	7.56	6.25
累积贡献率/% Cumulative variance explained	47.02	65.14	72.70	78.95

表 7 基于全部肥力指标数据集和最小数据集公因子方差及权重

Table 7 The common factor variance and weight based on the total data set and the minimum data set

土壤肥力指标 Soil fertilizer indicator	全部数据集 Total data sets		最小数据集 Minimum data sets	
	公因子方差 Common factor variance	权重 Weights	公因子方差 Common factor variance	权重 Weights
有机质 Organic matter	0.883	0.070	0.762	0.217
腐殖质 Humus	0.931	0.074		
富里酸 Fulvic acid	0.746	0.059		
胡敏酸 Humic acid	0.836	0.066		
胡敏素 Humin	0.660	0.052		
pH 值 pH value	0.898	0.071	0.690	0.197
碱解氮 Alkaline N	0.821	0.065		
速效钾 Available K	0.489	0.039		
速效磷 Available P	0.772	0.061	0.625	0.178
全钙 Total Ca	0.753	0.060		
交换态钙 Exchange Ca	0.881	0.070		
全铜 Total Cu	0.807	0.064		
有效铜 Available Cu	0.843	0.067		
全硼 Total B	0.727	0.058	0.617	0.176
有效硼 Available B	0.833	0.066	0.818	0.233
硒 Selenium	0.751	0.059		

肥力为正效应,则采用升型隶属度函数。分别采用全部数据集指标和最小数据集指标的权重和隶属度构建宁夏贺兰山东麓三个产区的土壤肥力指数(SFI)值,如图 1 所示。由图 1 可知,无论利用全部数据集指标还是最小数据集指标构建 SFI 值,其结果相一致,均表明贺兰山东麓不同产区葡萄园土壤肥力存在极显著性差异。银川芦花台和永宁黄羊滩产区葡萄园土壤肥力极显著($P\leq 0.01$)高于青铜峡甘城子产区,同时银川芦花台产区葡萄园土壤肥力也极显著高于永宁黄羊滩产区。

利用全部数据集指标建立的 SFI 值(SFI-TDS)与最小数据集指标建立的 SFI 值(SFI-MDS)作回归分析,以便对最小数据集指标进行验证,如图 2 所示。结果表明,SFI-TDS 与 SFI-MDS 之间呈极显著正相关,相关系数达到 0.914,故利用最小数据集指标能够代替全部数据集指标评价宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤肥力状况。

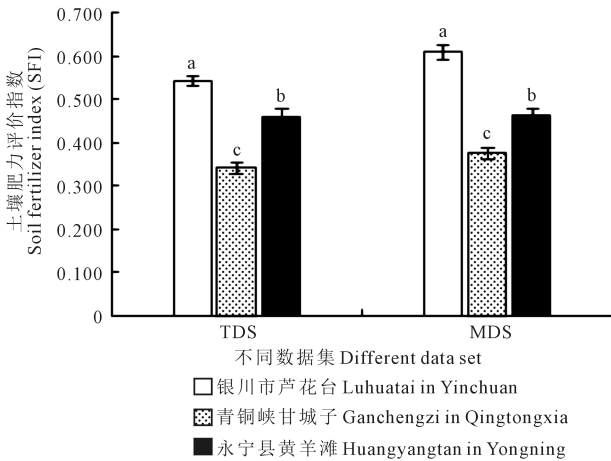


图 1 贺兰山东麓不同产区利用最小数据集指标 (MDS) 和全部数据集指标 (TDS) 构建的土壤肥力指数 (SFI) 值
Fig.1 Soil fertility index (SFI) values constructed by using minimum data set index (MDS), and total data set index (TDS) in different producing areas in the eastern foothill of Helan Mountain

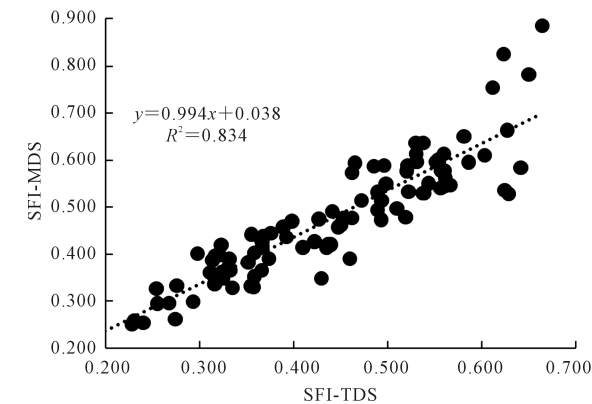


图 2 SFI-MDS 与 SFI-TDS 的线性关系
Fig.2 The linear correlation between SFI-TDS and SFI-MDS

3 讨论与结论

宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤肥力分布极不均匀,根据全国第二次土壤普查养分分级标准,研究区酿酒葡萄园有机质和碱解氮含量均偏低,平均水平分别为第五级和第六级。银川芦花台和永宁黄羊滩产区葡萄园表土层(0~20 cm)土壤有机质和碱解氮平均水平均为第四级和第五级,青铜峡甘城子产区葡萄园表土层(0~20 cm)土壤有机质和碱解氮平均水平为五级和六级,并且随着土层深度的增加,土壤有机质和碱解氮含量水平降低。然而与前人研究结果相比,随着种植年限的增加,葡萄园土壤有机质含量呈缓慢增加趋势。2008 年孙权等^[14]检测青铜峡葡萄园新园土壤有机质含量为 $3.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,3 a 园土壤有机质含量为 $4.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,6 a 园土壤有机质含量为 $6.55\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;2013 年王锐等^[15]检测青铜峡产区葡萄园土壤有机质含量平均为 $7.85\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而本研究中青铜峡产区葡萄园土壤有机质含量平均为 $8.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,但仍处于低水平状态,表明贺兰山东麓葡萄园仍需加大有机肥的投入。

葡萄园土壤有效钾和速效磷分布差异非常大,其中有效钾最大值能够达到 $320.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于一级水平,而最小值却为 $47.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于五级水平;速效磷最大值能够达到 $476.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于一级水平,而最小值却为 $0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于六级水平。依据土壤养分分级标准^[22],银川芦花台、青铜峡甘城子和永宁黄羊滩产区葡萄园表土层(0~20 cm)土壤有效钾含量分别处于三级水平、三级水平和一级水平,均处于中上水平,表明葡萄园钾肥的施入基本能够满足果树的需求,但葡萄为喜钾素植物,故银川芦花台和青铜峡甘城子产区葡萄园仍需增加钾肥的投入量。银川芦花台、青铜峡甘城子和永宁黄羊滩产区葡萄园表土层(0~20 cm)土壤速效磷含量分别处于一级水平、二级水平和一级水平,均处于丰富水平,能够满足果树的需求,与王锐^[15]研究结果相一致。

同时,宁夏贺兰山东麓葡萄园全钙含量达到 $50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,高于地壳的平均含钙量($36.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),且不同土层间变化幅度较小。同时,微量元素是植物体内酶或辅酶的组成成分,具有很强的专一性,对树体的抗逆性和果实的品质有显著的影响。贺兰山葡萄园土壤有效铜含量最低的为青铜峡甘城子产区,处于三级水平;银川芦花台和永宁黄羊滩产区的土壤有效铜含量丰富,分别达到二级水平和一级水平。全铜含量在 0~60 cm 土层中几

乎没有明显变化,在 60~100 cm 土层中仅降低 1.7 mg · kg⁻¹,平均含量低于全国平均值(20 mg · kg⁻¹)。孙权等^[14]研究结果表明贺兰山葡萄园土壤全铜含量随剖面加深而显著减少,但本研究中各土层间无明显变化。这可能是由于宁夏气候寒冷,葡萄树体需要每年冬季埋土,而铜属于无机元素,在环境中移动性差,从而使各土层间全铜含量无显著差异,尤其是 0~60 cm 土层。据资料显示^[23],我国土壤全硼范围在 0~500 mg · kg⁻¹之间,平均 64 mg · kg⁻¹;我国土壤硒元素范围在 0~8.66 mg · kg⁻¹,平均 0.29 mg · kg⁻¹。贺兰山东麓葡萄园土壤全硼含量(44.9 mg · kg⁻¹)低于全国平均含量,不同土层间硼和硒变化幅度微小,银川芦花台和永宁黄羊滩产区土壤有效硼含量均处于三级水平,而青铜峡甘城子产区土壤有效硼含量均处于四级水平,则说明本地区应该注意硼肥的施入,以免造成落花落果,引起产量的降低;土壤硒元素含量(0.263 mg · kg⁻¹)接近于全国平均含量,银川芦花台葡萄园土壤硒含量超过全国水平。

土壤肥力综合评价的方法有模糊数学法^[24]、灰色关联度法^[25]、内梅罗指数^[26]、因子分析^[27]、聚类分析^[27]、物元模型^[28]、BP 神经网络^[29]、TOPSIS^[30]以及云模型^[31]等。1991 年 Larson 等^[32]提出土壤质量的最小数据集(MDS)概念,本方法最早应用于美国医疗领域,是指在大量需要收集或处理的数据中,通过最少的数据,较好地掌握一个研究对象所具有的特点或状态,其核心是建立起一套精简实用的数据指标代替大量复杂的数据指标,以便获得所需信息。MDS 可以反映土壤质量最少的指标参数的集合,在土壤质量评价及监测工作中得到了广泛的应用。向武等^[33]利用主成分分析法建立了低山红壤油茶林土壤肥力质量评价的最小数据集,确定了 MDS 为土壤有机质、速效钾、碱解氮、全钾和有效磷;杨梅花等^[34]对江西红壤地区土壤构建最小数据集肥力指标的肥力指数综合模型,结果表明基于主成分分析提取的最小数据集建立的肥力指数和全部指标建立的肥力指数一致,能够较好代表全部肥力指标信息;邓绍欢等^[35]采用 Norm 值确定最小数据集并评价土壤质量;姜龙群等^[19]采用因子分析与最小数据集相结合的方法,计算北京市房山平原区农业土壤养分综合指数,评价结果与层次分析法的结果一致性、相关性较高,更能反映地区之间的差异,且最大程度去掉了主观性的影响,证明其适用于土壤养分评价。然而,土壤类型不同、土地利用方式不同,其最小数据集因子选择差异较大,需要

结合当地具体生态条件构建土壤肥力质量最小数据集。本研究中利用相关性分析、主成分分析和隶属函数,将 16 个原始指标降维和分组建立了含有 5 个指标的最小数据集,且通过分析依据全数据集建立的土壤肥力指数(SFI-TDS)与依据最小数据集建立的土壤肥力指数 SFI-MDS)间的相关性,表明利用最小数据集指标能够代替全部数据集指标评价宁夏贺兰山东麓葡萄园土壤肥力质量,这与向武^[33]、杨梅花^[34]和姜龙群^[19]等结论相一致。

综上所述,贺兰山东麓酿酒葡萄园在生产上应重视能够增加土壤有机质和腐殖质组分有机碳含量等相关栽培措施,提高土壤肥力质量;同时银川芦花台和永宁黄羊滩产区需减少铜制剂农药的施用,以免造成土壤铜污染。此外,本区葡萄园土壤肥力最小数据集评价指标包括有机质、pH 值、速效磷、全硼和有效硼 5 个指标,其能够代替全部数据集评价本区土壤肥力质量。

参 考 文 献:

- [1] 王春梅.宁夏酿酒葡萄产业发展战略研究[J].农业经济问题,2016, (1):4-7.
- [2] 黄安,杨联安,杜挺,等.基于主成分分析的土壤养分综合评价[J].干旱区研究,2014,31(5):819-825.
- [3] Tziachris P, Aschonitis V, Chatzistathis T, et al. Assessment of spatial hybrid methods for predicting soil organic matter using DEM derivatives and soil parameters[J]. Catena, 2019, 174:206-216.
- [4] Kabata-pendisa A. Trace elements in soils and plants, 4th ed[M]. Florida, USA: CRC Press, 2010.
- [5] Hinsinger P. Discussion paper: Soil organic matter content in Mediterranean regions (both arable and permanent crops) [C] // The first meeting of EIP-AGRI in European, Padova, Italy, 2014.
- [6] 张葛, 窦森, 谢祖彬, 等. 施用生物质炭对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 614-620.
- [7] 窦森, 肖彦春, 张晋京. 土壤胡敏素各组分数量及结构特征初步研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 934-940.
- [8] 张君诚. 受钙影响花生(*Arachis hypogaea* L.) 胚胎发育的分子机理研究胚胎发育的分子机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2004.
- [9] 张继渊. 植物生理学[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1999: 45-46.
- [10] Djanaguiraman M, Prasad PVV, Seppanen M. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12): 999-1007.
- [11] Feng R W, Wei C Y, Tu S X. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 87: 58-68.
- [12] 张元培, 吴颖, 郑雄伟. 湖北省土壤酸碱度趋势分析及影响因素[J]. 资源环境与工程, 2018, 32: 30-34.
- [13] 付晓婷. 基于地貌分区的土壤养分空间变异性分析及采样设计研究: 以陕西省蓝田县为例[D]. 西安: 西北大学, 2012.