宁夏风沙区苹果园地土壤质量及硒元素评价

张 静[1,2]，黄兴科[3]，罗雅曦[1,2]，常海涛[1]，刘任涛[1]

(1. 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021；
2. 宁夏大学 农学院，宁夏 银川 750021；3. 中卫市林业技术推广服务中心，宁夏 中卫 755000)

摘 要：[目的] 阐明宁夏风沙区苹果园土壤质量演变过程，为该区域苹果园管理与发展、苹果产业可持续发展及脱贫富农提供依据。[方法] 以宁夏沙坡头区 2 年生(2 a)、5 年生(5 a)、10 年生(10 a)和 25 年生(25 a)苹果园为研究样地，以周围荒地为对照(CK)，分析各样地土壤理化性质变化特征及其相关关系，并根据土壤质量综合技术评价标准进行苹果园土壤质量评价。[结果] ①随林龄增加，土壤含水量、土壤电导率、土壤全氮、土壤有机碳、土壤速效钾、速效磷和水解性氮均呈现上升趋势，而土壤 C/N 和土壤温度均呈现下降趋势。土壤黏粉粒、土壤 pH 值和土壤硒含量呈现先升高后降低趋势，而土壤容重呈现先降低后增加趋势，且均在 10 a 时出现最值(峰值或谷值)。但土壤孔隙度表现为不同样地间无显著差异性。②苹果园土壤粗砂粒和黏粉粒与土壤温度及土壤 C/N 呈显著负相关($p<0.01$)，而与土壤含水量、土壤全氮及有机碳呈显著正相关($p<0.01$)。土壤粗砂粒与土壤速效钾及土壤水解性氮呈显著正相关($p<0.01$)。土壤含水量与土壤温度及土壤 C/N 呈显著负相关($p<0.01$)，而与土壤全氮、有机碳、土壤速效钾和水解性氮呈显著正相关($p<0.01$)。土壤容重与土壤黏粉粒、土壤含水量、土壤全氮及有机碳呈负相关($p<0.05$)。土壤养分指标之间均存在正相关关系($p<0.05$)。但土壤孔隙度和土壤硒与其余指标间均无相关性($p>0.05$)。③综合土壤物理、化学及营养指标，土壤质量综合得分排序表现为：25 a>10 a>5 a>0>2 a>CK。[结论] 在宁夏风沙区种植苹果经济林 5 a 左右即可改善土壤理化性质，10 a 时促进土壤质量性状显著提高，特别是土壤硒含量处于较高水平，并且随着种植年限增加，宁夏沙区苹果园土壤质量持续改善。

关键词：宁夏风沙区；林龄；苹果园；土壤理化性质；土壤硒；土壤质量

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)06-0066-11 **中图分类号**：S158，X142

文献参数：张静，黄兴科，罗雅曦，等. 宁夏风沙区苹果园地土壤质量及硒元素评价[J]. 水土保持通报，2019，39(6)：66-76. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.010；Zhang Jing，Luo Yaxi，Chang Haitao，et al. Soil quality and selenium evaluation of apple orchard in desertified area of Ningxia Hui Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(6)：66-76.

Soil Quality and Selenium Evaluation of Apple Orchard in Desertified Area of Ningxia Hui Autonomous Region

Zhang Jing[1,2]，Huang Xingke[3]，Luo Yaxi[1,2]，Chang Haitao[1]，Liu Rentao[1]

(1. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education，Ningxia University，Yinchuan，Ningxia* 750021，*China*；2. *College of Agriculture，Ningxia University，Yinchuan，Ningxia* 750021，*China*；3. *Zhongwei Forestry Technology Extension Center，Zhongwei，Ningxia* 755000，*China*)

Abstract：[Objective] The evolution process of soil quality in apple orchard was investigated，in order to provide the basis for the management and development of apple orchard，the sustainable development of apple industry and the poverty alleviation in desertified area of Ningxia Hui Autonomous Region. [Methods] We selected apple plantations of 2 years，5 years，10 years and 25 years as the study sites，and the adjacent waste land as the control (CK)，to investigate the changes of soil physical and chemical properties and their correlations.

收稿日期：2019-05-12 **修回日期**：2019-06-09

资助项目：国家自然科学基金项目“腾格里沙漠固沙造林后植被恢复对土壤节肢动物多样性分布的影响”(41867005)，“荒漠灌丛对土壤动物的“聚集—扩散”效应”(41661054)；宁夏高等学校科学研究项目(NGY2018007)；宁夏自然科学基金项目(2018AAC02004)；宁夏回族自治区科技基础条件建设计划创新平台专项资金项目(2018DPC05021)；宁夏青年拔尖人才支持计划(RQ0010)；宁夏高校“生态学”西部一流学科项目(NXYLXK2017B06)

第一作者：张静(1994—)，女(汉族)，山西省太原市人，硕士研究生，研究方向为恢复生态学。E-mail：zjbb13835137136@163.com。

通讯作者：刘任涛(1980—)，男(汉族)，河南省邓州市人，博士，副研究员，硕士生导师，主要从事恢复生态学相关研究与教学工作。E-mail：nxuliu2012@126.com。

Soil comprehensive quality index was analyzed, in order to assess the soil quality. [Results] ① With the increase of plantation age, soil moisture content, electrical conductivity, total nitrogen, organic carbon, available potassium, available phosphorus and hydrolytic nitrogen all increased, while soil C∶N and soil temperature all declined. Soil clay and silt, soil pH value and soil selenium content increased in initial stage and then declined, while soil bulk density decreased firstly and then increased subsequently, and the maximum value(peak or trough value) appeared at 10 years. There was no significant difference between soil porosity in different cultivation age of apple plantations. ② Soil coarse sand and soil clay and silt were negatively($p<0.01$) correlated with soil temperature and soil C∶N ratio, and there was a positive($p<0.01$) correlation between soil moisture content, total nitrogen and organic carbon. In contrast, there was a positive($p<0.01$) correlation between soil coarse sand and soil available potassium and hydrolytic nitrogen. Soil moisture content was negatively($p<0.01$) correlated with soil temperature and soil C∶N, and there was a positive correlation between soil total nitrogen, organic carbon, available potassium and hydrolytic nitrogen. Soil bulk density was a negatively($p<0.05$) correlated with soil clay and silt, soil moisture content, total nitrogen and organic carbon. There was a positive correlation between soil nutrients, whereas there was no correlation($p>0.05$) between soil porosity, soil selenium and other indicators. ③ According to the soil physical, chemical and nutritional indexes, the soil quality comprehensive index was ranked as: 25 years>10 years>5 years>0>2 years>CK. [Conclusion] The physical and chemical properties of soil can be improved by planting apple economic forests in Ningxia desertified regions for 5 years, and soil quality and soil selenium can be improved significantly in 10 years. With the increase of planting years, soil quality can be improved continuously in Ningxia windy desert area.

Keywords: desertified region of Ningxia; stand age; apple plantation; soil physical and chemical properties; soil selenium; soil quality

在干旱风沙区,种植经济果林不仅能够增加农民收入,促进经济发展,且作为生物措施对沙地治理的水土保持作用又非常显著,能够增加地表植被覆盖率,改良贫瘠的土壤环境,有利于区域生态环境改善和土地资源可持续利用,是治理风沙区水土流失、改善生态环境的重要途径之一[1]。果林园地土壤质量评价是经济林地土壤资源可持续发展和经果林健康发展的重要措施。其中,土壤质量是维持地球生物圈稳定和可持续发展的重要因素之一[2],是土壤在生态系统的范围内,维持生物的生产能力、保护环境质量及促进动植物健康的能力[1]。土壤水分含量、孔隙度、有机质含量的变化以及土壤养分含量是否平衡等会直接影响到树体生长、果实品质、果树利用年限和苹果产业健康持续的发展[3-4]。而硒元素作为人体必需的 14 种微量营养元素之一,与人体健康密切相关,是部分重金属元素的天然解毒剂,能有效提高生命免疫功能,对防癌、抗癌能发挥重要作用,被国内外科学家誉为“生命之火”、“抗癌之王”。所以,研究宁夏风沙区不同林龄苹果园土壤理化性质演变、土壤质量及硒元素评价,对于该区域土壤资源管理、经济果林建设利用及农业发展和经济发展具有重要的理论与实践价值。

目前,国内关于种植年限与土壤质量的关系研究较多集中在作物和其他植物上。张珍明等[5]对不同种植年限的山银花下土壤微生物特性进行了研究,发现随着种植年限的增加,土壤肥力下降。周海霞等[6]探讨了种植年限对设施蔬菜土壤及基质质量的影响,发现土壤质量随着种植年限的增高先提升后降低,种植达 4 a 时土壤质量最好,4 a 后有下降趋势。郑敏娜等[7]对晋北盐碱区不同种植年限人工紫花苜蓿草地土壤质量进行了评价,发现不同种植年限的紫花苜蓿草地均可提高土壤质量,其中种植 10 a 苜蓿草地土壤质量最好。刘军等[8]对露天煤矿排土场边坡不同年限沙棘林下土壤肥力质量进行了研究,发现在土地复垦中引种沙棘,对改善排土场土壤环境有实际意义。综合分析表明,植被种植能够改善土壤环境质量,而且不同种植类型存在的阈值对土壤理化性质及土壤质量影响也有较大差异性,这对于土壤资源管理、种植模式优化均具有重要指导作用。但是,在宁夏风沙区,关于不同年限苹果园土壤理化性质和土壤质量评价研究,报道较少。

宁夏回族自治区中卫市沙坡头位于腾格里沙漠东南缘,处于干旱风沙区,生态环境恶劣。为了改善区域生态环境质量,增加地方农民收入,且考虑其土壤富硒状况对该地区进行苹果园建设。目前,该区域分布有近 7 333 hm^2 苹果园,苹果产业已成为该区域重要优势特色产业和战略性主导产业。苹果园土壤

理化性质演变特征，是评价区域苹果园土壤质量的重要依据，也是该区域苹果林健康、可持续发展的重要支撑。鉴于此，本研究选择沙坡头区 2 年生(2 a)、5 年生(5 a)、10 年生(10 a)和 25 年生(25 a)苹果园为研究样地，以周围荒地为对照(CK)，通过调查不同林龄的土壤理化性质变化特征，并采用土壤质量综合得分对土壤质量做出合理评价，解析苹果园发展演变的关键阈值阶段，为该区域苹果园发展与管理、苹果产业可持续发展及脱贫富农提供依据。

1 研究区概况

研究区位于中卫市沙坡头区永康镇双达村(37°26′48″—37°26′52″N，105°20′21″—105°20′25″E)，海拔约 1 280 m。该地区属半干旱气候，具有典型的大陆性季风气候和沙漠气候的特点，因受太阳辐射和降雨量影响，日照充足，昼夜温差大。年平均气温 8.3 ℃，年降水量 179.6 mm，年蒸发量为 1 829.6 mm，为降水量的 10.2 倍。降水量主要集中在 6—8 月，占全年降水量的 60%[9-10]。全年无霜期平均 156 d，全年日照时数 2 870 h。土壤以炭灰钙(白僵)土为主，风沙土次之。由于其独特的地理区位且有黄河水灌溉，为苹果种植提供了良好的自然条件。

研究区内包括 4 片不同林龄的苹果园和一块对照荒地。其中苹果园的种植模式相同，株行距基本一致，株距在 2.5～3.5 m 之间，行距在 4～4.5 m 之间。具体情况如下：2 a 生苹果园果树平均高度为 2.96 m，平均株距 2.55 m，行距 4.20 m，总面积为 0.86 hm^2。5 a 生苹果园果树平均高度为 4.03 m，平均株距 3.2 m，行距 4.25 m，总面积为 1.03 hm^2。10 a生苹果园果树平均高度为 4.40 m，平均株距 3.47 m，行距 4.45 m，总面积为 0.87 hm^2。25 a 苹果园果树平均高度为 4.88 m，平均株距 3.25 m，行距 4.20 m，总面积为 0.84 hm^2。4 片不同林龄的苹果园均属于双达村农民专业合作社，规范化管理，每年根据果树的不同生长时期的生长情况施 3～4 次水溶肥，灌溉 4～5 次，合作社统一在林间种植西瓜、卷心菜等以充分利用土地，提高经济效益。林地中间区域有一块荒地，面积约为 0.90 hm^2，将不同林龄苹果园分隔开来。林地地表植被主要包括油蒿(*Artemisia ordosica*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、狗尾草(*Setaria viridis*)和山苦荬(*Ixeris denticulata*)等。

2 研究方法

2.1 试验设计

本研究选择 2 年生、5 年生、10 年生和 25 年生苹果园为研究样地，以周围荒地为对照，分别用序号 2 a，5 a，10 a，25 a，CK 来代表每个样地。每种类型样地设 5 个重复样区，面积 20 m×20 m，间距 20 m。在每个重复样区布设 5 个 10 m×10 m 的调查样方，间距 10 m。共布设 5 样地×5 重复×5 样方＝125 样方。

于 2018 年 5 月，在 4 个苹果园样地的每个样方内进行植被调查，选择长势相近的 5 株果树，通过卷尺测量其高度(m)、冠幅(m)和新稍长(m)，通过游标卡尺测量其胸径(cm)和基径(cm)，作为研究样地背景(表 1)。同时，在距所选果树基部 10 cm 左右处布设土壤取样点。

表 1 研究苹果园基本概况

种植年限	树高/m	胸径/cm	基径/cm	冠幅/cm	新稍长/cm
2 a	2.95±0.04^{d}	2.87±0.09^{d}	4.65±0.17^{d}	208.02±7.37^{d}	124.80±5.39^{a}
5 a	4.03±0.14^{c}	6.26±0.41^{c}	8.96±0.46^{c}	321.40±19.68^{c}	40.40±3.43^{b}
10 a	4.40±0.05^{b}	11.19±0.39^{b}	15.62±0.46^{b}	444.64±8.56^{b}	47.64±2.56^{b}
25 a	4.88±0.24^{a}	14.26±0.79^{a}	23.05±1.63^{a}	508.65±20.12^{a}	37.20±1.69^{b}

注：2 a 为 2 年生苹果园，5 a 为 5 年生苹果园，10 a 为 10 年生苹果园，25 a 为 25 年生苹果园；数据为：均值±标准差；同列不同小写字母表示不同样地间存在显著差异性($p<0.05$)。下同。

2.2 土壤样品采集与测定

在每个取样点用土温计进行土壤温度测定，分上午、中午和下午连续测定 3 次，平均后计作土壤温度(℃)。用环刀法(100 cm^3)取完整土样，进行土壤容重(g/cm^3)测定。然后，采用 5 点取样法取一个混合土样(取样深度 0—10 cm)，带回实验室进行相关测定分析。

首先，采集的新鲜土壤样品的 1/4 进行土壤含水量的测定。然后，将剩余 3/4 土壤样品经过 2 mm 土壤筛，以除去其中的杂质如草根、叶片等，在自然状态下风干，用来测定土壤粒径组成、土壤 pH 值、土壤电导率、土壤有机碳、土壤全氮、土壤速效磷、土壤速效钾、土壤水解性氮和土壤硒含量[11]。

土壤含水量(%)采用烘干法测定，即将盛有新鲜

土样的铝盒放在分析天平上称重,准确至 0.01 g,然后置于 105 ℃烘箱中烘烤 24 h 后,冷却至室温立即称重[12]。土壤粒径组成(%)采用 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪进行测定,其重复性误差≤±0.5%,准确性误差≤±1%。根据美国农业部(USAD)制土壤粒径组成分级标准划分土壤粒径:粗砂粒(250～1 000 μm)、细砂粒(100～250 μm)、极细砂粒(50～100 μm)、黏粉粒(<50 μm)[13]。土壤 pH 值(水土比悬液比为 2.5∶1)和土壤电导率(μs/m)(水土比浸提液为 5∶1)用 P4 多功能测定仪器测定[11]。土壤有机碳(%)采用重铬酸钾外加热法测定,土壤全氮(%)采用半微量凯氏定氮法测定,土壤速效钾(mg/kg)采用 NH_4 OAc 浸提—火焰光度计法测定,土壤速效磷(mg/kg)采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑钪比色法测定,土壤水解性氮(mg/kg)采用碱解扩散法测定,土壤硒(mg/kg)采用原子荧光光谱法测定[12]。

2.3　土壤质量评价方法

2.3.1　评价指标的选取　本文在参考与结合黄婷[14]对土壤质量评价体系研究的基础上,选取和建立适合本研究的土壤质量综合评价指标体系。具体指标共计 17 个,包括土壤粗砂粒(X_1)、土壤细砂粒(X_2)、土壤极细砂粒(X_3)、土壤黏粉粒(X_4)、土壤温度(X_5)、土壤含水量(X_6)、土壤容重(X_7)、土壤孔隙度(X_8)、土壤电导率(X_9)、土壤 pH 值(X_{10})、土壤全氮(X_{11})、土壤有机碳(X_{12})、土壤 C/N(X_{13})、土壤速效钾(X_{14})、土壤速效磷(X_{15})、土壤水解性氮(X_{16})、土壤硒(X_{17})。其中所选取的土壤物理性质指标可以体现土壤的肥力状况,土壤化学性质指标可以体现土壤的形成和发育过程,土壤养分指标可以反映与植物体吸收利用的关系[8]。

2.3.2　主成分分析步骤

(1) 列出原始数据矩阵 X。包括上述 17 个土壤指标。

(2) 将原始数据进行标准化处理。由于各指标具有不同的量纲,为了排除不同量纲对评价结果的影响,对各实测指标原始数据进行标准化处理[15]。标准化公式为:

$$X_{ij}=\frac{x_{ij}-\overline{x_j}}{s_j} \tag{1}$$

式中:X_{ij}——第 i 个样地第 j 个指标的标准化值;x_{ij}——第 i 个样地第 j 个指标的实测值;$\overline{x_j}$——第 j 个指标的平均值;s_j——第 j 个指标的标准差;i——样地的个数(本文中 $i=1,2,3,4,5$);j——评价中所选指标的个数(本文中 $j=1,2,\cdots,17$)。

(3) 计算样本的相关矩阵 $\boldsymbol{R}$。

(4) 用雅可比法求解相关矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的特征值和特征向量。

(5) 计算贡献率及累积贡献率,确定主分量个数,解释各主分量的意义,建立主分量方程。

(6) 计算个主成分的因子荷载量,并求出各个指标的公因子方差,据此计算出各个指标的权重 w_j,满足 $\sum_{j=1}^{n} w_j=1$[16]。

(7) 根据各个指标的权重,计算各样地类型土壤质量综合评价值,据此对不同土地利用类型土壤质量作相应评价。

$$P_i=\sum_{j=1}^{n} X_{ij}w_j \tag{2}$$

式中:P_i——第 i 种土地利用类型的土壤质量综合评价值;X_{ij}——第 i 种土地利用类型第 j 个指标的标准化值;w_j——第 j 个指标的权重值,由主成分分析法得到;i——样地的个数(本文中 $i=1,2,3,4,5$);n——评价中所选指标的个数(本文中 $n=17$)。

2.4　数据处理与分析

所有数据采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较法分析不同数据组间的差异,采用 Spearman 相关系数分析不同指标间的相关性。显著水平为 $p=0.05$。

3　结果与分析

3.1　土壤理化性质

3.1.1　土壤粒径组成、土壤容重及土壤孔隙度　由表 2 可以看出,不同林龄的苹果园的土壤粒径组成存在显著差异性($p<0.05$)。土壤粗砂粒表现为 25 a 显著高于 10 a,5 a,2 a 和对照荒地($p<0.05$),且后 3 种样地之间均无显著差异性($p>0.05$)。土壤细砂粒表现为荒地显著高于 5 a 和 10 a($p<0.05$),而 2 a 和 25 a 居中。土壤极细砂粒表现为荒地和 2 a 显著高于 5 a,10 a 和 25 a($p<0.05$),25 a 又显著高于 5 a 和 10 a($p<0.05$),而荒地和 2 a 之间无显著差异性,5 a 和 10 a 间也无显著差异性($p>0.05$)。土壤黏粉粒含量随着林龄的增加现升高后降低,10 a 出现最大值。土壤黏粉粒表现为 5 a 和 10 a 显著高于荒地、2 a 和 25 a($p<0.05$)。不同林龄的苹果园间土壤容重存在显著差异性。随着林龄的增加,土壤容重呈先下降后上升的趋势,主要表现为 5 a 和 10 a 显著低于 2 a 和 25 a($p<0.05$),且均显著低于对照荒地($p<0.05$)不同林龄的苹果园间土壤孔隙度无显著差异性($p>0.05$),均在 54%～58%之间。

表 2 不同林龄苹果林的土壤粒径组成、土壤容重及土壤孔隙度

种植年限	粗砂粒/%	细砂粒/%	极细砂粒/%	黏粉粒/%	容重/(g·cm^{-3})	孔隙度/%
CK	0.796±0.188^{b}	24.968±1.926^{a}	27.284±0.793^{a}	46.950±1.633^{b}	1.502±0.031^{a}	54.227±9.064
2 a	0.910±0.365^{b}	23.136±1.832^{ab}	26.152±1.006^{a}	49.802±1.498^{b}	1.226±0.034^{b}	55.409±1.365
5 a	1.830±0.288^{b}	19.066±1.682^{b}	18.014±0.648^{c}	61.090±2.180^{a}	1.108±0.031^{c}	58.243±1.168
10 a	1.680±0.246^{b}	16.732±0.835^{bc}	17.896±0.363^{c}	63.690±0.608^{a}	1.068±0.024^{c}	55.886±3.891
25 a	4.368±0.866^{a}	22.050±2.068^{ab}	21.452±0.917^{b}	52.128±2.558^{b}	1.224±0.052^{b}	58.021±6.615

3.1.2 土壤含水量和土壤温度 由图 1 可知,不同林龄的苹果园间土壤含水量存在显著差异性。随着林龄的增加,土壤含水量基本呈上升趋势,主要表现为荒地显著低于苹果园($p<0.05$),5 a 和 25 a 显著高于 2 a($p<0.05$),且均与 10 a 无显著性差异($p>0.05$)。由图 1 可知,不同林龄的苹果园的土壤温度随林龄的增加而降低,表现为荒地显著高于 2 a 和 25 a($p<0.05$),且 2 a 显著高于 25 a($p<0.05$),但 5 a和 10 a 与 2 a 和 25 a 均无显著差异($p>0.05$)。

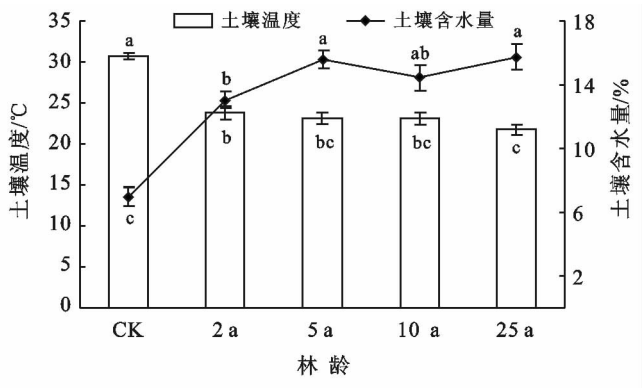


图 1 不同林龄苹果园的土壤含水量和土壤温度

3.1.3 土壤电导率和 pH 值 由图 2 可知,不同林龄的苹果园的土壤电导率随林龄的增加而基本呈上升趋势,表现为 25 a 显著高于 5 a 和荒地($p<0.05$),而 2 a 和 10 a 与其余几个样地均无显著性差异($p>0.05$)。

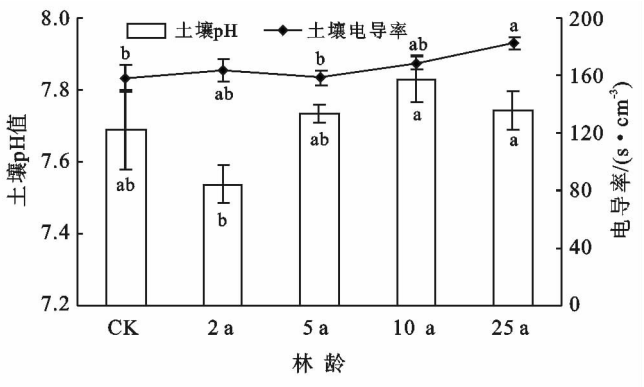


图 2 不同林龄苹果园的土壤电导率)和土壤 pH 值

由图 2 可知,该地区的土壤属于弱碱性,且林地土壤 pH 值有随着林龄增加而出现先升高后降低的趋势,10 a 出现最大值。主要表现为 10 a 和 25 a 显著高于 2 a($p<0.05$),而荒地和 5 a 与其余三种样地均无显著性差异($p>0.05$)。

3.1.4 土壤营养元素 由表 3 可知,不同林龄苹果园的土壤全氮和有机碳含量之间存在显著差异($p<0.05$)。均表现为 25 a 显著高于 10 a,5 a,2 a 和荒地($p<0.05$),5 a 和 10 a 显著高于 2 a 和荒地($p<0.05$),但其两两之间无显著差异($p>0.05$)。但土壤 C/N 却表现为荒地显著高于苹果园($p<0.05$),而 10 a 显著高于 25 a($p<0.05$),2 a 和 5 a 与 10 a 和 25 a 之间均无显著差异($p>0.05$)。

表 3 不同林龄苹果园的土壤全氮、土壤有机碳和土壤 C/N

种植年限	全氮/%	土壤有机碳/%	C/N
CK	0.040±0.000^{c}	1.542±0.064^{c}	40.374±1.040^{a}
2 a	0.060±0.006^{c}	1.334±0.046^{c}	22.952±2.418^{bc}
5 a	0.106±0.003^{b}	1.974±0.037^{b}	19.042±0.622^{bc}
10 a	0.088±0.007^{b}	2.032±0.071^{b}	23.218±1.153^{b}
25 a	0.132±0.017^{a}	2.352±0.154^{a}	18.768±1.635^{c}

由图 3 可以看出,不同林龄苹果园土壤速效钾、速效磷和水解性氮含量均随着林龄的增加而增加。土壤速效钾、速效磷和水解性氮均表现为 25 a 显著高于 10 a,5 a,2 a 和荒地($p<0.05$),其中土壤速效钾表现为 10 a 显著高于荒地($p<0.05$),而 2 a 和 5 a 与 10 a 和荒地均无显著性差异($p>0.05$)。土壤速效磷表现为 5 a,2 a 和荒地之间无显著性差异($p>0.05$),10 a 与其余 4 种样地类型均无显著性差异($p>0.05$)。土壤水解性氮表现为 10 a 和 5 a 显著高于 2 a 和荒地($p<0.05$),而两两之间无显著性差异($p>0.05$)。由图 3 可知,土壤硒含量随着林龄的增加存在先上升后下降的趋势,最大值出现在 10 a。表现为 10 a 显著高于 5 a($p<0.05$),而 2 a,25 a 和荒地与10 a和 5 a 之间无显著性差异($p>0.05$)。

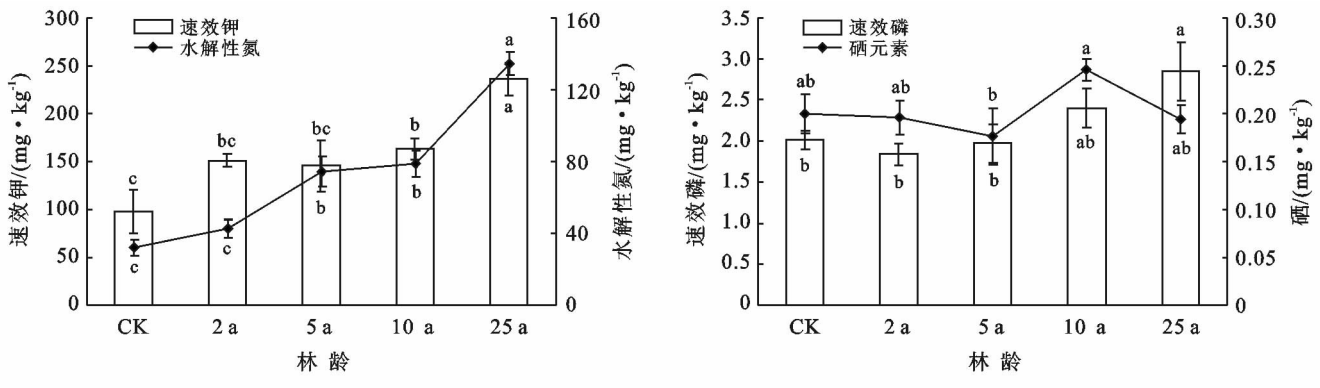


图 3　不同林龄苹果园的土壤速效钾、土壤速效磷、土壤水解性氮和土壤硒元素含量

3.2　土壤理化性质指标间的相关性分析

由表 4 可以看出,土壤粗砂粒和黏粉粒与土壤温度和土壤 C/N 呈显著负相关($p<0.01$),与土壤含水量、土壤全氮和有机碳呈显著正相关($p<0.01$),且土壤粗砂粒与土壤速效钾和水解性氮呈显著正相关($p<0.01$),而黏粉粒与土壤容重呈显著负相关($p<0.01$);土壤细砂粒和极细砂粒与土壤容重呈显著正相关($p<0.01$),与土壤温度和土壤 C/N 呈正相关($p<0.05$),与土壤含水量、有机碳呈负相关($p<0.05$),且土壤极细砂粒与土壤全氮和土壤水解性氮呈显著负相关($p<0.01$);土壤温度与土壤含水量、全氮、有机碳、速效钾和水解性氮呈显著负相关($p<0.01$),与土壤容重和土壤 C/N 呈显著正相关($p<0.01$);土壤含水量与土壤容重和土壤 C/N 呈显著负相关($p<0.01$),与土壤全氮、有机碳、土壤速效钾和水解性氮呈显著正相关($p<0.01$);土壤容重与土壤全氮和有机碳呈负相关($p<0.05$);土壤孔隙度和土壤硒与其余指标均无相关性($p>0.05$);土壤电导率只与土壤水解性氮呈正相关($p<0.05$),土壤 pH 值只与土壤有机碳呈正相关($p<0.05$);土壤全氮和有机碳与土壤速效磷、速效钾和水解性氮均呈显著正相关($p<0.01$);土壤速效钾与速效磷呈正相关($p<0.05$);土壤水解性氮与土壤速效钾和速效磷呈显著正相关($p<0.01$)。

表 4　不同林龄苹果园土壤理化性质指标之间的相关系数

项 目	粗砂粒	细砂粒	极细砂粒	黏粉粒	土壤温度	土壤含水量	土壤容重	土壤孔隙度	土壤电导率	土壤pH	土壤全氮	土壤有机碳	土壤碳氮比	土壤速效钾	土壤速效磷	土壤水解性氮	土壤硒
粗砂粒	1																
细砂粒	−0.082	1															
极细砂粒	−0.385	0.545**	1														
黏粉粒	0.056	−0.900**	−0.818**	1													
土壤温度	−0.536**	0.397*	0.621**	−0.480*	1												
土壤含水量	0.556**	−0.495*	−0.714**	0.589**	−0.873**	1											
土壤容重	−0.243	0.559**	0.737**	−0.707**	0.738**	−0.813**	1										
土壤孔隙度	0.148	−0.039	−0.085	0.041	−0.16	0.125	−0.182	1									
土壤电导率	0.313	0.067	−0.01	−0.102	−0.242	0.162	0.048	−0.183	1								
土壤 pH值	0.195	−0.339	−0.355	0.366	−0.137	0.128	−0.2	0.325	−0.021	1							
土壤全氮	0.823**	−0.395	−0.655**	0.437*	−0.772**	0.785**	−0.594**	0.22	0.197	0.307	1						
土壤有机碳	0.761**	−0.426*	−0.672**	0.479*	−0.519**	0.578**	−0.431*	0.07	0.163	0.452*	0.861**	1					
土壤碳氮比	−0.542**	0.455*	0.607**	−0.506**	0.942**	−0.921**	0.773**	−0.189	−0.235	−0.111	−0.796**	−0.475*	1				
土壤速效钾	0.702**	−0.226	−0.302	0.159	−0.635**	0.635**	−0.334	0.057	0.297	0.13	0.655**	0.601**	−0.572**	1			
土壤速效磷	0.251	−0.183	−0.191	0.166	−0.316	0.294	−0.221	0.318	0.347	0.256	0.419*	0.442*	−0.225	0.421*	1		
土壤水解性氮	0.781**	−0.235	−0.540**	0.284	−0.659**	0.647**	−0.382	0.115	0.473*	0.274	0.804**	0.839**	−0.580**	0.757**	0.597**	1	
土壤硒	−0.063	−0.236	−0.101	0.214	0.023	0.046	−0.126	−0.073	−0.175	0.159	−0.1	0.062	0.103	0.296	0.057	0.057	1

注:** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.3　土壤质量评价

从表 5 可以看出,根据特征值 $\lambda>1$ 的原则提取前 6 个主成分,这 6 个主成分的特征值分别为 7.89,2.41,1.55,1.28,1.01 和 0.96,方差贡献率分别为 46.41%,14.19%,9.10%,7.52%,5.95%和 5.65%。选取主成分时,除了要满足特征值 $\lambda>1$ 的基本条件

外，还要满足前 n 个主成分的累积贡献率达到 85%以上的条件，只有同时满足这两个条件，才可以认为前 n 个主成分已基本能够反映出原变量的主要信息。在本研究中，前 6 个主成分累计贡献率为 88.82%（>85%），因此可以认为选取前 6 个主成分能够代表所有的信息。其中，第 1 主成分综合了土壤粗砂粒（X_1）、土壤细砂粒（X_2）、土壤极细砂粒（X_3）、土壤黏粉粒（X_4）、土壤含温度（X_5）、土壤含水量（X_6）、土壤容重（X_7）、土壤全氮（X_{11}）、土壤有机碳（X_{12}）、土壤 C/N（X_{13}）、土壤速效钾（X_{14}）、土壤水解性氮（X_{16}）这 12 个评价指标的信息，其系数均大于 0.5。第一主成分的贡献率最大，包含的指标也最多，说明这些土壤指标在土壤质量方面起着主导作用，可以用这 1 个综合指标来解释原 17 个土壤综合质量因子信息的46.41%。第 2 主成分包括了土壤粗砂粒（X_1）、土壤细砂粒（X_2）土壤黏粉粒（X_4）和土壤 pH 值（X_{10}）这 4 个指标，其系数均大于 0.5，可以解释原土壤综合质量的 14.19%。第 3 主成分包括土壤 pH 值（X_{10}）这 1 个指标，可以解释原土壤综合质量的 9.10%。第 4 主成分包括土壤孔隙度（X_8）和土壤硒（X_{17}）这 2 个指标，其系数均大于 0.5，可以解释原土壤综合质量的 7.52%。第 5 主成分包括土壤硒（X_{17}）这 1 个指标，可以解释原土壤综合质量的 5.95%。第 6 主成分包括土壤速效磷（X_{15}）这 1 个指标，可以解释原土壤综合质量的 5.65%。

表 5 主成分分析中各因子的特征向量、特征值、贡献率及累计贡献率

项 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
X_1	0.70	0.53	0.05	0.00	0.10	−0.39	0.03	0.10	0.14	0.12	0.01	0.07	−0.04	−0.14	−0.01	0.00	0.00
X_2	−0.57	0.61	−0.11	−0.17	0.20	−0.12	0.03	−0.45	−0.05	−0.05	0.01	0.02	−0.02	0.04	0.00	0.00	0.00
X_3	−0.79	0.37	0.01	−0.02	0.18	0.17	0.07	0.33	−0.18	0.15	−0.03	−0.07	0.08	0.01	0.02	0.00	0.00
X_4	0.65	−0.69	0.05	0.11	−0.24	0.06	−0.07	0.07	0.10	−0.08	0.01	0.01	−0.03	0.00	−0.01	0.00	0.00
X_5	−0.87	−0.03	0.33	0.09	−0.13	−0.13	−0.13	0.03	0.12	0.14	0.19	0.08	0.04	0.07	−0.06	−0.01	0.00
X_6	0.90	−0.09	−0.30	−0.02	0.13	0.06	0.02	−0.03	−0.03	0.00	0.13	0.15	0.15	0.02	0.06	0.01	0.00
X_7	−0.75	0.43	0.23	0.11	−0.11	−0.14	0.00	0.22	0.06	−0.24	−0.12	0.14	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00
X_8	0.20	−0.02	0.36	−0.78	0.32	0.18	0.04	0.07	0.28	−0.03	0.02	−0.04	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00
X_9	0.24	0.59	−0.13	0.22	−0.47	0.40	0.32	−0.03	0.22	0.07	0.02	−0.01	−0.03	0.04	0.02	0.00	0.00
X_10	0.36	−0.19	0.69	−0.17	−0.19	−0.14	0.46	−0.06	−0.24	−0.01	0.03	0.03	0.01	−0.01	−0.01	0.00	0.00
X_{11}	0.92	0.19	0.00	−0.13	−0.01	−0.21	−0.09	0.06	−0.05	0.11	−0.11	0.05	−0.06	0.11	−0.03	0.03	0.00
X_{12}	0.82	0.15	0.31	0.11	−0.16	−0.33	−0.19	−0.01	−0.01	0.05	−0.01	−0.09	0.01	0.07	0.08	−0.02	0.00
X_{13}	−0.86	0.03	0.41	0.16	−0.10	−0.09	−0.16	−0.08	0.06	−0.02	0.08	−0.06	−0.01	−0.05	0.05	0.04	0.00
X_{14}	0.71	0.39	0.07	0.30	0.37	0.06	0.05	0.17	−0.08	−0.16	0.19	−0.05	−0.10	0.03	−0.01	0.00	0.00
X_{15}	0.47	0.30	0.43	−0.10	−0.11	0.57	−0.35	−0.07	−0.16	0.03	−0.02	0.09	−0.04	−0.04	0.00	−0.01	0.00
X_{16}	0.83	0.44	0.17	0.12	−0.07	0.01	−0.08	−0.09	0.06	−0.10	−0.03	−0.11	0.17	−0.02	−0.07	0.01	0.00
X_{17}	0.09	−0.29	0.41	0.61	0.53	0.16	0.11	−0.13	0.13	0.08	−0.11	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00
特征值	7.89	2.41	1.55	1.28	1.01	0.96	0.55	0.45	0.32	0.18	0.13	0.10	0.08	0.05	0.02	0.00	0.00
贡献率	46.41	14.19	9.10	7.52	5.95	5.65	3.23	2.67	1.91	1.08	0.79	0.58	0.46	0.31	0.14	0.02	0.00
累积贡献率	46.41	60.60	69.70	77.22	83.17	88.82	92.05	94.72	96.63	97.71	98.50	99.08	99.54	99.85	99.98	100.00	100.00

注：X_1 为土壤粗砂粒，X_2 为土壤细砂粒，X_3 为土壤极细砂粒，X_4 为土壤黏粉粒，X_5 为土壤温度，X_6 为土壤含水量，X_7 为土壤容重，X_8 为土壤孔隙度，X_9 为土壤电导率，X_{10} 为土壤 pH 值，X_{11} 为土壤全氮，X_{12} 为土壤有机碳，X_{13} 为土壤 C/N，X_{14} 为土壤速效钾，X_{15} 为土壤速效磷，X_{16} 为土壤水解性氮，X_{17} 为土壤硒。

根据主成分得分矩阵可以建立主成分得分方程：

$$Z_1=0.698X_1-0.574X_2-0.788X_3+0.648X_4-0.866X_5+0.901X_6-0.754X_7+0.200X_8+0.241X_9+0.362X_{10}+0.919X_{11}+0.821X_{12}-0.858X_{13}+0.711X_{14}+0.467X_{15}+0.829X_{16}+0.085X_{17} \quad (3)$$

$$Z_2=0.526X_1+0.605X_2+0.372X_3-0.691X_4-0.028X_5-0.085X_6+0.434X_7-0.015X_8+0.587X_9-0.194X_{10}+0.191X_{11}+0.152X_{12}+0.028X_{13}+0.391X_{14}+0.301X_{15}+0.437X_{16}-0.286X_{17} \quad (4)$$

$$Z_3=0.048X_1-0.112X_2+0.013X_3+0.050X_4+0.327X_5-0.304X_6+0.234X_7+0.364X_8-0.128X_9+0.690X_{10}-0.004X_{11}+0.312X_{12}+0.410X_{13}+0.067X_{14}+0.431X_{15}+0.166X_{16}+0.411X_{17} \quad (5)$$

$$Z_4=0.002X_1-0.166X_2-0.017X_3+0.109X_4+0.090X_5-0.016X_6+0.105X_7-0.779X_8+0.216X_9-0.173X_{10}-0.126X_{11}+0.113X_{12}+0.160X_{13}+0.296X_{14}-0.100X_{15}+0.123X_{16}+0.607X_{17} \quad (6)$$

$$Z_5=0.099X_1+0.195X_2+0.175X_3-0.239X_4-0.128X_5+0.134X_6-0.110X_7+0.316X_8-0.471X_9-0.194X_{10}-0.007X_{11}-0.160X_{12}-0.097X_{13}+0.366X_{14}-0.111X_{15}-0.070X_{16}+0.532X_{17} \quad (7)$$

$$Z_6=-0.389X_1-0.121X_2+0.174X_3+0.057X_4-0.133X_5+0.063X_6-0.142X_7+0.177X_8+0.395X_9-0.136X_{10}-0.213X_{11}-0.330X_{12}-0.092X_{13}+0.064X_{14}+0.568X_{15}+0.007X_{16}+0.159X_{17} \quad (8)$$

式中:Z_1—Z_6——6 个主成分;X_1—X_{17}——各评价指标进行标准化后的变量。

将标准化后的变量分别带入这 6 个函数方程,得到不同林龄苹果园的土壤得分 Z,用因子的方差贡献率作为综合评价的权重,按照各自的方差贡献率加权相加得出各土地利用类型下得土壤质量综合得分,计算公式为:

$$F=0.464Z_1+0.142Z_2+0.091Z_3+0.075Z_4+0.060Z_5+0.057Z_6 \quad (9)$$

表 6 为各样地不同主成分因子得分和综合得分情况。由表 6 可以看出,荒地,2 a,5 a,10 a 和 25 a 的土壤质量综合得分分别为 −5.404,−2.246,1.424,1.923,4.310。其中 25 a 的土壤质量综合得分最高,且只有 5 a,10 a 和 25 a 的土壤质量综合得分为正值,说明这 3 种样地类型的土壤质量高于平均水平,而荒地和 2 a 的土壤质量综合得分都为负值,低于平均水平。

表 6　主成分因子得分与综合得分

种植年限	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	F	排序
CK	−12.031	0.594	1.346	0.105	−0.254	−0.371	−5.404	5
2 a	−4.611	−0.075	−1.773	−0.226	0.867	0.553	−2.246	4
5 a	3.967	−1.756	−0.767	−0.665	−0.339	−0.487	1.424	3
10 a	4.603	−2.429	0.801	0.659	−0.157	0.331	1.923	2
25 a	8.067	3.642	0.436	0.190	−0.065	−0.015	4.310	1

注:Z_1 为第 1 主成分因子得分,Z_2 为第 2 主成分因子得分,Z_3 为第 3 主成分因子得分,Z_4 为第 4 主成分因子得分,Z_5 为第 5 主成分因子得分,Z_6 为第 6 主成分因子得分;F 为土壤质量综合得分。

4　讨 论

4.1　不同林龄苹果园土壤理化性质变化特征

在干旱贫瘠土壤长期种植果树,表层沙土不断固定,大气降尘沉积量逐渐增加,加之生物过程的加强,共同促进了土壤理化性质演变[18]。土壤基质中土壤颗粒大小不同使得其土壤理化性质差异较大。单个土壤颗粒的大小和形状、化学组成和矿物质以及颗粒表面的物理化学性质各不相同,进而影响土壤的肥力状况、植被生长繁衍、土壤溶质的运移[17]。本研究中,不同林龄苹果园都是以黏粉粒为主,极细砂粒和细砂粒次之,粗砂粒含量最少,较种植果树之前改善许多,黏粉粒含量显著增加,说明苹果园土壤肥力较好,土壤黏粉粒含量多而使得其保水、保肥性好,易耕作[24,31]。其中,10 a 的苹果园土壤黏粉粒含量最高,这是因为相较于 2 a 和 5 a 的苹果园和荒地而言,10 a 生长管理时间长,养分含量更充足,而 25 a 树体粗大,树体吸收土壤养分较多,使得老龄林地呈现出一定的土壤砂粒化。土壤容重和孔隙度反映了土壤的透水性和通气性,是决定林地土壤水源涵养和水土保持能力的重要因素[20]。本研究中,土壤容重表现为:CK>25 a>2 a>5 a>10 a,说明土壤容重越大则土壤越紧实,不利于通气透水,但苹果园精细管理并增施有机肥可以在一定程度上降低土壤容重。土壤孔隙度表现为种植苹果后的土壤孔隙度相较于荒地有所增加,是因为通过种植植被,植物根系量增加且有一定的延伸范围,枯落物增多从而导致孔隙度增加,但不同林龄之间无显著差异性,这可能是因为人为干扰和植被种植对土壤孔隙度的影响达到平衡。

本研究中,土壤含水量表现为:25 a>5 a>10 a>2 a>CK,即土壤含水量随着林龄增大而基本呈上升趋势。这与冉伟[19]对黄土高原丘壑区不同种植年限果园土壤水分变化规律相悖。可能是因为研究区降水少,林地内需要定期的人工灌水,每个样地灌水量相同,但取样时日照充足,在同样灌水的情况下林龄越小覆盖度越低,从而导致地表水分蒸发迅速,含水量降低。同样,土壤温度表现为:CK>2 a>5 a>10 a>25 a,其原因是林龄越小,郁闭度越小,阳光直射,使得土壤温度升高。近年来土壤学的研究结果表明,土壤电导率这一参数本身包含了反映土壤品质和物理性质的丰富信息[21]。土壤中盐分、水分及有机质含量,土壤压实度、质地结构和孔隙率等都不同程度地影响着土壤电导率的改变。本研究中,土壤电导率表现为:25 a>10 a>2 a>5 a>CK,土壤 pH 值表现为:10 a>25 a>5 a>CK>2 a,从整体上可以看出随着林龄的增加,土壤电导率和 pH 值呈上升趋势,这是因为随着种植年限增加,植被覆盖度高,再加上常年高温、缺少雨水淋洗,蒸发强烈,改变了自然状态下的水热平衡,土壤得不到雨水淋洗,致使盐分在土壤表层聚集[22],这可能是土壤电导率和 pH 值逐渐升高的原因。

土壤全氮含量与有机碳紧密相关，两者分布情况较为一致。本研究中随着种植年限的升高，有机碳含量基本呈上升趋势，但 2 a 的苹果园有机碳含量低于荒地，这可能与当地的苹果林管理措施有关：一是果树修剪，疏花、疏果等带走树叶枝条和果子，降低了有机物的投入，二是农户的耕作措施，如深翻土壤造成有机碳分解等，三是果农对有机肥的重视程度不够，对于农家肥投入很少甚至不投入[23]；全氮含量显著升高，这主要取决于有机碳的逐年积累，地表覆盖度的增加有效地防止土壤侵蚀，增加土壤肥力，有利于有机物质的积累与释放，且地表形成的枯枝落叶层为表层土壤全氮提供了重要来源[24]。并且林分林龄越高，土壤黏粉粒含量越高，全氮含量越高，这不仅受到土壤有机碳含量的影响，也与小粒径团聚体对 NH_4^+ 的吸附能力较高有关[25]。而土壤 C/N 却随着林龄的增大而逐渐降低，且荒地的土壤 C/N 值最大，达到 40%，这说明种植苹果年限越长，植被盖度越高，土壤微生物活性越大，分解归还土壤养分的速率越快，有利于提高土壤养分的含量，从而使得土壤 C/N 下降[26-28]。土壤养分元素对植被的生长起着决定性的作用，其中在苹果园中土壤速效钾、速效磷和土壤水解性氮的影响更为直接[29]。本研究中，随着种植年限的升高，土壤速效钾、速效磷和水解性氮的含量都显著提高，且 25 a 的养分含量显著高于其他样地，而化肥的投入是导致土壤磷素、钾素和硝态氮积累的重要因素[30]，因为是统一的经济化管理，随着施肥时间的增加，土壤中氮、磷、钾元素不断积累，但过量的氮磷积累又会对环境产生不利的影响，因此如何防止氮、磷进一步积累及其对环境的影响，应引起进一步的关注。土壤硒作为土壤中的“长寿元素”，与植物果实中的硒含量有着很大的关系，该研究区土壤硒含量丰富，其含量基本在 0.2～0.3 mg/kg 左右[31]。影响土壤硒含量的因素众多，其中成土母质是其最重要的来源。在原生地质环境中，硒的主要来源为富硒沉积层，如中生代黑色页岩和煤[32]。虽然该区域富硒土壤分布表现为对成土母质具有较高的继承性，但由于表层土壤硒元素不断的淋溶流失，使得水溶态硒被带走，导致表层硒含量低于深层硒含量。此外，硒在土壤中存在的形态较多，其中能被植物直接利用的硒称为生物有效硒。研究区 pH 值普遍≥7.5，属弱碱性，相关研究表明，碱性条件下，硒元素生物有效性更高，水溶性硒含量较多[33]，该形态的硒更加稳定，易被植物吸收，这是对该区域富硒及保持其生物有效性有利的因素。伍艳等对黄河下游滩区原阳段硒元素分布特征研究表明，硒含量与有机质含量呈正相关，土壤有机质对土壤中硒元素的吸附与固定起重要作用，土壤有机质含量越高，对土壤中硒的吸附能力越强，土壤中硒的总含量也相对越高[34]，但会导致土壤中水溶性硒含量及生物有效性会降低。研究区有机质含量为 1.3～2.3 g/kg，为低等水平，对土壤中硒含量影响不明显。

4.2 不同林龄苹果园土壤理化性质指标的相关关系

土壤理化性质指标间的相互作用及协调效应能够综合反映土壤生产力的高低和对逆境的适应能力[14]。土壤粒径组成对土壤的结构和性质起着决定性作用，可以影响土壤水分的吸收、阴阳离子的转化以及养分元素碳、氮的供应。本研究中，土壤粒径与土壤含水量之间相关性显著，这是因为土壤粗砂粒、细砂粒和极细砂粒有利于水分下渗，而黏粉粒又有利于水分积累，提高持水能力[13]。而土壤黏粉粒与土壤全氮和有机碳呈显著正相关，是由于黏粉粒与有机质胶结的主要无机胶体，其为胶结作用提供了胶结环境和胶结动力，能对土壤良好的结构性能起到一定的保护作用[35-36]。

土壤容重与土壤黏粉粒和土壤含水量呈显著负相关，是因为表层土壤中的黏粉粒遭受风力吹蚀得以损失，从而增大土壤容重，不利于形成土壤团粒结构，降低土壤含水量，增大土壤侵蚀[20]。土壤含水量与土壤养分呈正相关是因为一定量的土壤含水量有利于土壤结构的维持，从而增加土壤的吸附性，进而增加土壤对养分的吸收和稳固能力，使得土壤养分含量增加[37]。通过分析土壤养分之间的相关性得知，土壤养分元素之间相关性显著，这是由于在一定程度上施用有机肥造成的。该地区土壤呈弱碱性，不利于土壤中微生物分解残落物，从而与有机质呈负相关，抑制了土壤对氮的吸收。这与夏栋等[38]对植被混凝土的 pH 值、有机质、速效养分进行相关性分析结果相吻合。说明通过提高土壤有机质的含量，有利于土壤中大量元素的速效养分含量的提升。这与张强等[39]在北京昌平区苹果园所得到的研究结果相似。土壤有机质与土壤全氮和速效养分显著正相关，说明提高土壤有机质的含量可以增加土壤大量元素的有效养分含量，这可能是由于土壤有机质和氮素之间存在相互关系的原因[4]。田小明[40]等在石河子大学试验站温室进行的盆栽试验也表明在一定程度上施用有机肥可以提高土壤养分、微生物生物量，增强土壤酶活性。

4.3 不同林龄苹果园土壤质量评价

进行土壤质量评价的目的是正确认识土壤，反映土壤管理的变化，从而有效管理和保护土壤[41]。土壤质量是土壤诸多物理、化学和生物学性质的综合反

映[41]。其中影响土壤质量的因子很多,一个统一的、无量纲的综合指标可更加直观表现土壤质量总体情况[39],因此一些数学方法对土壤质量综合评价起到了重要作用[42]。但是,到目前为止,土壤质量评价还处于相对薄弱的领域[45],仍没有统一的评价标准[43-45],不同研究者评价的目的性和针对性不同,选用的评价方法和指标亦有差异[45-46]。本研究采用主成分分析筛选出对土壤质量影响较大的几个指标因素,并通过评价结果可以看出,宁夏沙区不同林龄苹果园的土壤质量综合得分排序为:25 a>10 a>5 a>0>2 a>CK,其中综合得分越高,说明该林龄的土壤质量的综合程度越高,反之则越低。

25 a,10 a,5 a 的果园综合得分为正值,说明该植被类型下的土壤质量高于平均水平,而 CK 和 2 a 综合得分值为负,则说明土壤质量低于平均水平[47]。综合来看 25 a 的苹果园土壤状况最好;其次为 10 a 和 5 a 的苹果园土壤质量良好;2 a 苹果园和荒地的土壤质量较差,但相较于荒地来看,2 a 果园也有所改善。这与陈磊[4]对黄土高原坡地苹果园土壤质量评价结果存在差异,但与当地实际较为相符。本研究区位于沙坡头区,日照充足,但降雨量稀少,土壤演变过程相较于黄土高原坡地要慢一些,其中 25 a 苹果园的土壤经过长时间的施肥和灌溉,土壤养分积累充足,且避免翻耕和除草等人为干扰后地表植被类型增多、覆盖度变大,因此土壤质量评分较高[48]。而 2 a 苹果园正处于生长期,土壤肥力较差,土壤养分积累不足,导致土壤质量较差;5 a 苹果园处于盛果期,土壤质量明显得到改善,林地枯落物的增多使得土壤养分在通过施肥积累的同时得到枯落物养分归还[49-51],土壤质量良好;10 a 苹果园相较于 5 a 土壤养分积累时间更长,积累量增多,其质量也随之提高。在本研究中,长期种植苹果树可以有效改善土壤质量并对其维持产生积极影响。

5　结 论

宁夏沙区不同林龄苹果园的土壤质量随着林龄的增加而呈上升趋势,土壤养分含量也不断增加,特别是硒元素含量处在较高水平,说明在沙区种植苹果这类经济林植被在带动区域经济发展的同时还可以从一定程度上改善土壤质量,进而改善区域生态环境。但长期施用化学肥料,土壤的氮素在硝化细菌的作用下转化为硝态氮,且随着雨水淋溶到深层土壤,使得土壤硝酸盐不断累积。因此,重视林地平衡施肥,控制氮磷肥的同时增施钾肥和有机肥,有利于苹果园健康发展和综合管理。

[参 考 文 献]

[1] 陈磊,李占斌,李鹏,等. 黄土高原坡地苹果园土壤质量演变研究:以陕西省富县为例[J]. 水土保持通报,2010,30(6):86-90.

[2] 陈美军,段增强,林先贵. 中国土壤质量标准研究现状及展望[J]. 土壤学报,2011,48(5):1059-1071.

[3] 王红叶,鲁兴凯,赵伟丽,等. 西南冷凉高地苹果园土壤养分状况分析[J]. 西南林业大学学报:自然科学,2018,38(3):209-213.

[4] 韩建,霍增起,尹兴,等. 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.

[5] 张珍明,乐乐,林昌虎,等. 不同种植年限山银花根区土壤生物特性[J]. 水土保持通报,2015,35(5):71-76

[6] 周海霞,兰挚谦,韩泽宇,等. 不同种植年限对设施蔬菜土壤及基质质量的影响[J]. 河南农业大学学报,2018,52(5):703-709.

[7] 郑敏娜,梁秀芝,李荫藩,等. 晋北盐碱区不同种植年限人工紫花苜蓿草地土壤质量的评价[J]. 草地学报,2017,25(4):888-892.

[8] 刘军,党晓宏. 露天煤矿排土场边坡不同年限沙棘对林下土壤肥力质量的影响[J]. 浙江林业科技,2017,37(6):9-14.

[9] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 宁夏沙坡头区土地利用景观格局变化及其驱动力分析[J]. 西北林学院学报,2018,33(6):197-203.

[10] 王鹏,王亚娟,刘小鹏,等. 基于 RS 与 GIS 的沙坡头区生态系统服务价值研究[J]. 水土保持研究,2018,25(4):250-256.

[11] 刘佳楠,刘任涛,赵娟,等. 沙地柠条灌丛枯落叶输入特征及对土壤理化性质的影响[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(11):169-175.

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[13] 许婷婷,董智,李红丽,等. 不同设障年限沙丘土壤粒径和有机碳分布特征[J]. 环境科学研究,2014,27(6):628-634.

[14] 黄婷,岳西杰,葛玺祖,等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价:以长武县耕地土壤为例[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(3):141-147,187.

[15] 贾文峰. 乌兰布和沙漠东缘人工绿洲土壤质量演变研究[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.

[16] 卢铁光,杨广林,王立坤. 基于相对土壤质量指数法的土壤质量变化评价与分析[J]. 东北农业大学学报,2003,34(1):56-59.

[17] Huang Changyong. Soil Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.

[18] Yang Wenbing. Desertification Control with Low Coverage Vegetation[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[19] 冉伟,谢永生,郝明德. 黄土高原沟壑区不同种植年限果园土壤水分变化[J]. 西北农业学报,2008,17(4):229-233.

[20] 富丽,赵锦梅,李永宁,等. 陇东黄土高原不同林龄苹果园枯落物及土壤的水文效应[J]. 水土保持通报,2018,38(5):40-45.

[21] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报,2000,5(4):39-41.

[22] Su Yongzhong, Zhang Tonghui, Li Yulin, et al. Changes in soil properties after establishment of Artemisia halodendron and Caragana microphylla on shifting sand dunes in semiarid Horqin Sandy Land, Northern China [J]. Environmental Management, 2005,36(2):272-281.

[23] 杨雨林,郭胜利,马玉红,等. 黄土高原沟壑区不同年限苹果园土壤碳、氮、磷变化特征[J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4):685-691.

[24] 李玮,郑子成,李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报,2015,26(1):9-16.

[25] 姚姣转,刘廷玺,童新,等. 科尔沁沙地沙丘—草甸相间地土壤颗粒的分形特征[J]. 中国沙漠,2016,36(2):433-440.

[26] 潘萍,赵芳,欧阳勋志,等. 马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系[J]. 生态学报,2018,38(11):3988-3997.

[27] Sayer E J, Tanner E V J, Cheesman A W. Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest. Plant and Soil, 2006,281(1/2):5-13.

[28] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, et al. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests[J]. Plant and Soil, 2011,339(1/2):163-175.

[29] 薛延丰,石志琦. 不同种植年限设施地土壤养分和重金属含量的变化特征[J]. 水土保持学报,2011,25(4):125-130.

[30] 刘彦辉. 不同种植年限的苹果树对土壤氮磷钾的含量的影响[J]. 绿色科技,2016(1):100-101.

[31] 郑小春,车金鑫,卢海蛟,等. 陕西白水县红富士苹果示范园土壤养分状况分析[J]. 西北农业学报,2011,20(10):97-101.

[32] Wang Zijian, Gao Yuxi. Biogeochemical cycling of selenium in Chinese environments[J]. Applied Geochemistry, 2001,16(11/12):1345-1351.

[33] 王松山,梁东丽,魏威,等. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报,2011,48(4):823-830.

[34] 伍艳,王玮屏,蔡怀森,等. 黄河下游滩区原阳段硒元素分布特征及影响因素[J]. 人民黄河,2019,41(12):1-7.

[35] 李学斌,张义凡,陈林,等. 荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J]. 西北植物学报,2017,37(8):1635-1644.

[36] Su Yongzhong, Zhang Tonghui, Li Yulin, et al. Changes in soil properties after establishment of Artemisia halodendron and Caragana microphylla on shifting sand dunes in semiarid Horqin sandy land, Northern China [J]. Environmental Management, 2005,36(1):272-281.

[37] 张芳芳,张丽萍,王文艳,等. 水蚀风蚀交错区土壤养分特征与土壤质地及水分关系[J]. 水土保持学报,2012,26(2):99-104.

[38] 夏栋,许文年,赵娟,等. 植被混凝土护坡基材 pH、有机质及其与速效养分的相关性分析[J]. 水土保持研究,2010,17(6):224-227.

[39] 张强,魏钦平,刘惠平,等. 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.

[40] 田小明,李俊华,王成,等. 连续 3 年施用生物有机肥对土壤养分、微生物生物量及酶活性的影响[J]. 土壤,2014,46(3):481-488.

[41] 董莉丽,郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区土地利用和植被类型对土壤质量的影响[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2010,46(2):39-44.

[42] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报,2006,37(1):137-143.

[43] 贡璐,张海峰,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报,2011,31(14):4136-4143.

[44] 桂东伟,穆桂金,雷加强,等. 干旱区农田不同利用强度下土壤质量评价[J]. 应用生态学报,2009,20(4):894-900.

[45] 崔东,肖治国,孙国军,等. 伊犁河谷不同土地利用方式下土壤质量评价[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2017,53(2):112-117.

[46] 贡璐,张雪妮,吕光辉,等. 塔里木河上游典型绿洲不同土地利用方式下土壤质量评价[J]. 资源科学,2012,34(1):120-127.

[47] 杨凤群. 农牧交错带植被恢复的土壤质量响应及评价[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.

[48] 梁运江,王非非,谢修鸿,等. 不同栽植年限苹果梨园秋季土壤有机磷组分的剖面分布特征[J]. 吉林农业大学学报,2017,39(5):558-569.

[49] 欧延升,汪霞,李佳,等. 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(1),38-45.

[50] 闫亚丹,徐福利,邹诚,等. 黄土高原坡地苹果园土壤肥力及矿质氮累积分析[J]. 水土保持通报,2009,29(4):31-36.

[51] 樊军,邵明安,郝明德,等. 黄土旱塬塬面生态系统土壤硝酸盐累积分布特征[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(1):8-12.