

DOI: 10.11766/trxb201707280168

黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征*

李青华^{1, 2} 张静^{1, 2} 王力^{1, 2†} 王延平^{1, 2}

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要 揭示不同树龄苹果林土壤剖面水分特征及土壤养分演变规律, 探明土壤干化引起的养分失衡原因, 对黄土高原丘陵沟壑区苹果林地土壤水分、养分科学管理以及果园合理施肥具有重要现实意义。以陕北米脂县为研究区, 选取不同树龄山地苹果林为研究对象, 分别测定了 7 a、10 a、18 a、25 a、30 a 和 41 a 苹果林地 0~1 000 cm 土层土壤湿度和 0~300 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量, 分析测定了深度范围内土壤干化情况、各养分指标丰缺状况及其随种植年限和土层深度的变异特征及不同树龄苹果林地 60~300 cm 土层土壤水分与养分的相互关系。结果表明: 黄土丘陵沟壑区不同树龄山地苹果林深层土壤均出现严重或强烈干化, 0~1 000 cm 土层平均土壤含水量随树龄增加呈先增加后降低再略有增加趋势。该地区不同树龄苹果林 0~300 cm 土层土壤有机质、全氮和碱解氮含量均处于极缺状态, 全磷、速效磷含量较缺, 速效钾含量中等。幼龄期果树土壤水分与有机质、全氮、碱解氮相关性显著, 而盛果期及衰退期果树土壤水分与各养分含量相关性不显著。建议不同树龄果园除应采取蓄水保墒措施外, 尤其应注重有机肥和氮肥投入, 适当增施磷肥, 可少施或不施钾肥。相较于由于干化引起的养分失衡, 该地区土壤干化问题更应引起关注。

关键词 山地苹果林; 土壤干化; 干化指数; 土壤养分; 养分短缺

中图分类号 S158.2 **文献标识码** A

陕西省是我国苹果主产区, 独特的光热资源使其成为我国优质苹果生产基地之一。自 20 世纪 80 年代在陕西省苹果产业战略北移的布局下, 开始大面积发展苹果种植, 目前苹果种植已成为当地农业经济发展、农民增收的主要方式。陕北黄土丘陵沟壑区属干旱气候区, 潜在蒸发强烈, 降水量远小于蒸发量, 水资源短缺已成为制约该地区生态环境和农业可持续发展的重要因素。自 20 世纪 60 年代发现土壤干化现象, 一般认为, 土壤干化是气候干旱与植被过度耗水双重作用下形成的, 持续干化的后果是形成土壤干层。土壤干层是指土壤剖面中, 隐伏在多年平均降水入渗层以下, 因植被深层吸水且不能

被雨季降水入渗恢复, 由土壤水分负循环而导致的干化土层^[1]。至 80 年代, 人工林草地下普遍出现土壤干层, 且干层厚度越来越深。因此有关土壤干化及土壤水分问题一直是目前有关生态、农业等方面研究的热点问题。同时, 土壤营养状况作为影响果树生长、产量以及果实品质的重要因素^[2-3], 对苹果产业持续健康发展也同等重要。然而, 在大面积苹果经济林种植和生产过程中, 随着种植面积的扩大及果树利用年限的增长, 苹果林土壤水分和养分消耗持续增加, 土壤水分不断亏缺, 养分含量普遍降低, 果园生产力显著降低, 与之伴随一系列的土壤环境恶化、养分不均衡、果品生理病害严重,

* 国家自然科学基金项目 (41390463, 41530854, 41741002) 和城市与区域生态国家重点实验室开放基金项目 (SKLURE2016-2-4) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.41390463, 41530854, 41741002) and the State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology Open Foundation (No.SKLURE2016-2-4)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 李青华 (1993-), 女, 河南浚池县人, 硕士研究生, 主要从事生态水文研究。E-mail: liqinghua826@163.com

收稿日期: 2017-07-28; 收到修改稿日期: 2017-09-26; 优先数字出版日期: www.cnki.net: 2017-11-10

苹果产量及品质下降等问题^[4], 导致生态和经济效应欠佳。又因苹果属多年生、深根系、高耗水、喜肥水植物, 对土壤水分利用深度可超过10 m, 对养分利用深度可达2 m^[5]。因此, 测定和分析苹果园地深层土壤水分及养分状况, 综合分析和评估影响果园产量和品质的主要因素, 对实现果园水分、养分科学管理和合理施肥具有重大意义。

水分是限制干旱半干旱地区植物生长最重要的制约因子, 土壤水环境可显著地影响土壤营养物质矿化、积累和吸收转运、微生物活动等。近年来, 许多学者对黄土高原土壤水分和养分特征进行了研究。如土壤水分研究包括土壤水分区域分异特征、植被生长对土壤生态环境的影响、土壤干化对陆地水循环的影响以及从植物生理角度明确植被蒸腾耗水规律等^[6-8]。养分研究包括不同土地利用方式下土壤养分异质性、不同施肥处理对土壤养分或对土壤物理性质的影响、长期施肥条件下农田或果园养分变异特征以及土壤养分对果实品质的影响等^[9-12], 但针对不同树龄山地苹果林深层土壤水分与养分的综合分析研究较少。陕北黄土丘陵区大多为山地梯田雨养果园, 立地条件差, 土壤较贫瘠, 苹果林地土壤干层的出现不仅阻止雨季对深层土壤水分的补充, 导致土壤水库调节作用几乎丧失, 而且进一步影响到果树根系对养分的吸收和利用, 因此揭示深层土壤水分和养分变异特征以及土壤干化诱发养分失衡的机理研究具有重要现

实意义。本研究采用空间序列代替时间序列的方法, 旨在揭示不同树龄苹果林土壤剖面水分特征和土壤养分演变规律, 探明土壤干化引起的养分失衡原因, 以期为黄土高原丘陵沟壑区苹果林地土壤水分、养分科学管理以及果园土壤培肥、合理施肥提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验于西北农林科技大学米脂试验站进行。米脂县位于陕北黄土高原北部, 陕西省榆林市境内(109°49'~110°29'E, 37°39'~38°5'N)。属典型的黄土丘陵沟壑地貌, 暖温带半干旱气候区, 多年平均气温8.3℃。日照时数8.35 h, 无霜期160~170 d, 年均降雨量400 mm左右, 多集中在7—9月。土壤类型主要为黄绵土, 土层深厚, 土质疏松, 土壤容重1.3 g cm⁻³, 田间持水量22%, 凋萎湿度3.5%, 土壤稳定湿度12.75%, pH8.91。试验选择地势、种植密度、施肥措施和田间管理尽量一致的7 a、10 a、18 a、25 a、30 a和41 a六类不同树龄典型旱作果园(表1), 均无补充灌溉。同时选择与25 a果园临近的玉米地作为对照, 测定土壤水分。所有果园土壤类型均为黄绵土、立地条件为梯田果园, 栽植品种主要为红富士、秦冠。

表1 样地概况

Table 1 General information of the sample plots

树龄	采样地点	经度	纬度	海拔	种植密度
Tree age(a)	Sample site	Longitude (E)	Latitude (N)	Altitude(m)	Planting density(m × m)
7	党塔Dangta	110°05'	37°47'	1021	4 × 5
10	高西沟Gaoxigou	110°11'	37°52'	1034	4 × 4
18	高家坪Gaojiaping	110°25'	37°46'	1164	4.5 × 4
25	麻渠Maqu	110°14'	37°48'	1060	3.5 × 5
30	泉家沟Quanjiagou	110°16'	37°46'	1047	3 × 4
41	麻渠Maqu	110°14'	37°48'	1067	3.5 × 5
农田FL	高西沟Gaoxigou	110°12'	37°51'	1050	—

注: FL代表农田。下同 Note: FL stands for farmland. The same below

1.2 苹果林地土壤水分和养分测定

在黄土丘陵沟壑区的典型代表米脂县于2016年7月中旬选取7 a、10 a、18 a、25 a、30 a和41 a六类不同树龄典型山地果园，分别代表三个生长期，幼龄期（7 a、10 a）、盛果期（18 a、25 a）及衰退期（30 a、41 a）。每个果园选择三个采样点，每个采样点位于生长均匀一致的四棵果树的中心，用土钻法分层采取土样。其中，土壤水分取样深度为0~1 000 cm，土壤养分取样深度为0~300 cm，均为每隔20 cm取一个土样，土壤水分的测定用烘干法：在105℃恒温条件下连续烘干8 h至恒重，分别称湿土质量、干土质量和铝盒质量，最后分别计算各层土壤质量含水量（ w ），计算如下：

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} \times 10^3 \quad (1)$$

式中， w 为土壤质量含水量， g kg^{-1} ； m_1 为湿土加铝盒质量， g ； m_2 为干土加铝盒质量， g ； m_0 为铝盒质量， g ； 10^3 为换算系数。

土壤养分的测定：将采集到相同样地3个采样点相同土层土样均匀混合，用四分法取样，将剩余土壤样品带回实验室自然风干后过0.15 mm和1 mm筛，妥善保存备用。测定项目包括：土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷和速效钾。有机质测定采用重铬酸钾外加热法，全氮测定采用凯氏定氮法，碱解氮测定采用碱解扩散法，全磷测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解—钼锑抗比色法，速效磷测定采用 $0.5 \text{ mol L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提—钼锑抗比色法，速效钾测定采用 $1 \text{ mol L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提—火焰光度法^[13]。

1.3 土壤干化评价方法

土壤干化指数 (soil desiccation index, SDI)用于评价土壤干化强度^[14]，定义为某一土层实际土壤湿度占该层土壤稳定有效含水量的比值。本研究以土壤稳定湿度值作为土壤干化的上限指标，其值以田间持水量与土壤凋萎湿度的算术平均值表示。为了准确描述苹果林地干旱胁迫程度和干化强度，采用曹裕等^[15]修订过的土壤干化指数，计算如下：

$$\text{SDI} = \left(1 - \frac{\text{SH} - \text{WM}}{\text{SSH} - \text{WM}}\right) \times 100\% = \frac{\text{SSH} - \text{SH}}{\text{SSH} - \text{WM}} \times 100\% \quad (2)$$

式中，SDI为土壤干化指数，%；SH为土壤湿度，%；WM为凋萎湿度，取值为3.5%，SSH为土壤稳定湿度，取值为12.75%。土壤干化强度划分为6级：(1)SDI \geq 100%，为极度干化；(2)75% \leq SDI<100%，为强烈干化；(3)50% \leq SDI<75%，为严重干化；(4)25% \leq SDI<50%，为中度干化；(5)0 \leq SDI<25%，为轻度干化；(6)SDI<0，为无干化。

1.4 数据处理

不同树龄苹果林地土壤不同养分指标平均值、标准差与变异系数采用Excel 2007计算，用Origin 8.0对土壤剖面水分和养分状况作图，采用SPSS 19.0软件进行显著性检验及Pearson相关性分析。

2 结 果

2.1 苹果林地0~1 000 cm土层土壤湿度分布特征

表2为不同树龄苹果林地0~1 000 cm不同土层土壤湿度和干化指数，结果显示，不同树龄苹果林0~1 000 cm土层土壤平均湿度随树龄增长呈先增加后降低趋势，在果树进入衰败期后含水量稍有恢复。SDI与土壤湿度呈反比，表现为随树龄增加呈先降低-后增加-再降低趋势，排序为25 a>41 a>30 a>18 a>7 a>10 a>农田，表明随果树的生长和树龄增大，土壤干化程度加剧，在盛果期干化程度达到最大。不同土层土壤湿度差异较大，不同树龄0~100 cm土层土壤湿度均较高，除25 a、41 a外，其余未出现干化。100~300 cm土层土壤湿度较上层明显降低，不同树龄苹果林地在这一土层出现严重或强烈干化。在300~1 000 cm土层不同树龄林地土壤湿度差异较大，表现为7 a、10 a出现轻度或中度干化，18 a、25 a、30 a、41 a林地均为强烈干化，表明随果树树龄增加，对深层土壤水分消耗导致果园深层土壤干化程度加剧。农田在0~300 cm各土层均未出现干化，在深层300~1 000 cm土层出现了轻度干化。

表2 不同树龄苹果林地0~1000 cm土层土壤湿度和干化指数

Table 2 Soil humidity (SH) and soil desiccation index (SDI) along the 0~1 000 cm soil profiles in the apple orchards relative to age of the orchard

树龄 Tree age (a)	0~100 cm		100~300 cm		0~300 cm		300~1 000 cm		0~1 000 cm	
	SH (%)	SDI (%)	SH (%)	SDI (%)	SH (%)	SDI (%)	SH (%)	SDI (%)	SH (%)	SDI (%)
7	13.6 ± 1.8 ^{bc}	-8.7	6.0 ± 1.5 ^{bc}	73.3	8.5 ± 4.0 ^{bc}	46.0	9.8 ± 1.5 ^b	32.3	9.4 ± 2.6 ^c	36.4
10	13.7 ± 1.2 ^{bc}	-10.3	7.2 ± 1.7 ^b	60.0	9.4 ± 3.4 ^{bc}	36.5	11.5 ± 3.4 ^a	13.6	10.9 ± 3.5 ^b	20.5
18	17.3 ± 1.1 ^a	-49.3	7.1 ± 2.9 ^b	61.1	10.5 ± 5.4 ^b	24.3	5.5 ± 0.8 ^c	78.7	7.0 ± 3.8 ^d	62.4
25	10.5 ± 3.4 ^c	23.8	4.7 ± 0.3 ^c	87.0	6.7 ± 3.4 ^c	65.9	5.5 ± 0.7 ^c	78.9	5.8 ± 2.0 ^d	75.0
30	15.8 ± 0.2 ^{ab}	-33.4	6.1 ± 2.1 ^{bc}	71.8	9.4 ± 5.0 ^{bc}	36.7	5.1 ± 0.8 ^c	82.3	6.4 ± 2.0 ^d	68.6
41	11.8 ± 3.4 ^c	9.8	4.5 ± 0.5 ^c	89.0	7.0 ± 4.0 ^c	62.6	5.7 ± 0.9 ^c	76.0	6.1 ± 2.4 ^d	72.0
农田FL	15.9 ± 2.0 ^{ab}	-34.1	14.4 ± 1.2 ^a	-17.5	14.9 ± 1.7 ^a	-23.1	11.2 ± 0.9 ^a	16.9	12.3 ± 2.6 ^a	4.9

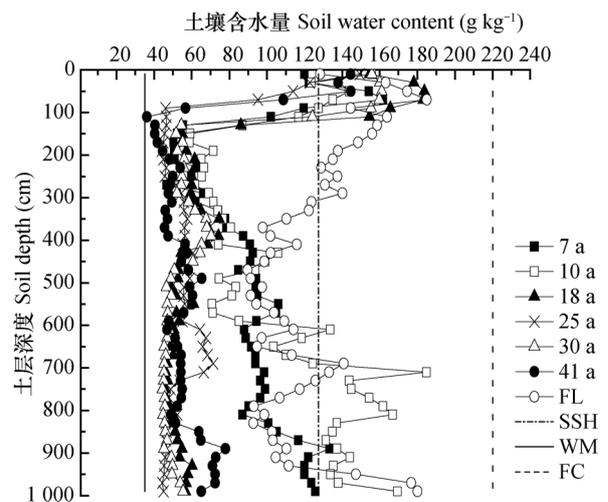
注：同列不同字母表示差异达显著水平 ($p < 0.05$)。下同 Note: Different letters in the same column indicate significant differences at $p < 0.05$. The same below

各树龄苹果林地土壤水分在垂直剖面上总体趋势较为一致，并且随着果树生长年限的增加呈规律性变化(图1)。土壤水分在0~60 cm范围内变化幅度较大，不同树龄苹果林地0~60 cm土层总体上均保持较高的湿度，大于土壤稳定湿度，为土壤水分敏感层，60~100 cm土层土壤水分迅速下降，在100 cm左右降至最低值。因100 cm以下土层受外界环境因素的影响相对较小，所以植物根系吸收水分用于植物生长与蒸腾的土壤水分最多的层面就是土壤低湿层^[16-17]。由图1可知，各树龄林地土壤低湿层主要位于100~300 cm土层，但不同树龄林地土壤低湿层范围差异明显。幼龄期果园土壤低湿层主要位于120~360 cm范围，而盛果期和衰退期果园土壤低湿层主要位于120~600 cm范围。随树龄增加，果树根系耗水深度不断增加，导致果树耗水层逐渐下移。600~1 000 cm土层范围内，幼龄期果园土壤含水量呈波动增加趋势，而盛果期和衰退期果园土壤含水量仍处于较低湿度范围内。从土壤水分剖面图(图1)来看，农地土壤含水量在较高湿度范围内波动，果园与农地相比较，农地各土层土壤含水量显著大于各树龄果园土壤含水量。

2.2 苹果林地0~300 cm土层土壤养分含量特征

不同树龄苹果林地土壤有机质0~100 cm土层含量稍高于100~300 cm土层(表3)，由标准差和变异系数的大小可以看出，不同树龄土壤有机质含量的变异在0~100 cm土层略大于100~300 cm

土层。0~100、100~300 cm土层土壤有机质含量随树龄变化趋势基本相同，均为先增大后减小，分别在10 a、18 a时达到最大值，含量为4.58、3.05 mg kg⁻¹。不同树龄0~300 cm土层有机质含量差异显著，平均值由大到小依次为18 a>10 a>7 a>25 a>41 a>30 a。



注：FL、SSH、WM、FC分别代表农田、土壤稳定湿度、凋萎湿度、田间持水量 Note: FL, SSH, WM and FC stands for farmland, soil stable humidity, wilting moisture and field water holding capacity, respectively

图1 不同林龄苹果林地0~1 000 cm土层土壤含水量剖面分布

Fig. 1 Distribution of soil water content along the 0~1 000 cm soil profile in the apple orchards relative to age of the orchard

不同树龄苹果林地土壤全氮和碱解氮含量均以0~100 cm土层最高, 尤其0~100 cm土层碱解氮含量显著大于100~300 cm土层。且0~100 cm土层含量随树龄变化幅度均较100~300 cm土层小, 但不同土层两者含量随树龄增大变化趋势基本相同, 均表现为先增大后减小再略有增大。0~100、100~300 cm土层土壤全氮含量分别在10 a、41 a时达到最大值, 碱解氮含量分别在25 a、30 a达到最大值。不同树龄0~300 cm土层全氮含量差异显著, 平均值由大到小依次为25 a=41 a>18 a>10 a>7 a>30 a, 但不同树龄0~300 cm土层碱解氮含量差异不显著。

不同树龄土壤全磷和速效磷含量均以100~300 cm土层较高, 且100~300 cm土层含量随树龄变化幅度均较0~100 cm土层小。不同土层两者含量随

树龄增大变化趋势相同, 均表现为先增大后减小再略有增大。0~100、100~300、0~300 cm土层土壤全磷含量在25 a达到最大值, 速效磷含量在10 a或18 a时达到最大值。不同树龄苹果林0~300 cm土层全磷含量差异显著, 平均值由大到小依次为25 a>41 a>10 a>7 a>18 a>30 a, 土壤速效磷含量差异也显著, 平均值由大到小依次为18 a>25 a>10 a>7 a>30 a>41 a。

土壤速效钾含量变化同土壤全氮。不同树龄苹果林0~300 cm土层速效钾含量差异显著, 其平均值由大到小依次为25 a>7 a>18 a>10 a>41 a>30 a。不同土层间相比较, 0~100 cm土层速效钾含量较100~300 cm土层稍高。同一土层不同树龄土壤速效钾含量均在30 a时为最低值, 25 a或7 a时为最高值。

表3 不同树龄苹果林地0~300 cm土层土壤养分含量

Table 3 Distribution of soil nutrient contents along the 0~300 cm soil profile in the apple orchard relative to age of the orchard

土层深度 Soil depth (cm)	树龄 Tree age (a)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N (mg kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available K (mg kg ⁻¹)
0~100	7	2.7 ± 0.7	0.22 ± 0.04	13.0 ± 4.6	0.51 ± 0.03	8.3 ± 7.5	123.2 ± 45.2
	10	4.6 ± 1.5	0.32 ± 0.09	15.3 ± 8.3	0.57 ± 0.08	13.3 ± 11.6	127.6 ± 63.9
	18	4.5 ± 1.2	0.25 ± 0.07	17.1 ± 10.4	0.54 ± 0.05	10.7 ± 8.4	88.1 ± 20.7
	25	3.5 ± 2.1	0.29 ± 0.11	17.3 ± 9.1	0.65 ± 0.04	5.3 ± 0.9	124.6 ± 25.2
	30	3.2 ± 1.1	0.19 ± 0.08	11.5 ± 7.5	0.53 ± 0.03	7.9 ± 3.6	80.7 ± 36.3
	41	2.7 ± 2.0	0.25 ± 0.11	14.7 ± 10.4	0.49 ± 0.03	3.3 ± 1.1	89.0 ± 38.1
	平均值Mean	3.5 ± 0.8	0.25 ± 0.04	14.8 ± 2.1	0.55 ± 0.05	8.1 ± 3.3	105.5 ± 19.8
	CV(%)	22	18	14	9	40	19
100~300	7	2.8 ± 1.2	0.17 ± 0.02	6.4 ± 3.1	0.57 ± 0.03	5.1 ± 2.1	111.3 ± 19.0
	10	2.3 ± 0.6	0.17 ± 0.03	3.4 ± 2.3	0.56 ± 0.03	5.8 ± 2.6	76.4 ± 3.4
	18	3.1 ± 0.6	0.23 ± 0.02	9.8 ± 3.9	0.54 ± 0.04	12.4 ± 1.1	110.8 ± 4.1
	25	2.3 ± 0.9	0.22 ± 0.03	6.4 ± 1.6	0.65 ± 0.06	11.7 ± 3.5	117.2 ± 6.6
	30	1.4 ± 0.8	0.14 ± 0.01	10.0 ± 3.5	0.55 ± 0.03	4.9 ± 1.4	67.6 ± 4.0
	41	2.4 ± 0.9	0.25 ± 0.02	8.0 ± 1.7	0.64 ± 0.05	5.2 ± 1.7	90.6 ± 14.1
	平均值Mean	2.4 ± 0.5	0.20 ± 0.04	7.4 ± 2.1	0.58 ± 0.04	7.5 ± 3.2	95.7 ± 18.8
	CV(%)	22	20	29	7	43	20
0~300	7	2.8 ± 1.0ab	0.18 ± 0.04b	8.6 ± 4.8a	0.55 ± 0.04bc	6.1 ± 4.9bc	115.3 ± 30.9a
	10	3.1 ± 1.5a	0.22 ± 0.09ab	7.7 ± 7.4a	0.56 ± 0.06bc	8.3 ± 7.8ab	93.5 ± 44.2bc
	18	3.5 ± 1.1a	0.24 ± 0.05a	12.2 ± 7.6a	0.54 ± 0.04c	11.9 ± 5.0a	103.2 ± 16.4ab
	25	2.7 ± 1.5ab	0.25 ± 0.08a	10.1 ± 7.4a	0.65 ± 0.05a	9.6 ± 4.2ab	119.7 ± 15.9a
	30	2.0 ± 1.2b	0.16 ± 0.05c	10.5 ± 5.3a	0.54 ± 0.03c	5.9 ± 2.8bc	72.0 ± 22.1c
	41	2.5 ± 1.4ab	0.25 ± 0.07 a	10.2 ± 6.9a	0.59 ± 0.08b	4.6 ± 1.8c	90.0 ± 24.9bc
	平均值Mean	2.8 ± 0.5	0.22 ± 0.03	9.9 ± 1.5	0.57 ± 0.04	7.7 ± 2.5	99.0 ± 16.1
	CV(%)	17	16	15	6	32	16

注: CV代表变异系数 Note: CV stands for coefficient of variation

由于不同树龄苹果林地对土壤养分吸收状况的差异及肥料的累积效应, 导致林地土壤养分丰缺程度不同(表3)。根据全国第二次土壤普查分级标准判断(表4)^[18], 米脂地区不同树龄苹果林地0~300 cm土层土壤有机质、全氮和碱解氮含量分别小于6 g kg⁻¹、0.5 g kg⁻¹、30 mg kg⁻¹, 均处于极缺状态。全磷介于5.4~6.5 g kg⁻¹, 除25 a含量中等外, 其余树龄林地均较缺。速效磷介于

4.56~11.86 mg kg⁻¹, 18 a林地含量最高, 达11.9 mg kg⁻¹, 含量中等, 其余树龄均较缺。速效钾介于72.0~119.7 mg kg⁻¹, 7 a、18 a、25 a含量中等, 10 a、30 a、41 a含量略低。总体而言, 该地区有机质、全氮、碱解氮含量处于极缺状态, 全磷、速效磷含量较缺, 速效钾含量中等。建议该地区不同树龄果园应加大有机肥和氮肥的投入, 适当增施磷肥, 可少施或不施钾肥。

表4 全国第二次土壤普查分级标准

Table 4 Criteria for soil grading used in the second national soil survey

分级标准	有机质	全氮	碱解氮	全磷	速效磷	速效钾
Criteria for soil grading	Organic matter	Total N	Alkaline N	Total P	Available P	Readily available K
	(g kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
丰富 Abundance	>40	>2.0	>150	>1	>40	>200
较丰富 Relatively abundance	30~40	1.5~2.0	120~150	0.8~1	20~40	150~200
中等 Moderate	20~30	1.0~1.5	90~120	0.6~0.8	10~20	100~150
较缺 Minor deficiency	10~20	0.75~1.0	60~90	0.4~0.6	5~10	50~100
缺 Deficiency	6~10	0.5~0.75	30~60	0.2~0.4	3~5	30~50
极缺 Extreme deficiency	<6	<0.5	<30	<0.2	<3	<30

2.3 苹果林地0~300 cm土层土壤养分剖面变化特征

由黄土丘陵沟壑区典型代表米脂县不同树龄山地苹果林0~300 cm土层土壤养分含量剖面分布图(图2)可知, 不同树龄林地土壤全氮、碱解氮含量剖面变化规律基本一致, 0~60 cm土层含量均高于60~300 cm土层, 表聚性明显。上层波动幅度大于下层, 不同树龄林地0~60 cm两类养分含量随土层深度增加迅速下降。土壤全氮含量在60~300 cm范围内, 随土层加深波动平稳, 剖面曲线近似垂直, 但18 a、25 a盛果期苹果林地在60~120 cm范围内土壤全氮含量随土层深度增加有缓慢回升的趋势, 之后随土层深度增加波动性下降。各树龄土壤碱解氮含量在60~300 cm土层范围内, 含量急剧下降, 均在较低值左右波动, 含量差异不明显。

不同树龄苹果林地0~300 cm土壤全磷含量波动平稳, 幅度较小, 不同土层含量差异不显著, 因此全磷表聚性不明显, 但不同树龄含量差异较大, 25 a含量最高, 30 a含量最低。各树龄苹果林地土壤速效磷0~60 cm含量较高, 且随深度增加迅速降低, 60~180 cm土层含量稳定, 180 cm以下土层, 随土壤深度增加, 各树龄苹果林地速效磷含量

均有缓慢回升趋势。

土壤速效钾在0~300 cm土层含量分布较稳定, 但表层较高, 表聚性明显, 0~60 cm土层土壤速效钾含量随土层深度增加迅速下降。各树龄苹果林地60~300 cm土层速效钾含量波动平稳, 剖面曲线近似垂直。不同树龄苹果林地0~60 cm土壤有机质含量略高于60 cm以下土层, 18 a、25 a、30 a含量相对较高。土壤有机质含量在0~300 cm不同土层波动幅度较大, 不同树龄波动规律相对一致。

综上所述, 除土壤全磷外, 土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾表层养分含量较高, 表聚性明显, 在0~60 cm土层范围随深度增加含量急剧下降, 这可能与当地施肥习惯主要在0~40 cm范围内有关。60~300 cm土层土壤全氮、碱解氮、速效钾含量较稳定, 土壤速效磷在180~300 cm土层有逐渐上升趋势, 土壤有机质在60~300 cm土层范围内左右波动, 波幅较大。

2.4 不同树龄苹果林地土壤水分与养分的相互关系

不同树龄苹果林地土壤水分与土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、速效钾含量的相关分析结果见表5。由于0~60 cm土层土壤养分含

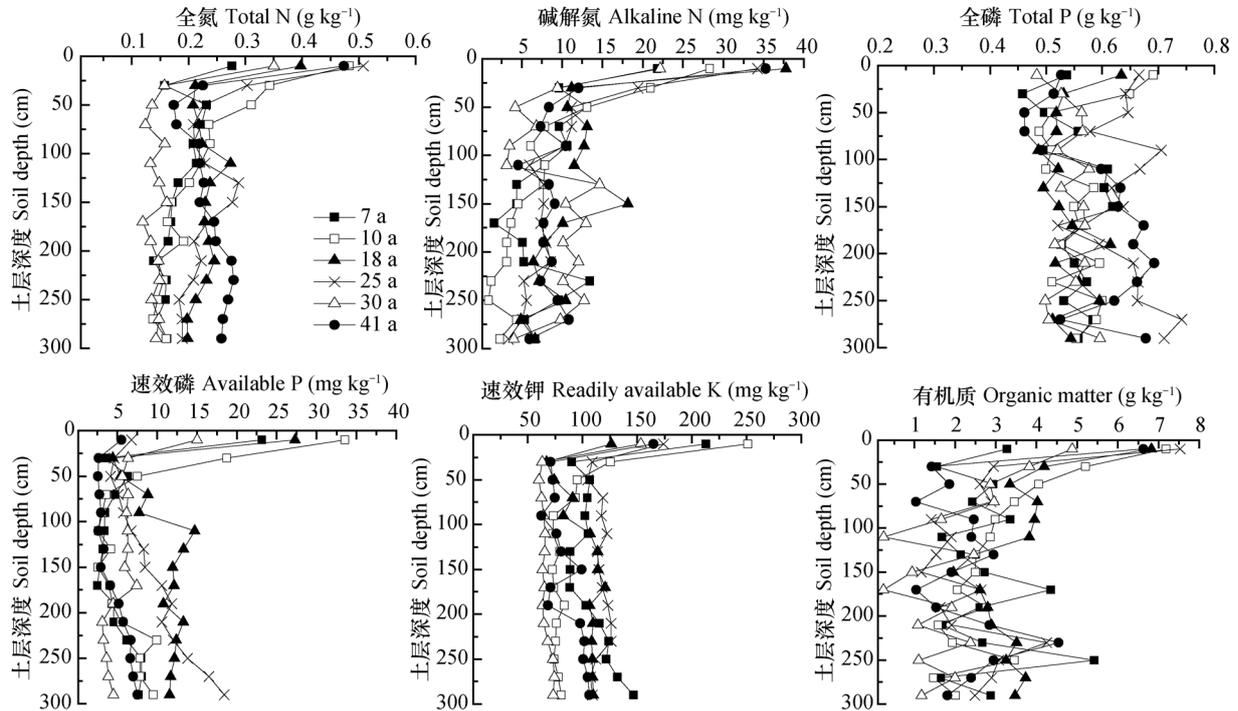


图2 不同树龄苹果林地0~300 cm土层土壤养分含量剖面分布特征

Fig. 2 Distribution of soil nutrient contents in the 0~300 cm soil profile in the apple orchards relative to age of the orchard

量受施肥影响较大且这一土层土壤湿度较高，故相关性分析只考虑60~300 cm土层。由表5可知，10 a果园土壤水分与全氮、碱解氮含量呈极显著正相关 ($p<0.01$)，与有机质、全磷含量呈显著正相关 ($p<0.05$)。7 a果园土壤水分除与全氮呈极显著正相关 ($p<0.01$) 外，与其余养分含量均无显著相关性。除18 a果园土壤水分与有机质含量呈显著正相关 ($p<0.05$)，与速效钾含量呈极

显著负相关 ($p<0.01$)，41 a果园土壤水分与全磷含量呈显著负相关 ($p<0.05$) 外，其余树龄果园土壤水分与各养分含量相关性均不显著。总体而言，不同树龄苹果林土壤水分与全磷、速效磷、速效钾三种养分相关性较差，幼龄期果树土壤水分与有机质、全氮、碱解氮相关性较好，而盛果期及衰退期果树土壤水分与各养分含量相关性均较差。

表5 不同树龄苹果林地60~300 cm土层土壤水分与养分的相关性

Table 5 Pearson coefficient between soil water content and soil nutrients in the 60~300 cm soil layer in the apple orchards relative to age of the orchard

树龄 Tree age(a)	有机质 Organic matter	全氮 Total N	碱解氮 Alkaline N	全磷 Total P	速效磷 Available P	速效钾 Readily available K
7	-0.082	0.878**	0.518	-0.228	-0.172	-0.108
10	0.621*	0.924**	0.756**	0.688*	-0.495	0.388
18	0.642*	0.275	0.371	-0.484	-0.435	-0.794**
25	-0.248	-0.191	0.421	-0.211	-0.275	-0.084
30	0.197	-0.137	-0.135	-0.083	0.459	-0.408
41	0.264	-0.520	0.027	-0.655*	-0.181	-0.177

注：**表示极显著相关 ($p<0.01$)，*表示显著相关 ($p<0.05$) Note: ** stands for significance at $p<0.01$, * stands for significance at $p<0.05$

3 讨论

3.1 不同树龄苹果林地土壤干化与养分变异特征

在以天然降水为土壤水分唯一补给源的黄土丘陵沟壑区,降水相对不足,潜在蒸发量巨大,加之植被生长强烈耗水,林地土壤水分长期处于负平衡。在连续干旱条件下,导致深层土壤干化形成土壤干层^[19]。山地苹果林因无灌溉条件,持久稳定的干层常于盛果期形成,干层形成后又进一步阻碍降雨的入渗,导致干化程度随果树树龄的增长而加剧,直到生长后期上层土壤水分才略有恢复^[5]。本研究也表明了这一现象,该地区不同树龄苹果林地0~1 000 cm土层土壤含水量随树龄增大呈先增加后降低再增加的趋势,幼龄期林地土壤含水量大于衰退期和盛果期,即10 a林地土壤湿度最大,25 a土壤湿度最小,30 a以后土壤含水量略有升高,主要是由于幼龄期植株树体小,对土壤水分的消耗量较小,对深层水分的利用量较少,水分供需矛盾不突出;而盛果期果树由于蒸腾损耗量较大及果树生长所需水分较多,林木耗水量增加而造成土壤水分含量减少;衰退期果树较盛果期果树土壤含水量略有上升,主要原因是果树衰败,其生产能力降低,对水分的需求量也相应减少,加之雨季上层土壤水分的补给,使总体土壤水分略有上升,这与王延平等^[20]和包睿等^[21]的研究结果一致。不同土层之间水分差异较大,因7月雨季降水的补充,不同树龄林地0~100 cm土层无干化或轻度干化,100~300 cm土层为土壤水分低湿层,不同树龄林地均出现强烈干化,幼龄期林地深层300 cm以下土层土壤含水量又逐渐升高,出现轻度或中度干化,随树龄增加耗水层逐渐下移,深层土壤储水不断消耗,盛果期和衰退期林地深层出现强烈干化。

不同树龄苹果林地土壤养分含量的演变趋势主要与果树的生长状况有关,在盛果期果树根系活动旺盛促进土壤养分矿化,果树进入衰老期后,由于根系活力的降低,其土壤养分矿化的能力也随之降低,导致土壤养分含量降低。当然还与施肥量关系密切,使养分状况存在一定程度的空间异质性。本研究中,除全磷外,其余各养分均有表聚现象,0~60 cm土层含量显著大于下层,且随深度增加迅速下降,上层0~100 cm养分变异程度大于下层100~300 cm,主要与苹果树90%的根系分布

在0~60 cm土层^[22]及当地施肥习惯有关,开沟条施,施肥深度一般为0~40 cm。还可能与土壤水分状况有关,水分与养分作为植物生命活动过程中必不可少的基本物质,水分-作物-养分三者之间存在内在制约关系,土壤水和碳、氮等养分之间的有机耦合可通过水分状况调节土壤微生物过程及其与养分间的生态交互作用而实现,所以从某种程度上而言作物的水分利用效率间接也反映了养分的利用效率,尤其是速效养分。在0~60 cm土层,土壤养分随水分发生迁移,上层土壤养分波动较大。100~300 cm土层为土壤水分低湿层,速效养分在这一范围很难发生迁移,这与60~300 cm土层土壤全氮、碱解氮、速效钾含量在较低范围内相对稳定的结果一致。而不同土层土壤全磷含量差异不显著,主要为在北方石灰性土壤中,磷素在土壤中易被固定,很难发生迁移,导致磷肥利用率偏低。因此相较于土壤养分供应容量(全氮、全磷),养分供应强度(碱解氮、速效磷、速效钾)更易受外界水热条件的影响表现出不同的空间异质性。

3.2 不同树龄苹果林地土壤水分与养分互动效应

Maestre等^[23]指出在以全球气候变暖为主要特征的全球气候变化大背景下,水分限制可能在很多干旱与半干旱系统中变得更为严重。以水分为第一性,继而可能引发水分利用效率以及有机质、氮、磷等养分利用效率等资源分配与竞争。本研究通过对不同树龄苹果林地土壤水分与各养分相关性分析表明,幼龄期果树土壤水分与有机质、全氮、碱解氮相关性较好,而盛果期及衰退期果树土壤水分与各养分含量相关性均较差,各养分并未表现出随水环境变化而显著变化的特征。究其原因与幼龄期林地土壤水分含量显著大于盛果期及衰退期林地有关,这时水分条件并未成为限制树体生长的主要制约因子,在一定水分含量范围内,随着土壤含水量上升,氮矿化速率和总量持续升高和增加,随着土壤含水量的减少则反之;而对于盛果期及衰退期林地来说,水分条件成为了主要的限制因素,通过增加肥料投入仅仅考虑养分供应容量而忽视养分供应强度这样的做法显然是不可取的,因此可通过幼龄期林地以肥调水,盛果期林地以水调肥,实现水分与养分的最优化利用。通过对该地区土壤养分丰缺状况调查,该地区土壤有机质、全氮、碱解氮含量均处于极缺状态,全磷、速效磷含量较缺,速效

钾含量中等。有研究表明, 有机肥施用对提高土壤肥力、提高农产品品质、改善土壤物理性状及土壤环境质量有显著影响, 并有蓄水保墒作用^[24-25], 因此建议该地区不同树龄果园应加大氮肥投入, 增施有机肥, 如重视生物肥、农家肥的使用。建议适当增施磷肥, 可少施或不施钾肥。

相较于由于干化引起的养分失衡, 该地区土壤干化问题更应引起关注, 即如何通过改善苹果园土壤管理措施, 从而维持和提高土壤蓄水保墒能力、提高水分及养分利用效率。建议该地区果园尤其盛果期果园采取蓄水保墒措施, 如发展秸秆、地膜覆盖、行间行草及建立配套生态果园深层技术等。同时本研究也存在一些不足, 如对土壤水分和养分交互作用对苹果产量的影响并没有涉及, 在现有水分条件下如何施肥最大化的利用水分即不同施肥处理下土壤水分动态变化也缺少长期的定位监测, 高肥条件下加重农田深层土壤干化程度也已有报道^[26], 借助于模型模拟方法代替长期定位监测不同施肥处理下土壤水分状况在春玉米地已有应用^[27], 故在今后的研究中应注重运用新的研究方法进一步揭示土壤干化引起养分失衡的机理, 以及不同施肥措施下深层土壤水分的长期动态变化规律, 为果园进一步生态建设、确定优质的水肥管理方案提供科学依据。

4 结 论

受气候和果树特性影响, 黄土丘陵沟壑区不同树龄山地苹果林深层土壤均发生严重或强烈干化, 300 cm以下土层幼龄期果园的土壤干化指数小于衰退期和盛果期果园, 盛果期果园土壤干化指数最高。0~1 000 cm土层平均土壤含水量随树龄增加呈先增加后降低再略有增加趋势, 10 a果园土壤湿度最高, 25 a最低, 进入衰败期后(30 a以上)土壤含水量略有恢复。该地区不同树龄苹果林0~300 cm土层土壤有机质、全氮、碱解氮含量均处于极缺状态, 全磷、速效磷含量较缺, 速效钾含量中等。总体表现为上层相对丰富、下层缺乏, 幼龄期含量稍高, 盛果期缺乏, 因此该地区不同树龄果园尤其盛果期果园为维持高产更应增加氮肥和有机肥投入, 可适当增施磷肥, 少施或不施钾肥。通过对土壤水分与养分的相关性分析表明, 幼龄期果树土

壤水分与有机质、全氮、碱解氮相关性显著, 而盛果期及衰退期果树土壤水分与各养分含量相关性不显著, 主要原因可能与幼龄期林地水分状况相对较好, 盛果期及衰退期林地水分环境恶化, 深层土壤出现严重或强烈干化有关。因此相较于由于干化引起的养分失衡, 该地区土壤干化问题更应引起关注, 建议该地区果园采取相应蓄水保墒措施。总之通过合理施用肥料, 加大有机肥投入, 增加土壤有机质及速效养分含量, 提高土壤蓄水保墒能力, 有助于改善黄土丘陵沟壑区山地苹果园生态效应。

参 考 文 献

- [1] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31 (1) : 14—22
Shao M A, Jia X X, Wang Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau (In Chinese) . Advances in Earth Science, 2016, 31 (1) : 14—22
- [2] 张丽娜, 李军, 范鹏, 等. 黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征. 生态学报, 2013, 33 (6) : 1907—1915
Zhang L N, Li J, Fan P, et al. Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau (In Chinese) . Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (6) : 1907—1915
- [3] Singh S R, Sharma A K, Sharma M K, et al. Influence of NPK combinations at different altitudes and aspects on fruit yield, quality and leaf nutrient status of apple cv. Red Delicious. Indian Journal of Horticulture, 2009, 66 (2) : 175—182
- [4] 李明霞, 杜社妮, 白岗栓, 等. 渭北黄土高原苹果生产中的问题及解决方案. 水土保持研究, 2010, 17 (4) : 252—257
Li M X, Du S N, Bai G S, et al. Problems and solutions of apple production in Weibei Loess Plateau (In Chinese) . Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17 (4) : 252—257
- [5] 曹裕, 居玛汗·卡斯木, 范鹏, 等. 陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征. 应用生态学报, 2013, 24 (2) : 388—396
Cao Y, Jumahan K S M, Fan P, et al. Moisture and nutrient characteristics of deep layer soil in apple orchards on the Luochuan highland of Shaanxi, Northwest China (In Chinese) . Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (2) : 388—396
- [6] 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. 西北农业学报, 2008, 17 (4): 229—233
- Ran W, Xie Y S, Hao M D. Study on change of soil water in orchards of different planting—lifein gully region of Loess Plateau (In Chinese). *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2008, 17 (4): 229—233
- [7] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. 水科学进展, 2012, 23 (3): 310—316
- Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2012, 23 (3): 310—316
- [8] 王石言, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区盛果期苹果园的蒸散特征. 林业科学, 2016, 52 (1): 128—135
- Wang S Y, Wang L, Han X, et al. Evapotranspiration characteristics of apple orchard at peak period of fruiting in Loess Tableland (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52 (1): 128—135
- [9] 高义民, 同延安, 路永莉, 等. 长期施用氮磷钾肥对黄土高原地区苹果产量及土壤养分累积与分布的影响. 果树学报, 2012, 29 (3): 322—327
- Gao Y M, Tong Y A, Lu Y L, et al. Effect of long—term application of nitrogen, phosphorus and potassium on apple yield and soil nutrient accumulation and distribution in orchard soil of Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Fruit Science*, 2012, 29 (3): 322—327
- [10] 刘子龙, 张广军, 赵政阳, 等. 陕西苹果主产区丰产果园土壤养分状况的调查. 西北林学院学报, 2006, 21 (2): 50—53
- Liu Z L, Zhang G J, Zhao Z Y, et al. Survey on the state of soil nutrient of apple orchards in the major production area of Shaanxi (In Chinese). *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21 (2): 50—53
- [11] 于洋, 赵业婷, 常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征. 土壤学报, 2015, 52 (6): 1251—1261
- Yu Y, Zhao Y T, Chang Q R. Spatial—temporal variability of soil readily alkaline nutrients in cultivated land of Weibei Tableland area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1251—1261
- [12] 石宗琳, 王益权, 冉艳玲, 等. 渭北苹果园土壤有机碳库变异特征. 土壤学报, 2013, 50 (1): 203—207
- Shi Z L, Wang Y Q, Ran Y L, et al. Variation of soil organic carbon pool in apple orchards in Weibei (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (1): 203—207
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000
- Bao S D. *Soil agro—chemical analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [14] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原地区EPIC模型数据库组建. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (8): 21—26
- Li J, Shao M A, Zhang X C. Database construction for the EPIC model on the Loess Plateau Region (In Chinese). *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2004, 32 (8): 21—26
- [15] 曹裕, 李军, 张社红, 等. 黄土高原苹果园深层土壤干化特征. 农业工程学报, 2012, 28 (15): 72—79
- Cao Y, Li J, Zhang S H, et al. Characteristics of deep soil desiccation of apple orchards in different weather and land form zones on the Loess Plateau in China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (15): 72—79
- [16] Liu W Z, Zhang X C, Dang T H, et al. Soil water dynamics and deep soil recharge in a record wet year in the southern Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 2010, 97 (8): 1133—1138
- [17] 张义, 谢永生, 郝明德. 黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水分特征分析. 土壤, 2011, 43 (2): 293—298
- Zhang Y, Xie Y S, Hao M D. Study on characteristics of apple orchard soil moisture in gully region of Loess Plateau (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (2): 293—298
- [18] 全国土壤普查办公室. 第二次全国土壤普查暂行技术规程. 北京: 中国农业出版社, 1979
- National Soil Survey Office. *The second national soil survey tentative specifications* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1979
- [19] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large—scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 159 (1/2): 99—108
- [20] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 陕西黄土高原苹果园土壤水分分异特征. 林业科学, 2013, 49 (7): 16—25
- Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, et al. Spatial characteristics of soil moisture of apple orchards in the Loess Plateau of Shaanxi Province (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49 (7): 16—25
- [21] 包睿, 邹养军, 马锋旺, 等. 种植年限及密度对渭北旱塬苹果园深层土壤干化的影响. 农业工程学报, 2016, 32 (15): 143—149

- Bao R, Zhou Y J, Ma F W, et al. Effects of planting year and density on deep soil desiccation of apple orchards in Weibei dryland (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (15): 143—149
- [22] 王延平, 韩明玉, 张林森, 等. 洛川苹果园土壤水分变化特征. *应用生态学报*, 2012, 23 (3): 731—738
Wang Y P, Han M Y, Zhang L S, et al. Variation characteristics of soil moisture in apple orchards of Luochuan County, Shaanxi Province of Northwest China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (3): 731—738
- [23] Maestre F T, Vallasares F, Reynolds J F. Is the change of plant—plant interactions with abiotic stress predictable? A meta—analysis of field results in arid environments. *Journal of Ecology*, 2005, 93 (4): 748—757
- [24] Huang S, Rui W Y, Peng X X, et al. Organic carbon fractions affected by long—term fertilization in a subtropical paddy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 86 (1): 153—160
- [25] Zhang H, Xu M, Zhang F. Long—term effects of manure application on grain yield under different cropping systems and ecological conditions in China. *The Journal of Agricultural Science*, 2009, 147 (1): 31—42
- [26] 薛晓辉, 郝明德. 黄土旱塬区农田施肥、产量与土壤深层干化的关系研究. *干旱地区农业研究*, 2010, 28 (6): 75—80
Xue X H, Hao M D. Study on the relationship between fertilization, yield and soil desiccation in the Loess Plateau region (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28 (6): 75—80
- [27] 王学春, 李军, 蒋斌, 等. 黄土高原不同降水类型区旱作玉米田土壤干化效应与土壤水分承载力模拟研究. *生态学报*, 2009, 29 (4): 2053—2066
Wang X C, Li J, Jiang B, et al. Simulation of yield and soil desiccation effects of continuous spring maize in different precipitation areas of the Loess Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (4): 2053—2066

Desiccation and Nutrient Status of the Soil in Apple Orchards in Hilly-Gully Region of the Loess Plateau

LI Qinghua^{1, 2} ZHANG Jing^{1, 2} WANG Li^{1, 2†} WANG Yanping^{1, 2}

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract 【Objective】 Mizhi County is a hill-gully region, typical of the Loess Plateau, where drought and shortage in water supply is a major factor restraining sustainable and healthy development of apple orchards. At the same time, soil fertility or nutrient status is another affecting tree growth and fruit yield and quality. Therefore, it is essential to study variations of water regime and nutrient status in the soil profiles of apple orchards different in cultivation history, and hence to explore mechanism of soil desiccation leading to nutrient imbalance, in an attempt to provide certain theoretic basis for scientific management of soil water and nutrients, soil building and rational fertilization in apple orchards in hill-gully regions of the Loess Plateau. 【Method】 Distribution of soil water content in soil profiles, 1 000 cm in depth and nutrient contents, including soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkaline nitrogen, available phosphorus and readily available potassium, in the 0 ~ 300 cm soil layer of the profiles in the apple orchards, 7, 10, 18, 25, 30 and 41 years old, were determined; soil desiccation degrees and soil nutrient status along the soil profiles were evaluated for analysis of their relationships with cultivation history of the orchards and depth of the soil layer, and relationship between soil water content and soil nutrient contents in the 60 ~ 300 cm soil layers of the apple orchards relative to cultivation history.

【 Result 】 Results show that the soils of the orchards, regardless of cultivation history, all suffered severe or intense desiccation. Mean soil water content of the 0 ~ 1 000 cm soil layer increased first, then decreased and then slightly turned upwards again with age of the orchards. The content of organic matter, total nitrogen and alkaline nitrogen in the 0 ~ 300 cm soil layers of the orchards, regardless of age, was less than 6 g kg^{-1} 、 0.5 g kg^{-1} and 30 mg kg^{-1} , respectively, all falling down to the level of extreme deficiency, whilst the contents of total phosphorous and available phosphorous varied in the range of $5.4 \sim 6.5 \text{ g kg}^{-1}$ and $4.56 \sim 11.86 \text{ mg kg}^{-1}$, respectively, both being on the level of moderate or minor deficiency; and the content of available potassium was $71.98 \sim 119.68 \text{ mg kg}^{-1}$ or moderate in nutrient availability level. In the orchards of young apple trees, soil water content was closely related to soil organic matter, total nitrogen and alkaline nitrogen contents, whereas in the orchards of apple trees in the full bearing period and in the decline phase, it was not, which indicates that in the former the soil water regime was well preserved and in the latter the soil water environment deteriorated, with severe or intense soil desiccation occurring in deep soil layers.

【 Conclusion 】 It is, therefore, suggested that besides positive water conservation measures proper to orchards different in age, improvement be made in fertilization, by paying more attention to application of organic manure and nitrogen fertilizer, increasing the application rate of phosphorous fertilizer properly and reducing or even stopping application of potassium fertilizer. Compared with the issue of nutrient imbalance caused by soil drought, the one of soil desiccation should have aroused more concern in the region.

Key words The hilly apple orchards; Soil desiccation; Desiccation index; Soil nutrient; Nutrient shortage

(责任编辑: 檀满枝)