

网络出版时间:2020-01-20 13:39 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.08.013
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200119.0923.006.html

宁南山区不同林龄杏树地土壤干层特征研究

包维斌^{1,2},王幼奇^{1,2},刘鹏^{1,2},夏子书^{1,2},白一茹^{1,2}

(1 宁夏大学 资源环境学院,宁夏 银川 750021;2 旱区特色资源与环境治理教育部国际合作联合实验室,宁夏 银川 750021)

【摘要】【目的】分析宁南山区不同林龄杏树地土壤的干层特征,明确林龄对该地区杏树地土壤干层、干燥化程度的影响。【方法】以自然条件下农田为对照,分析比较宁南山区彭阳县王洼流域 3,17,23,35 年林龄杏树地土壤 0~600 cm 土层含水率、干层起始深度、干层厚度;采用土壤水分相对亏缺指数及干燥化指数对土壤干层程度进行定量评价,同时对土壤干层影响因素进行冗余分析。【结果】3,17,23,35 年林龄杏树地土壤平均含水率分别为 15.58%,12.79%,11.54%,11.24%,林龄越长的杏树地土壤含水率越低,3 年林龄杏树地与其他林龄杏树地土壤含水率之间存在显著差异($P < 0.05$)。除 3 年林龄杏树地外,其他林龄杏树地土壤干层起始深度随林龄的增加而向表层发展,干层厚度随林龄的增加而增加;3,17,23,35 年林龄杏树地剖面土壤水分相对亏缺指数均值分别为 -0.16,0.29,0.45,0.53,林龄越长土壤水分亏缺越严重,除 0~100 cm 土层外,其余各层土壤水分亏缺均值均随林龄的增加而呈增大趋势。3,17,23,35 年林龄杏树地的平均土壤干燥化指数分别为 184.36%,99.87%,74.60%,59.15%,即林龄越长其干燥化程度越强。冗余分析表明,坡度及杏树林龄、胸径、冠幅、株高等是导致研究区土壤干燥化的主要原因。【结论】林龄越长的杏树地土壤干燥化程度也越强,建议对杏树林采取科学合理的修剪措施,并通过调整种植密度、结构等缓解土壤干层现象的发生。

【关键词】 宁南山区;杏树地;土壤干层特征;土壤干燥程度;林龄;冗余分析

【中图分类号】 Q948.112.3;S152.7⁺1 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2020)08-0101-10

Evolution of dry layer of apricot land at different ages in southern Ningxia mountain areas

BAO Weibin^{1,2}, WANG Youqi^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, XIA Zishu^{1,2}, BAI Yiru^{1,2}

(1 College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2 Arid Area Characteristic Resources and Environmental Governance Department of Education International Cooperation Joint Laboratory, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: 【Objective】The characteristics of dry layer of apricot soil at different forest ages in southern Ningxia mountain area were analyzed, and the effects of forest age on dry layer and drying degree were clarified. 【Method】In this study, soil water content, starting depth and thickness of dry layer of 0—600 cm soil in the forests at ages of 3, 17, 23 and 35 years in the Wangwa basin of Pengyang County were analyzed and compared using farmlands under natural conditions as control. The drying degree was evaluated based on soil moisture deficit index and desiccation index, and redundancy analysis was conducted to identify influencing factors. 【Result】Longer apricot planting years had lower soil moisture content. The average soil moisture contents of apricot lands at the ages of 3, 17, 23 and 35 years were 15.58%, 12.79%, 11.54% and 11.24%, respectively. There was significant difference between 3-year apricot land and other ages ($P < 0.05$). Except for 3 years old apricot land, the initial depth of soil dry layer developed to the surface layer with the

【收稿日期】 2019-06-27

【基金项目】 国家自然科学基金项目(41867003,41761049);宁夏自然科学基金项目(2018AAC03027);宁夏回族自治区科技重大专项(2018BEG02010);宁夏环境保护科学技术研究项目(2018-007)

【作者简介】 包维斌(1991—),男,甘肃秦安人,硕士,主要从事自然资源开发与持续利用研究。E-mail:baoweibin12@163.com

【通信作者】 白一茹(1984—),女,陕西渭南人,副教授,博士,主要从事旱区水土资源调控研究。E-mail:yr0823@163.com

increase of forest age, and the thickness of dry layer increased with the increase of forest age. The average relative deficit indexes of soil moisture of apricot lands at ages of 3, 17, 23 and 35 years were $-0.16, 0.29, 0.45$ and 0.53 , respectively. Longer the planting years also showed more serious soil water deficit. Except for the 0—100 cm soil layer, the average soil water deficit in other layers increased with the increase of forest age. The average drying indexes of apricot lands at ages of 3, 17, 23 and 35 years were $184.36\%, 99.87\%, 74.60\%$ and 59.15% , respectively. In other words, the drying index increased as the increase of planting age. Redundancy analysis showed that slope, apricot tree age, diameter at breast height of apricot, crown width and plant height were the main reason for soil drying in the study area. 【Conclusion】 The extension of planting years increased soil desiccation intensity of apricot soil. Scientific and reasonable pruning measures and adjusting planting density and structure are suggested for alleviating the occurrence of dry soil layer.

Key words: southern Ningxia mountain area; apricot field; characteristics of soil dry layer; degree of soil dryness; planting years; redundancy analysis

土壤水分是黄土高原干旱半干旱区植被恢复、农业生产、生态系统稳定的重要基础^[1]。在规模化人工林建设过程中,土壤水分不足和利用率低是普遍存在的问题。同时随林龄的增加人工林需水量增大,有限的土壤水分不能满足植被生长需求,出现了植被退化、枯萎及土壤干层等生态问题^[2-4]。而土壤干层的出现进一步加剧了土壤水分环境恶化,阻碍土壤-植被-大气传输体(soil-vegetation-atmosphere-transfer system, SVATs)之间的相互转化^[5-7],威胁区域生态环境恢复及人工林草植被的可持续性^[8]。因此了解不同林龄下土壤干层变化规律及干燥化程度的分布情况,可为高效利用土壤水分、改善和恢复生态环境建设提供数据支撑。

近年来,众多学者针对黄土高原土壤干层问题进行了大量研究^[1,8]。郭正等^[9]研究表明,陕西洛川不同林龄苹果林地 0~1 500 cm 土层土壤有效含水量呈逐年降低趋势,土壤干层主要发生在 13 年林龄林地;马婧怡等^[10]研究发现,在黄土丘陵区砖窑沟流域,相同林龄的人工刺槐林比红海林更容易消耗深层土壤水分,引起土壤干层现象;王石言等^[11]研究表明,在陕西长武塬区,9 年林龄果园 0~300 cm 土层土壤含水量随土层深度增加呈下降趋势,19 年林龄果园的土壤含水量变化强烈且出现了极度干燥化现象;在渭北旱塬,5, 10, 15 和 20 年林龄苹果园的土壤干燥化指数分别为 $6.46\%, 32.68\%, 37.65\%$ 和 63.33% , 苹果园林龄越久土壤干燥化指数越大,干燥化程度越强^[12];在陕西吴旗、安塞、绥德和米脂等地研究发现,种植多年的人工刺槐林地土壤含水量亏缺严重,出现了明显的土壤干层现象^[13];在黄土高原水蚀风蚀交错带,15 年林龄枣树林地在 0~400 cm 土层出现了土壤干层现象,且土

壤平均含水量仅为 6.18% ^[14]。上述研究表明,在黄土高原地区,不同林龄苹果林地、刺槐林地、枣树林地等存在不同程度土壤水分亏缺和土壤干层现象,研究者主要针对不同林龄人工林地土壤干层形成的原因、危害、量化指标及分布特征进行了探究,并取得了一些重要成果,但相关研究成果主要集中在陕西和山西中北部的人工林地,而对同属黄土高原的宁南山区人工林地土壤水分亏缺所产生的土壤干层问题研究甚少,特别是关于不同林龄杏树林地土壤干燥化特征和干层分布状况的研究尚未见报道。

宁夏南部的彭阳县是宁夏优质杏主产区,在“两杏一果”工程下杏树种植面积迅速扩大至 3.23 万 hm^2 ,以杏为主的特色经济林产业成为当地政府“精准扶贫”和当地农民脱贫致富的重要途径之一^[2]。但该区降水少、蒸发量大,陆续出现由于土壤水分亏缺导致的植被衰退、枯竭等现象^[5],实地调研也发现,该区部分林龄较长的杏树树体已呈现明显退化现象。为揭示不同林龄杏树地土壤垂直剖面水分特征规律,本研究通过采集彭阳县王洼流域 0~600 cm 深层土壤样品,分析不同林龄杏树地土壤含水率、土壤水分垂直剖面分布、干层起始深度、干层厚度、土壤水分相对亏缺指数、干燥化指数等特征,探讨杏树不同林龄与干燥化指数之间的关系,比较分析不同林龄杏树林下土壤的干燥化程度,以期为宁南山区植被恢复和生态环境建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁南山区彭阳县王洼镇(图 1),区内沟壑纵横,地形条件复杂,水土流失严重,生态环境脆弱。研究区属半湿润半干旱气候,年平均气温

约 7.9 °C,多年平均降水量 450 mm,其中夏季降水量约占全年降水量的 69%,多年平均水面蒸发量 1 050 mm,无霜期 140~170 d,干旱指数 2.3,日照

时数 2 311.2 h,海拔 1 248~2 418 m。优势种主要为杏树、杨树,土壤质地为黄绵土。

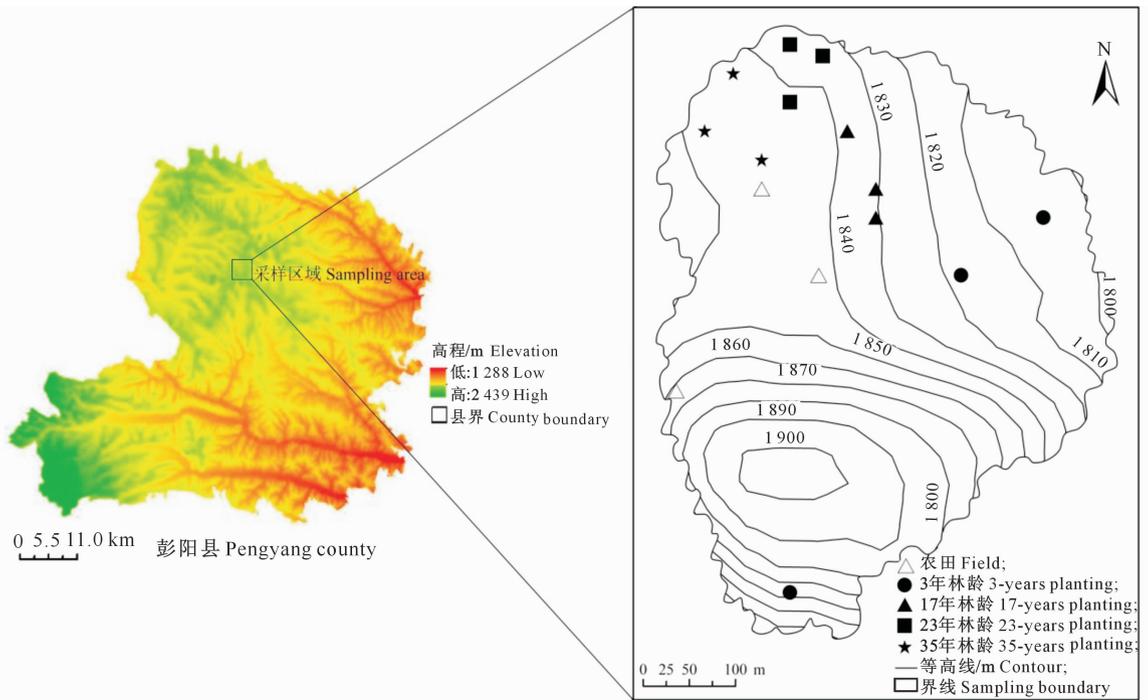


图 1 研究区域概况

Fig. 1 General situation of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品采集 在调查研究和实际考察的基础上,采用空间分布代替时间序列的方法,以宁南山区 3,17,23,35 年林龄杏树人工林地和对照农田(玉米地)为研究对象,设置 30 m×30 m 的标准采样地,利用土钻在样地对角线交点处进行 0~600 cm 土壤样品采集。每种林龄杏树地选 3 个样地,每个样地的样点按 0~100 cm 每 10 cm 采样一次,100~600 cm 每 20 cm 采样一次,即每个样点采集 35 个土样,共采集 525 个土样。同时在采样点附近利用环刀取 3 个原状土样,将采集的土壤样品装入铝盒带回实验室。

1.2.2 测定项目及方法 采用烘干法测定 0~600 cm 各土层土壤含水率;土壤砂粒、粉粒、黏粒体积分数采用 MS3000 激光粒度仪测定,参照美国制黏粒(0~0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(0.05~2 mm)分类标准计算砂粒、粉粒、黏粒体积分数;株高、胸径和冠幅采用米尺和卷尺及 600 cm 标杆测定;饱和含水率和饱和导水率由环刀法测定;田间持水率和凋萎含水率采用 Van Genuchten 模型拟合,其田间持水率均值为 19.36%,凋萎含水率均值为 7.12%,考虑到研究区土壤质地及相关研究^[8],本

文将土壤田间持水率的 60% 作为土壤稳定含水率,以此确定土壤含水率的分布情况。采样同时使用手持 GPS 仪记录采样点的经纬度、海拔、坡向。不同林龄杏树林地和对照地农田的基本情况见表 1。

1.2.3 土壤水分及干燥化指标 土壤含水率计算公式为:

$$S_{MC} = \frac{G_1 - G_2}{G_2 - G} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_{MC} 为土壤含水率(%); G_1 为铝盒与湿土质量(g); G_2 为铝盒与干土质量(g); G 为空铝盒质量(g)。

土壤水分相对亏缺指数计算公式为:

$$C_{SWDI_i} = \frac{C_{P_i} - S_{M_i}}{C_{P_i} - W_M} \quad (2)$$

式中: C_{SWDI_i} 为不同林龄杏树地第 i 土层土壤水分相对亏缺指数; i 为采样土层深度; C_{P_i} 为对照农田样地第 i 层土壤含水率(%); S_{M_i} 为不同林龄杏树地第 i 层土壤含水率(%); W_M 为土壤萎蔫含水率%。当 C_{SWDI_i} 值大于 0 时,土壤水分出现亏缺且值越大亏缺越严重;相反当其值小于 0 时,土壤水分良好,未出现土壤水分亏缺情况^[15]。

土壤干燥化指数计算公式为:

$$S_{DI} = \frac{S_{MC} - W_M}{S_{SM} - W_M} \quad (3)$$

式中: S_{DI} 为土壤干燥化指数, S_{MC} 为土壤含水率(%), W_M 为土壤萎蔫含水率(%), S_{SM} 为土壤稳定含水率(%). 依据 S_{DI} 值大小, 将土壤干燥化程度划分为无干燥化 ($100\% \leq S_{DI}$)、轻度干燥化 ($75\% \leq S_{DI} < 100\%$)、中度干燥化 ($50\% \leq S_{DI} < 75\%$)、严重干燥化 ($25\% \leq S_{DI} < 50\%$)、强烈干燥化 ($0\% \leq S_{DI} < 25\%$) 及极度干燥化 ($S_{DI} < 0\%$)^[16].

干层起始深度是垂直剖面上土壤含水率开始小

于土壤稳定含水率的土层深度(cm); 干层厚度是垂直剖面上所有土壤含水率小于土壤稳定含水率的土层范围的总和(cm); 干层内含水率是干层厚度确定后, 位于该层内的平均含水率; 0~60 cm 土层属于土壤水活跃层, 其受外界大气降水、土壤水分蒸发、灌溉、地形等自然和人为因素的影响较大, 土壤含水率变化规律不明显, 在进行土壤干层研究时仅考虑不受外界影响的 60~600 cm 土层^[7].

表 1 不同林龄杏树林地和对照地农田的基本情况

Table 1 Basic information of apricot forest lands and controlled farmland at different ages

林龄/年 Planting age	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	株高/m Plant height	胸径/cm DBH	冠幅/m Crown width	黏粒体积 分数/% Clay volume fraction	粉粒体积 分数/% Silt volume fraction	砂粒体积 分数/% Sand volume fraction
3	106°38'48" E	36°06'29" N	1 804	12	2.4	12	1.2	7.96	74.85	17.19
	106°38'45" E	36°06'27" N	1 818	14	2.2	11	1.2	8.79	76.47	14.74
	106°38'39" E	36°06'16" N	1 863	16	2.4	13	1.1	8.45	76.05	15.50
17	106°38'42" E	36°06'32" N	1 835	28	3.7	40	1.5	9.69	76.45	13.86
	106°38'43" E	36°06'30" N	1 828	36	3.5	42	1.8	10.68	75.50	13.82
	106°38'43" E	36°06'29" N	1 828	34	4.0	44	1.2	6.39	70.29	23.32
23	106°3839" E	36°06'33" N	1 841	25	4.1	43	3.2	9.76	76.40	13.84
	106°38'39" E	36°06'35" N	1 833	27	3.4	33	4.0	8.54	76.15	15.31
	106°38'41" E	36°06'34" N	1 838	26	5.1	42	3.3	6.70	70.80	22.50
35	106°38'38" E	36°06'34" N	1 845	39	3.0	75	1.5	8.47	73.00	18.53
	106°38'37" E	36°06'32" N	1 844	28	5.0	45	1.3	5.57	68.87	25.56
	106°38'37" E	36°06'31" N	1 844	16	4.8	53	1.5	8.85	73.15	18.00
CK(农田 Field)	106°38'36" E	36°06'23" N	1 867	11	2.3	2.3	—	8.92	76.10	14.98
	106°38'41" E	36°06'27" N	1 843	11	2.3	2.2	—	10.78	74.26	14.96
	106°38'39" E	36°06'30" N	1 842	16	3.3	2.5	—	9.35	75.32	15.33

注: —, 表示农田玉米植被无冠幅。

Note: —, Means that the corn cover in the field is not covered.

1.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 进行描述性统计, 田间持水率、凋萎含水率及稳定含水率采用 Van Genuchten 模型拟合, 采用 Excel 2010 绘制土壤含水率垂直分布特征图, ArcGIS 10.2 绘制并输出研究区域的概况图; 利用 Canoco 4.5 软件对土壤干燥化指标变量与环

境因子变量之间的相关性进行冗余分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄杏树地土壤水分分析

不同林龄杏树地及农田 0~600 cm 土壤含水率及相关参数的统计分析见表 2。

表 2 不同林龄杏树地及农田 0~600 cm 土壤含水率及相关参数的统计分析

Table 2 Statistical analysis of soil moisture and related parameters of 0—600 cm at different planting ages

林龄/年 Planting age	0~600 cm 含水率/% Moisture content of 0—600 cm			饱和导水率/ (mm·min ⁻¹) Saturated hydraulic conductivity	饱和含水率/% Saturated water content	田间持水率/% Field capacity
	极大值 Max	极小值 Min	均值 Average			
3	19.22	13.52	15.58 aA	17.02	44.05	20.49
17	20.81	7.87	12.79 bBC	11.11	50.26	19.43
23	21.17	6.61	11.54 bC	12.66	57.46	18.13
35	20.96	5.58	11.24 bC	6.17	43.55	18.61
CK(农田 Field)	17.94	11.61	14.66 aAB	22.26	42.13	20.12

注: 同列数据后标不同小写字母表示不同林龄间在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 不同大写字母表示不同林龄间在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among forest ages at $P < 0.05$ level, and different uppercase letters indicate very significant difference among forest ages at $P < 0.01$ level.

由表 2 可知, 3, 17, 23, 35 年林龄杏树地 0~600 cm 土壤含水率分别为 13.52%~19.22%, 7.87%~20.81%, 6.61%~21.17% 和 5.58%~

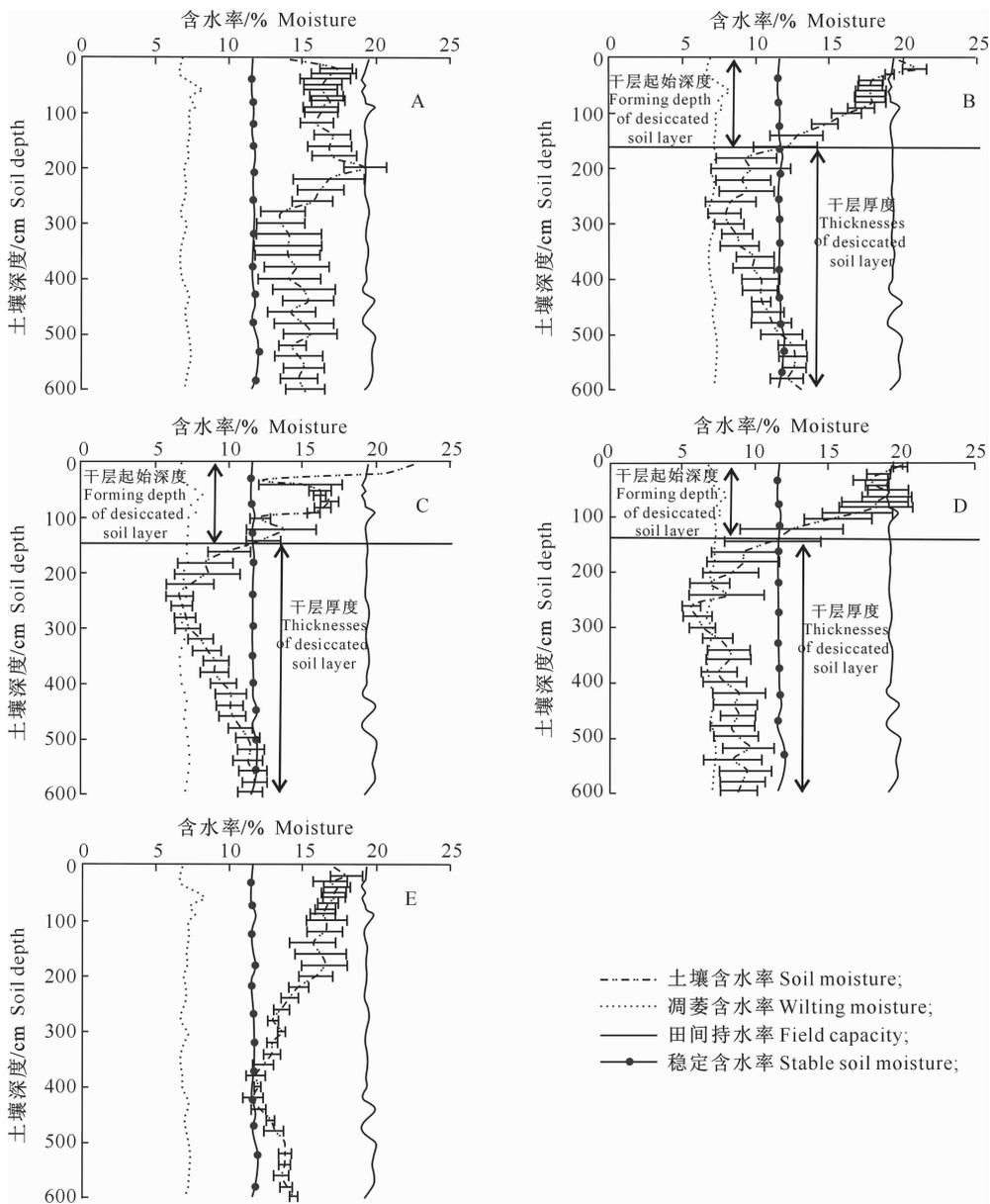
20.96%; 平均土壤含水率分别为 15.58%, 12.79%, 11.54% 和 11.24%, 即杏树林龄越长土壤平均含水率越小。与对照地农田相比, 17, 23, 35 年林龄杏树

林地平均土壤含水率分别减小了 12.76%, 21.28%, 23.33%, 3 年林龄杏树地土壤平均含水率增加了 5.91%, 说明林龄是影响杏树林地土壤含水率变化的主要因素。对不同林龄杏树地及对照农田土壤含水率进行方差分析, 结果表明: 3 年林龄杏树地土壤含水率与 17, 23, 35 年林龄杏树地土壤含水率存在极显著差异 ($P < 0.01$), 对照地农田与 3 年林龄杏树地的土壤含水率差异不显著, 但与 17 年林龄杏树地土壤含水率差异显著 ($P < 0.05$), 与 23, 35 年林龄杏树地的土壤含水率均存在极显著差异 ($P < 0.01$)。除 35 年林龄杏树地以外, 3, 17, 23 年林龄杏树地土壤田间持水率随着杏树林龄的增加呈

减小趋势, 而饱和导水率、饱和含水率随着杏树林龄的增加并无明显的规律性。

2.2 不同林龄杏树地及农田土壤水分的垂直分布特征

从图 2 可以看出, 3, 17, 23, 35 年林龄杏树地及农田 0~600 cm 土层垂直方向上土壤含水率的变化规律总体表现为: 0~60 cm 土层土壤含水率变化规律不明显; 在 60~300 cm 土层, 除 3 年林龄杏树地外, 其他林龄杏树地及农田土壤含水率均随土层深度增加而减小; 300~600 cm 土层土壤含水率均随土层深度增加而增加。



A.3年林龄;B.17年林龄;C.23年林龄;D.35年林龄;E.CK(农田)
A.3-Years planting;B.17-Years planting; C.23-Years planting;D.35-Years planting; E.Field

图 2 不同林龄杏树地及农田土壤水分的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of soil moisture in apricot tree land and controlled farmland at different ages

0~60 cm 土层易受降水、蒸发和灌溉等外界因素影响,属土壤水分活跃层,因此土壤含水率变化规律不明显^[7],故在进行土壤干层研究时仅考虑不受外界影响的 60~600 cm 土层^[16]。由图 2 还可知,农田和 3 年林龄杏树地 60~600 cm 土层土壤含水率均大于土壤稳定含水率,未发生土壤干层现象。17,23,35 年林龄杏树地在 60~600 cm 土层土壤含水率小于土壤稳定含水率,存在土壤干层现象。17,23,35 年林龄杏树地的土壤干层起始深度分别为 160,140,120 cm,干层厚度分别为 340,460,480 cm,其中 23 和 35 年林龄杏树地存在土壤含水率小于土壤凋萎含水率的土层,发生了不可恢复的土壤干层现象。17 年林龄杏树地 500~600 cm 土层土壤含水率大于土壤稳定含水率,可能与 17 年林龄杏树根系还未延伸到该土层有关^[6]。综上可知,杏树地土壤干层起始深度有随林龄的增加而向表层发展的趋势,而土壤干层厚度则呈现出随林龄增加而增加的趋势。

2.3 不同林龄杏树地土壤剖面水分相对亏缺评价

对 3,17,23,35 年林龄杏树地土壤垂直剖面水分相对亏缺指数进行计算,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,所有处理 0~60 cm 土层的土壤水分相对亏缺指数变化规律性不明显;3 年林龄杏树地 60~120 cm 土壤水分相对亏缺指数 >0 ,表现出土壤水分亏缺,120~600 cm 土壤水分相对亏缺指数 <0 ,表明该层不存在土壤水分亏缺;17,23,35 年林龄杏树地水分相对亏缺指数在土壤垂直剖面上的分

布规律基本一致,一般在 60~300 cm 土层,随土层深度增加土壤水分相对亏缺指数呈逐渐增大趋势;而在 300~600 cm 土层,则随土层深度增加土壤水分相对亏缺指数呈逐渐减小趋势。总体来看,除 3 年林龄杏树地外,其他林龄杏树地剖面土壤水分亏缺指数均表现为随林龄增加而增加,随土层深度增加呈先增加后减小的趋势。

为准确比较不同林龄杏树地间土壤水分亏缺情况的差异,按照 0~100、100~200、200~300、300~400、400~500、500~600 cm 土层深度分别计算 3,17,23,35 年林龄杏树地土壤水分相对亏缺指数均值,计算结果如表 3 所示。

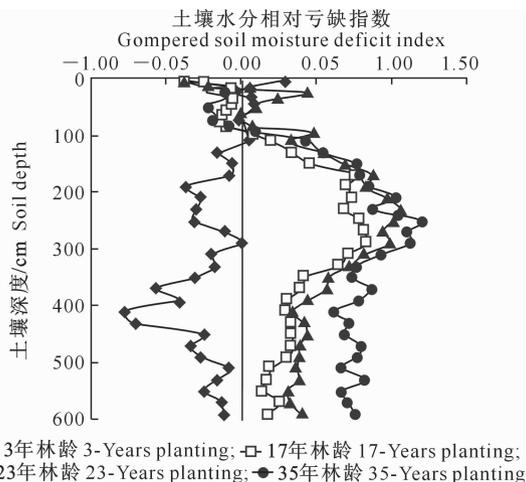


图 3 不同林龄杏树地土壤剖面水分相对亏缺指数的变化

Fig. 3 Changes of soil moisture deficit index in soil profile of apricot tree at different ages

表 3 不同林龄及不同土层杏树地土壤水分相对亏缺指数平均值的变化

Table 3 Change of mean soil moisture deficit index of apricot trees at different ages

林龄/年 Planting age	土层深度/cm Soil depth						
	0~600	0~100	100~200	200~300	300~400	400~500	500~600
3	-0.16	0.06	-0.12	-0.19	-0.33	-0.46	-0.14
17	0.29	-0.12	0.49	0.77	0.49	0.32	0.19
23	0.45	0.08	0.64	0.99	0.62	0.38	0.35
35	0.53	-0.14	0.67	1.06	0.81	0.71	0.70

由表 3 可知,3,17,23,35 年林龄杏树地 0~600 cm 土层的平均土壤水分相对亏缺指数分别为 -0.16,0.29,0.45,0.53,其土壤水分亏缺程度由高到低依次为 35 年 $>$ 23 年 $>$ 17 年 $>$ 3 年。由表 3 还可以看出,100~600 cm 土层土壤水分相对亏缺指数均值呈现出随林龄增大而增大的趋势,即杏树林龄越大土壤垂直剖面水分亏缺越严重。3 年林龄杏树地的土壤水分相对亏缺指数除 0~100 cm 土层 >0 外,其他各层均 <0 ,即在 0~100 cm 土层出现了轻度土壤水分亏缺,其余各层土壤水分状况良好。

17 年林龄杏树地的土壤水分相对亏缺指数在 0~300 cm 土层随土层深度增加呈增大趋势。土壤水分相对亏缺指数的最大值出现在 300 cm 附近;在 300~600 cm 土层又随土层深度增加呈减小趋势。23 和 35 年林龄杏树地各层土壤水分相对亏缺指数的变化与 17 年林龄杏树地土壤相同,土壤水分相对亏缺指数的最大值也出现在 300 cm 土层附近。

2.4 不同林龄杏树地土壤干燥化评价

由表 4 可以看出,3,17,23,35 年林龄杏树地及对照农田土壤的平均土壤干燥化指数分别为

184.36%,99.87%,74.60%,59.15%和 156.02%。3 年林龄杏树地和对照地农田未发生干燥化现象,0~600 cm 土层土壤水分能满足植物的生长需求。17 年林龄杏树地属于轻度干燥化强度,其极度、强烈、严重、中度、轻度干燥层厚度分别达到 0,20,40,220,40 cm,干层(180~500 cm)内土壤平均含水率为 9.61%,是 0~600 cm 土壤平均含水率的 17.29%。23 年林龄杏树地属于中度干燥化强度,以轻度、中度及严重干燥层为主,其极度、强烈、严重、中度、轻度干燥层厚度分别达到 20,60,100,100,

160 cm,干层(160~600 cm)内土壤平均含水率为 9.46%,是 0~600 cm 土壤平均含水率的 18.59%。35 年林龄杏树地属于中度干燥化强度,以严重和强烈干燥层为主,其极度、强烈、严重、中度、轻度干燥层厚度分别达到 60,80,300,20,20 cm,干层(140~600 cm)内土壤平均含水率为 8.28%,是 0~600 cm 土壤平均含水率的 28.74%。总体上,宁南山区不同林龄杏树地土壤属于中度干燥化程度,且随着林龄的增加杏树地土壤干燥化程度有所加强。

表 4 不同林龄杏树地土壤干燥化强度及干层厚度的比较

Table 4 Comparison of soil desiccation intensity and dry layer thickness in apricot grounds at different ages

林龄/年 Planting age	平均土壤干燥化指数/% Average soil desiccation index	土壤干燥化强度 Soil desiccation intensity	干层厚度/cm Thicknesses of desiccated soil layer					干层内平均含水率/% Water moisture in the dry layer
			极度干燥层 Extremely dry layer	强烈干燥层 Strong dry layer	严重干燥层 Severe dry layer	中度干燥层 Moderately dry layer	轻度干燥层 Light dry layer	
3	184.36	无干燥化 No desiccated	0	0	0	0	0	0
17	99.87	轻度干燥化 Mild desiccated	0	20	40	220	40	9.61
23	74.60	中度干燥化 Medium desiccated	20	60	100	100	160	9.46
35	59.15	中度干燥化 Medium desiccated	60	80	300	20	20	8.28
CK(农田 Field)	156.02	无干燥化 No desiccated	0	0	0	0	0	0

2.5 土壤干燥化指标与环境因子的冗余分析

土壤生态系统中,土壤干燥化指标受各种环境因子的综合影响,为了更加直观地表示土壤干燥化指标与各种环境因子之间的关系,采用冗余分析法进行影响因子分析。选取经度、纬度、海拔、坡度、株高、胸径、冠幅、沙粒体积分数、黏粒体积分数等环境因子作为解释变量,以土壤干燥化指数、土壤干层起始深度、干层厚度、干层内含水率等因子作为响应变量,分析两组变量可得土壤干燥化指标与环境因子

的典型相关性(表 5)及二维排序图(图 4)。表 5 表明,在轴 I、II、III 水平上土壤干燥化指标与环境因子的相关性均在 0.900 以上,且在轴 I、II 水平上的特征值分别为 0.838 和 0.128,干燥化指标与环境因子数据累计变化百分比分别达到 86.8% 和 100.0%,说明研究区坡度和杏树林龄、胸径、冠幅、株高等环境因子与土壤干燥化指标之间具有较强的相关性。

表 5 土壤干燥化指标与环境因子的冗余分析

Table 5 Redundancy analysis of soil desiccation index and environmental factors

指标 Item	轴 Axes			
	I	II	III	IV
特征值 Eigenvalue	0.838	0.128	0.000	0.000
干燥化指标与环境因子的相关性 Correlation between desiccation index and environmental factors	0.997	0.900	0.994	0.000
干燥化指标数据累计变化百分比/% Cumulative change percentage of desiccation index data	83.80	96.50	96.50	0.000
干燥化指标与环境因子数据累计变化百分比/% Cumulative change percentage of desiccation index and environmental factors data	86.80	100.0	100.0	0.000

在图 4 中,影响土壤干层的环境因子用带有箭头的实线表示,用黑色三角形表示土壤干燥化指数、土壤干层起始深度、干层厚度、干层内含水率等土壤干燥化指标因子,箭头线段长度表示土壤干燥化指标与环境因子的相关程度,线段越长,代表因子间的关联性越强^[17]。环境因子箭头线段在土壤干燥化

指标因子箭头线段上的垂直投影越长,其对相应土壤干燥化指标的影响越大。箭头线段与排序轴的夹角越小,代表该因子与排序轴的相关性越高^[18]。图 4 显示,环境因子箭头线段的长短依次表现为坡度>林龄>胸径>冠幅>株高>粉粒体积分数>经度>海拔>沙粒体积分数>黏粒体积分数>纬度,

箭头连线与排序轴的夹角也呈现相似趋势,说明坡度和杏树林龄、胸径、冠幅、株高的差异是引起研究

区土壤干燥化的主要原因。

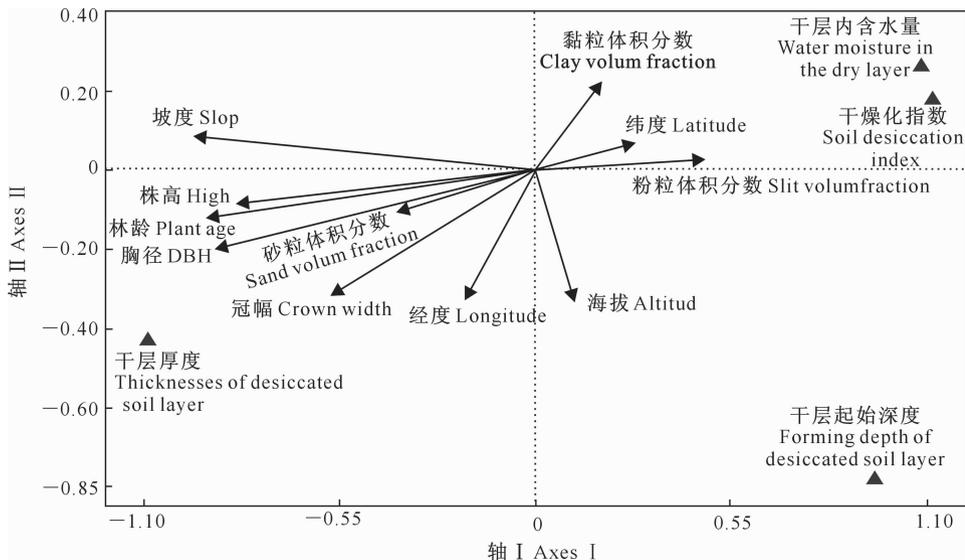


图 4 土壤干燥化指标与环境因子的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil desiccation index and environmental factors

3 讨论与结论

众多研究表明,土壤水分变化是地形、气候、植物生长年限和土地利用方式等自然和人为活动综合作用的结果^[8,12,19]。本研究以单一土地利用方式下不同林龄杏树地为研究对象,对 0~600 cm 土层的土壤含水率、干层起始深度、干层厚度、土壤水分相对亏缺指数及干燥化指数进行了分析,同时采用冗余分析对土壤干层影响因素进行了研究。结果表明,除 3 年林龄杏树地外,17,23,35 年林龄杏树地平均土壤含水率分别较对照农田减小了 12.76%, 21.28%, 23.33%。3 年林龄杏树地土壤平均含水率高于农田,主要是 3 年林龄杏树处于幼苗期,其冠幅、胸径、株高和根系对水分的需求远低于高密度种植玉米的农田,而采样月份(7 月)正值农田生长旺盛季节,其根系密度高于 3 年林龄的杏树,故其农田耗水量、植被蒸腾量均高于 3 年生杏树^[20-21]。除 3 年林龄杏树地外,其他林龄杏树地土壤干层起始深度均呈现出随林龄的增加而向表层发展,干层厚度随林龄增加而增加的趋势;3,17,23,35 年林龄杏树地剖面土壤水分相对亏缺指数值分别为 -0.16, 0.29, 0.45 和 0.53, 平均土壤干燥化指数分别为 184.36%, 99.87%, 74.60% 和 59.15%, 杏树林龄越长土壤水分亏缺越严重,干燥化程度越强。这主要是因为随着杏树地林龄的增加,植被根系向深层延伸,植被冠幅、胸径增大,土壤理化性质受根系和

植被体积形态的影响也逐渐增大,使土壤水分储量因植被的生长而减小^[22]。

本研究表明,17,23,35 年林龄杏树地土壤水分严重亏缺层和强烈干燥层均出现在 300 cm 土层附近。已有研究发现,黄土高原吴起县境内 20,30,50 年林龄人工杏树林在 200~300 cm 土层发生严重、极度干燥化^[23];同时在榆林地区也发现,矮化密植的梨、枣林林龄越长,其 0~700 cm 土层深度内的土壤水分越低,土壤严重干燥化层均发生在 300 cm 附近^[24];此外,米脂县 18,25,30,41 年林龄苹果林地,均在 100~300 cm 土层土壤含水量明显降低,并出现严重或强烈干层现象^[25]。上述研究均与本研究结论相似。本研究还发现,土壤水分相对亏缺指数的最大值和强烈干燥化程度均出现在深层土壤,除 0~100 cm 土层外,其余各层土壤水分相对亏缺指数均值均表现出随杏树林龄的增加而增大的现象,这可能与杏树根系中细根的分布情况有关^[6]。细根是植物输送水分和养分的通道,植被地上和地下的生物量均随植被林龄的增加而增加^[26],因此其对深层土壤水分的消耗增加,导致土壤水分相对亏缺量增大,土壤干燥化程度加强,植被衰退甚至死亡。

本研究中,23,35 年林龄杏树出现部分衰退、死亡现象,这与其水分亏缺大、土壤干层严重密切相关。土壤干层是植被、林龄、地形等因素综合作用的结果^[27-28]。为了进一步明确影响干层的主要因子,本试验对研究区经度、纬度、海拔、坡度、株高、胸径、

冠幅、沙粒体积分数和黏粒体积分数等进行冗余分析,结果表明坡度和杏树林龄、胸径、冠幅、株高是影响土壤干燥化程度的主要因素。因此,彭阳县进行人工林植被建设时,应有意识地将实际土壤水分状况与林龄相结合,采取因地制宜的原则,使生态-经济-环境得到可持续发展。对研究区的杏树人工林,建议进行科学合理的修剪,将树冠控制在一定范围内,同时适当减小种植密度,达到减少植被蒸腾、降低根系耗水、缓解土壤干层的目的^[14]。

【参考文献】

- [1] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. A new index to quantify dried soil layers in water-limited ecosystems: a case study on the Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2018, 322: 1-11.
- [2] 岳忠娜, 海江波, 尚辉, 等. 渭北旱塬果园土壤干燥化生态修复方式效应研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 222-228, 234.
- Yue Z N, Hai J B, Shang H, et al. Effects of ecological restoration methods on soil desiccation of apple orchard in Weibei dry plateau [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(2): 222-228, 234.
- [3] Zhang C C, Shao M A, Jia X X, et al. Spatial continuity and local conditions determine spatial pattern of dried soil layers on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2017, 17(8): 2030-2039.
- [4] 邵志一, 李毅. 玛纳斯河流域土壤水分及斥水性空间变异性研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 207-213.
- Shao Z Y, Li Y. Spatial variability in soil moisture and water repellency in Manasi river basin [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(2): 207-213.
- [5] 王亚莉, 李军, 王学春, 等. 陇东旱塬旱作苹果园水分生产力与土壤干燥化效应模拟 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(8): 131-140, 146.
- Wang Y L, Li J, Wang X C, et al. Simulation of water productivity and soil desiccation effects of dry land apple orchard on the dry plateau [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(8): 131-140, 146.
- [6] Fang X N, Zhao W W, Wang L X, et al. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3309-3323.
- [7] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 430-438.
- Han X Y, Liu W Z, Cheng L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the Loess Tableland, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 430-438.
- [8] 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 [J]. *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 [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22.
- [9] 郭正, 李军, 张玉娇, 等. 黄土高原不同降水量区旱作苹果园地水分生产力和土壤干燥化效应模拟与比较 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(1): 135-150.
- Guo Z, Li J, Zhang Y J, et al. Simulation and comparison of water productivity and soil desiccation effects of apple orchards in different rainfall regions of the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(1): 135-150.
- [10] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征 [J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3471-3481.
- Ma J Y, Jia N F, Cheng M. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3471-3481.
- [11] 王石言, 王力, 张静, 等. 黄土旱塬主要农林用地土壤水文特征对比 [J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3): 10-18.
- Wang Y S, W L, Zhang J, et al. Comparison of soil hydrological characteristics for main cropland and orchard in dry highland of the Loess Tableland [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(3): 10-18.
- [12] 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燥化的影响 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 143-149.
- Bao R, Zou Y J, Ma F W, et al. Effects of planting year and density on deep soil desiccation of apple orchards in Weibei dry land [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(15): 143-149.
- [13] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究 [J]. *林业科学*, 2004, 40(1): 84-91.
- Wang L, Shao M A, Li Y Y. Study on relationship between growth of artificial *Robinia pseudoacacia* plantation and soil desiccation in the Loess Plateau of northern Shaanxi province [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(1): 84-91.
- [14] 汪星, 高志永, 汪有科, 等. 修剪与覆盖对黄土丘陵区枣林土壤干层的修复效应 [J]. *林业科学*, 2018, 54(7): 24-30.
- Wang X, Gao Z Y, Wang Y K, et al. Effects of pruning and mulching on soil desiccation remediation in Rain-Fed jujube plantation in the Semi-arid Loess Hilly Gull Region [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(7): 24-30.
- [15] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺 [J]. *生态学报*, 2011, 31(11): 3060-3068.
- Yang L, Wei W, Mo B R, et al. Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3060-3068.
- [16] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应 [J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 75-89.
- Li J, Chen B, Li X F, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plat-

- eau of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 75-89.
- [17] 王新源, 陈翔舜, 丁乾平, 等. 不同荒漠化阶段植被生态特征对土壤环境因子的响应: 以民勤荒漠绿洲过渡带为例 [J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1569-1580.
Wang X Y, Chen X S, Ding Q P, et al. Vegetation and soil environmental factor characteristics, and their relationship at different desertification stages: a case study in the Minqin desert-oasis ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1569-1580.
- [18] 郭美丽, 焦峰, 薛超玉. 黄土丘陵区土壤水分空间分布与环境因子的关系 [J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(1): 46-55.
Guo M L, Jiao F, Xue C Y. Spatial distribution of soil moisture and its relationships with environmental factors in loess hilly region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(1): 46-55.
- [19] 宋小林, 吴普特, 赵西宁, 等. 黄土高原肥水坑施技术下苹果树根系及土壤水分分布 [J]. *农业工程学报*, 2016, 34(7): 121-128.
Song X L, Wu P T, Zhao X N, et al. Distribution characteristic of soil moisture and roots in rain-fed old apple orchards with water-fertilizer pit on the Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 34(7): 121-128.
- [20] 格日乐, 刘艳琦, 左志严, 等. 土壤水分对植物根-土界面相互作用特性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 135-140.
Ge R L, Liu Y Q, Zuo Z Y, et al. Effect of soil moisture on the characteristics of root-soil interface interaction [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1): 135-140.
- [21] 王玲, 冯向星, 刘庚, 等. 晋西北人工林植物水分亏缺与恢复研究 [J]. *林业建设*, 2017(1): 37-41.
Wang L, Feng X X, Liu G, et al. Plant water deficit and moisture restoration in artificial forest in northwestern Shanxi province [J]. *Forestry Construction*, 2017(1): 37-41.
- [22] 张树萌, 黄懿梅, 倪银霞, 等. 宁南山区人工林草对土壤真菌群落的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(4): 1449-1458.
Zhang S M, Huang Y M, Ni Y X, et al. Effects of artificial forest and grass on soil fungal community at southern Ningxia mountain [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1449-1458.
- [23] 梁海斌, 薛亚永, 安文明, 等. 黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应 [J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 77-85.
Liang H B, Xue Y Y, An W M, et al. Evaluation of different revegetation types on soil desiccation in the Loess Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(4): 77-85.
- [24] 辛小桂, 吴普特, 汪有科, 等. 山地不同树龄枣园土壤水分状况研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 85-89.
Xin X G, Wu P T, Wang Y K, et al. Study on soil water condition of mountain jujube yards of different growth years [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, 30(3): 85-89.
- [25] 李青华, 张静, 王力, 等. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征 [J]. *土壤学报*, 2018, 55(2): 503-514.
Li Q H, Zhang J, Wang L, et al. Desiccation and nutrient status of the soil in apple orchards in Hilly-Gully region of the Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 503-514.
- [26] 傅子涓, 王云强, 安芷生. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同植被类型下土壤水分动态特征 [J]. *地球环境学报*, 2015, 6(3): 188-194.
Fu Z H, Wang Y Q, An Z S. Dynamics of deep soil moisture under different vegetation types in the wind-water erosion crisscross on the chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(3): 188-194.
- [27] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors [J]. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 2012, 57(2): 265-281.
- [28] 张春梅, 焦峰, 温仲明, 等. 延河流域自然与人工植被地上生物量差异及其土壤水分效应的比较 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 132-138, 146.
Zhang C M, Jiao F, Wen Z M, et al. Differences of above-ground biomass and comparisons of its effect on soil moisture between natural vegetation and artificial vegetation in Yanhe basin [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(4): 132-138, 146.