

陕西省延川县孙家塬经济林土壤水分和水分平衡

牛俊杰^{1,2}, 马树苗³, 赵景波³, 周旗²

(1. 太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心, 山西 太原 030619; 2. 宝鸡文理学院

陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721007; 3. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: 对陕西省延川县孙家塬枣树林和苹果林 4 m 深度土层水分的变化进行了研究, 并对土壤水分有效性、土壤干层及其水循环等方面进行了分析。结果表明, 枣树林地含水量平均为 10.6%, 还有 4.5% 的土壤水资源可以利用。苹果林地 4 m 深度范围内平均含水量为 7.4%, 2.0—4.0 m 深度范围内土壤水资源基本耗尽。苹果林地土壤含水量自上向下呈现高一低一高分层变化特点, 枣树林地土壤水分剖面垂向分层不明显。枣树林地和苹果林地土壤水分基本都呈难效水状态, 但枣树林土壤水分接近中效水, 土壤水分对苹果林生长具有严重的抑制作用, 对枣树林的生长基本没有抑制作用。枣树林地 2.0—4.0 m 深度范围仅有轻度干层发育, 苹果林地土层 2.0—4.0 m 深度范围有轻度干层、中度干层和重度干层发育。苹果林地和枣树林地土壤干层切断了深层水分与上层的联系。水循环主要表现为地表水循环, 基本不存在地下水循环, 形成了土壤—植物—大气的水分循环模式, 属于异常水分循环类型。干层长期发展会导致该区地下水位的持续下降和地下水资源减少。该区土壤水分条件更适于发展枣树经济林。

关键词: 经济林; 土壤含水量; 干层分布; 水分平衡; 陕西省延川县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0033-06

中图分类号: S152.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.021

Soil Water Content and Water Balance of Economic Trees at Sunjiayuan in Yanchuan County of Shaanxi Province

NIU Jun-jie^{1,2}, MA Shu-miao³, ZHAO Jing-bo³, ZHOU Qi²

(1. Research Center for Scientific Development in Fenhe River Valley, Taiyuan Normal

College, Taiyuan, Shanxi 030619, China; 2. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism

Simulating of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721007, China;

3. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: The variation characteristics of soil moisture of jujube and apple trees, soil water availability, dried soil layer and the influence of dried layer to the soil reservoir, and water cycle and balance in the depths of 0—4.0 m at Sunjiayuan in Yanchuan County, Shaanxi Province were analyzed. The results showed that the average soil moisture of jujube tree was 10.6% in the depths of 0—4.0 m and there is about 4.5% available water. The average soil moisture of apple land was 7.4% in the depths of 0—4.0 m which indicates available water was exhausted nearly. Soil moisture of apple tree land presented layered change of “high—low—high” from up to down, and jujube forest vertical change in soil moisture profile was not obvious. Soil water of the jujube and apple trees land was almost difficult available water, but soil water of the jujube trees land is near middle available water. Absorbing soil water was inhibited to some extent for apple trees, but almost no effect on jujube trees. Jujube tree land had only developed mild dried soil layer in the 2.0—4.0 m soil layer, and apple trees land had developed mild, moderate and severe dried soil layer. The bond between deep soil water and the surface of apple and jujube tree land was cut off by dried soil layer. Water cycle was mainly surface water cycle, and underground water circulation did not exist nearly. Soil—plant—atmosphere water cycle model was formed and it belonged to abnormal water cycle type. Dried soil layer developing toward the steady speed would lead to underground water level continuous depression and underground water resource

收稿日期: 2013-08-08

修回日期: 2013-08-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“晋西北生态重建优势种林地土壤水分研究: 以沙棘和柠条为例”(41171423); 陕西高校省级重点实验室“宝鸡文理学院灾害监测与机理模拟实验室访问学者专项计划项目”(2010JS074)

作者简介: 牛俊杰(1968—), 男(汉族), 山西省岚县人, 博士, 教授, 主要从事自然地理研究。E-mail: junjieniu@foxmail.com。

通讯作者: 赵景波(1953—), 男(汉族), 山东省滕州市人, 博士, 教授, 主要从事自然地理研究。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn。

decreased. Soil water in the region was more suitable for developing jujube trees.

Keywords: economic trees; soil water content; dried soil layer distribution; water balance; Yanchuan County of Shaanxi Province

众多学者对西北黄土地区人工植被土壤含水量进行了广泛地研究^[1-6], 获得了许多重要研究成果。目前已认识到黄土高原土壤水分不足, 常有土壤干层发育。研究^[1-4]表明, 土壤干层是导致黄土高原中龄人工林生长不良甚至造成树木死亡的主要原因, 土壤干层不仅在黄土高原分布广泛, 在西北草原地区分布更广, 发育更为严重^[7-9]。关于土壤干层产生的原因, 普遍认为天然降水少和在不适宜森林生长地区造林以及所选树种不当等^[1,6]所致。国外对土壤水分研究也很多, 并重视土壤水分对植被的影响和气候变化对土壤水分的影响。Yuin^[10]研究了土壤水分入渗过程, 提出了入渗模型; Rapp^[11]研究了蒸发对土层结构的影响, 获得了旱化结壳对种子萌发的不利作用; Atrick 等^[12]根据土壤性质和模拟实验, 估算了现代作物根部土壤含水量; Lunt 等^[13]研究认为, 利用雷达反射资料能够估算现代土壤含水量; Michael 等^[14]研究了干旱区土壤水的持续性和稳定性, 认识到除降水因素之外, 土壤性质起到了主要作用; Anne 等^[14]通过模拟实验研究了气候变化对土壤水动态影响, 认为到 21 世纪中期气候暖干化将使美国勃兰登堡地区可利用土壤水减少 4%~15%; Sonia 等^[15]研究了气候变化与土壤湿度的相互作用, 认为土壤水对气候有多方面的影响; Patricio 等^[16]研究美国中部大平原农田土壤水分恢复, 提出了预测土壤水分的经验模型; Zoltan^[17]通过卫星观测和分析典型土壤水分数据, 认为据此可以准确预报 10 a 内全球范围的土壤水分的变化序列。

我国苹果产量位居世界第一, 黄土高原地区独特的自然地理位置和气候条件决定了该区是优质苹果生产基地; 陕北的红枣质量优良, 也是陕北经济的重要来源。过去对黄土高原中南部苹果林地土壤水做了一定研究^[18-20], 但对位于延安市北部地区的延川地区苹果林地土壤水分和枣树林地的土壤水分研究很少。研究该区经济林地土壤水分的垂向变化, 能够揭示土壤水垂向分布特点和变化规律, 能够查明该区土壤水对经济林生长的适宜性, 可为该区经济林发展和农民增收提供重要科学依据。

1 研究区概况与试验方法

延川县地处陕西省延安市的东北部, 是延安地区管辖县之一, 距延安市北约 80 km。位于黄河西岸, 属陕北黄土丘陵沟壑区, 平均海拔约 850 m。延川县地

理位置在北纬 36°37'15"—37°5'55"、东经 109°36'20"—110°26'44"之间。延川县年平均气温为 11.9℃, 年平均降水量为 511 mm, 降雨主要集中在 6—9 月份, 属于半干旱气候。该区土壤为黏黑垆土, 侵蚀后在黄土上发育黄绵土^[6]。延川县地带性的植被为森林灌丛草原。

通过野外调查, 选择延川县孙家塬苹果林地和枣树林地进行采样研究。采样点苹果林地处于延川县东南方向的孙家塬附近, 距延川县城约 15 km, 林地面积约 0.20 hm², 苹果产量 22 500~30 000 kg/hm², 果树龄 14 a, 树高 4 m 左右, 主干直径约 10 cm, 根系分布深度为 1.5 m 左右, 植株间距为 2.5~3.5 m, 树冠直径为 2~3 m。利用土钻在苹果林地打 12 个钻孔, 钻孔间距在 20~30 m 之间, 分别标记为剖面(钻孔) a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l。为了揭示蒸发影响深度(约 2 m)之下土壤水分的剖面变化, 钻孔深度为 4 m。采样间距 0.1 m。样品重量一般为 50~60 g。采样时间选在土壤水分条件较好的雨季中期的 8 月份 3~12 号。采样前的 7 月份延川降水量近 120 mm, 与正常年 7 月降水基本相同。采样前一周曾降小雨, 不足 10 mm。枣树林地位于苹果林南 1 km 左右, 样地约 0.13 hm², 产量 15 000 kg/hm², 树龄为 7~8 a, 树高约 3 m, 直径约 8 cm, 植株间距 3 m 左右, 树冠直径约为 2 m。在枣树样地打 10 个钻孔(分别标记为 a, b, c, d, e, f, g, h, i, j), 钻孔深度为 4 m, 钻孔间距约 20 m, 样品间距 0.1 m。果树生长主要在春季, 但夏季的蒸腾与蒸发消耗水分也很多。土壤含水量的测定利用烘干称重法测定。

2 结果与分析

2.1 枣树林地土壤水分含量分析

根据枣树林地 10 个钻孔剖面土壤含水量测定结果可知, 枣树林地 0—4 m 深度范围土壤含水量自上向下总体呈增加趋势, 土层含水量垂向分布特点是整个剖面含水量差异很小(图 1), 波动变化也小。a 孔平均含水量为 10.2%, 变化范围为 8.5%~11.7%; b 孔平均含水量为 10.5%, 变化范围为 9.6%~11.2%, 含水量波动较大; c 孔平均含水量为 10.5%, 变化范围为 10.0%~11.3%; d 孔平均含水量为 10.5%, 变化范围为 8.1%~11.1%; e 孔平均含水量为 10.8%, 变化范围为 10.2%~12.1%; f 孔平均含水量为 10.7%, 变化范围为 10.0%~12.3%; g 孔平均含水

量为 10.9%, 变化范围为 8.2%~11.8%; h 孔平均含水量为 10.6%, 变化范围为 7.1%~11.7%; i 孔平

均含水量为 10.8%, 变化范围为 9.0%~11.9%; j 孔平均含水量为 10.9%, 变化范围为 8.5%~11.6%。

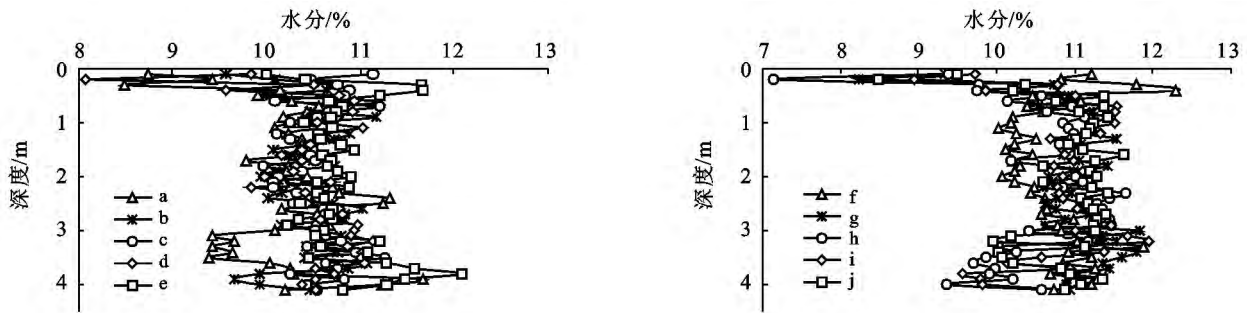


图1 延川县孙家塬枣树林土壤含水量

2.2 苹果树林地土壤水分含量分析

苹果树林地 12 个钻孔含水量测定结果表明(图 2), a, b, c 和 d 剖面土壤含水量变化规律一致, 在约 1.2 m 以上土层中, 土层中含水量随深度的增加而减少, 在 1.2—2.5 m 之间含水量相对稳定, 较 1.2 m 以上土壤的含水量少, 在 2.5—4 m 土层中, 含水量呈增加趋势。a 剖面平均含水量为 8.6%, 变化范围在 6.3%~12.3%之间; b 剖面平均含水量为 6.6%, 变化范围为 4.9%~11.2%; c 剖面平均含水量为 7.0%, 变化范围为 5.2%~11.3%; d 剖面平均含水量为 6.8%, 变化范围为 5.1%~10.9%。这 4 个剖面均可分为 3 层, 从上向下第 1 层含水量最高, 第 2

层含水量最低, 第 3 层含水量居中。由图 2 可以看出, e, f 剖面 and g, h 剖面土壤含水量变化基本一致, 在 0—1.1 m 范围内随深度增加呈较快减少, 在 1.1—4.0 m 之间含水量较低, 变化较小。e 剖面平均含水量为 6.1%, 变化范围为 5.0%~11.4%; f 钻孔平均含水量为 5.8%, 变化范围为 4.7%~9.6%; g 孔平均含水量为 6.1%, 变化范围为 4.9%~9.7%; h 孔剖面平均含水量为 6.3%, 变化范围为 5.0%~10.4%。这 4 个剖面含水量可分为 2 层, 位于剖面上部的第 1 层在 0—1 m 左右深度范围, 含水量较高, 位于剖面中下部的第 2 层在约 1—4 m 之间, 含水量较低。i 剖面与 j 剖面含水量较其它剖面高出 2% 左右。

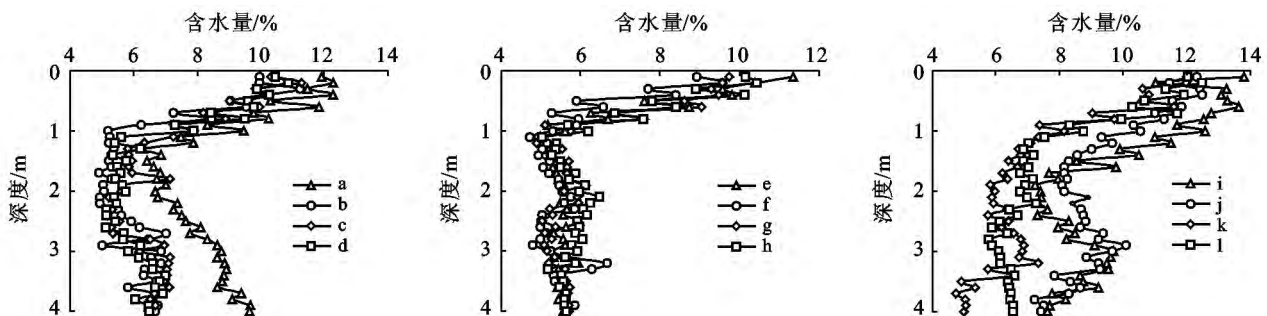


图2 延川县孙家塬苹果树土壤含水量

3 结果讨论

3.1 枣树林地与苹果林地可利用土壤水资源差异分析

延川县枣树林地与苹果林地土壤含水量差别显著, 枣树林地 4 m 土层深度范围内平均含水量较苹果林地高, 前者平均含量为 10.6%, 后者平均为 7.4%, 枣树林地土壤平均含水量高出苹果林地 3.2%。枣树林地 4 m 土层深度范围内分层不明显, 4 m 深度范围含水量相当均匀, 苹果林地 4 m 深度范围内分层明显, 上层含水量高, 中下层含水量低, 这在黄土高原具有普遍性^[19-21]。这种差异可以确定枣树生长消耗的

水分较少, 苹果树消耗水分较多。根据延安地区土壤稳定凋萎湿度为约 6%^[22]可知, 该区枣树林地土壤水资源储量还较多, 还有约 4.5% 的土壤水资源未被利用, 所以该区土壤水分能够满足枣树林生长的需要, 适于发展枣树林。延川苹果林地 2—4 m 土壤含水量只有 6.5% 左右, 可利用水资源仅有 0.5% 左右, 可利用水资源基本耗尽, 所以该区如果没有灌溉条件, 一般不适于发展苹果林。

3.2 延川县经济林土壤水分有效性类型分析

土壤水分的含量变化存在 3 个转折点, 分别是凋萎湿度、生长阻滞持水量和田间持水量^[20]。凋萎湿

度是植物叶子刚开始出现萎缩时的土壤含水量^[6]。田间持水量是指土壤所能稳定保持的最高土壤含水量。研究区的稳定凋萎湿度和田间持水量分别为 6.0% 和 20.0%^[6]。土壤有效水总量指田间持水量与永久凋萎湿度之差。生长阻滞持水量指田间持水量的 60%。土壤含水量低于稳定凋萎湿度时,土壤中的水分不能为植物吸收利用,就会导致植物干枯死亡,此时土壤水分无效水。当含水量大于稳定凋萎湿度时,作物可以吸收利用土壤有效水分,但其吸收利用水分的难易程度存在差异^[23]。所以根据土壤水分被植物吸收利用的难易程度,将土壤有效水划分为难效水、中效水和易效水 3 个等级。难效水是指从稳定凋萎湿度到生长阻滞持水量的土壤水分,植物虽然

能够吸收利用土壤水分,但其根系从土壤中吸收水分时需要克服较大基质吸力,植物的正常生长受到一定的阻滞。难效水对植物生长的阻滞性的大小差别也较大,这取决于含水量的多少,含水量越少,阻滞性越大,植物生长越差。易效水指的是土壤含水量相对较高,小于田间持水量,大于 80% 田间持水量的这部分土壤水分,土壤基质吸力较弱,容易为植物吸收利用,一般不会对植物的生长发育造成水分胁迫。中效水是指介于难效水与易效水之间的土壤水分,一般指土壤含水量为田间持水量的 60%~80% 的这部分土壤水分,吸收利用这部分水分,在一定程度上受土水势的影响。结合本研究实际情况将延川地区土壤水分有效性划分为 5 级(表 1)。

表 1 延川地区土壤水分有效性分级

有效性分级	无效水	难效水	中效水	易效水	重力水
划分标准	< 稳定凋萎湿度	稳定凋萎湿度~田间持水量的 60%	田间持水量的 60%~80%	田间持水量的 80%~100%	> 田间持水量
土壤含水量/%	< 6.0	6.0~12.0	12.0~16.0	16.0~20.0	> 20.0

结合上述土壤水分有效性等级划分,对研究区枣树林土壤和苹果树林土壤剖面水分的有效性进行分析。结果表明苹果树林地各层土壤水分基本都处于难效水状态(图 3),苹果林吸收土壤水分都会不同程度上受到抑制,对苹果生长和苹果产量具有一定的不利影响。苹果树林地 1.1 m 以下土层土壤水分接近无效水。若该区持续干旱,则苹果树林地 1.1 m 以下土壤水分易下降为无效水。若该区为丰水年,苹果树林地 0—1.1 m 土壤水分也可能成为中效水。枣树林土壤水分也为难效水,但其与苹果林土壤水有明显差别,枣树林的难效水接近中效水(图 3),所以枣树的生长受到土壤水分的胁迫小。因此,该区适于发展枣树林。

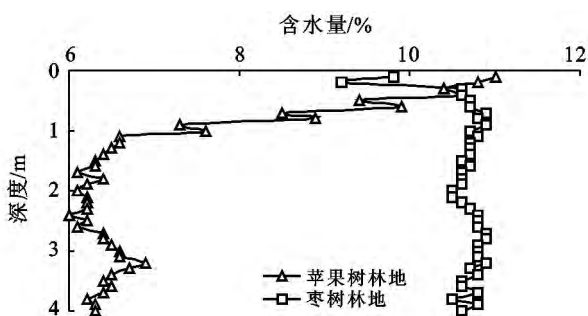


图 3 延川地区枣树林与苹果林土壤水分有效性

3.3 枣树林与苹果林土壤干层等级与原因分析

通常认为,土壤水分的亏缺经过多年的不当补给,其土层为土壤干层^[21]。要查明研究区的经济林

是否存在土壤干层,首先要确定土壤干层的判定依据。研究区属于延安地区,土壤干层的判定根据王力^[22]等提出的延安地区土壤干层的判定方法,以田间持水量的 60% 为确定土层为土壤干层的含水量标准。根据该标准^[22],可将该区土壤干层分为以下 3 个等级:(1) 轻度干层。含水量在 9%~12% 之间,对植物生长影响不大,土壤水分基本能满足植物正常生长发育。(2) 中度干层。含水量在 6%~9% 之间,对植物生长影响较为明显,植物经常处于缺水状态,容易形成低产低效林。(3) 重度干层。土壤含水量低于 6%,严重影响着植物正常的生长发育,甚至会导致植被枯萎甚至死亡。

图 4 为延川地区枣树林地和苹果树林地 0—4 m 和 2—4 m 土层深度的含水量,也显示了 4 m 土层深度范围内不同等级土壤干层的厚度。由图 4 和表 2 可知,枣树林所有土壤剖面的土壤干层均为轻度干层,干层发育较弱。苹果树林地钻孔土壤 2—4 m 土层深度土壤含水量集中在 5.5%~9.7% 之间,平均含水量为 7.2%,含水量都显著低于 12%。由图 4 可知各个钻孔剖面都存在干层,且轻度干层、中度干层和重度干层都有发育,只是在各个剖面干层发育强度不同,12 个剖面土壤 2—4 m 深度发育的土壤干层主要为中度干层和重度干层,轻度干层仅在个别剖面发育。a, i, j 剖面的干层发育情况相似,主要为中度干层,发育的厚度分别为 1.6, 1.4 和 1.4 m,轻度干层发育厚度小,分别为 0.4, 0.6 和 0.6 m。b, c, d, f 剖

面都存在中度干层和重度干层发育,中度干层的厚度分别为1.4,1.3,1.1和0.2 m,重度干层的厚度分别

为0.6,0.7,0.9和1.8 m。e和g剖面全部都为重度干层。

表2 延川地区枣树林和苹果林土壤2—4 m土层土壤平均含水量

%

钻孔编号	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
枣树林地含水量	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.1	10.7	10.9	10.9
苹果林地含水量	8.6	6.6	7.0	6.8	6.1	5.8	6.1	6.3	9.7	9.3

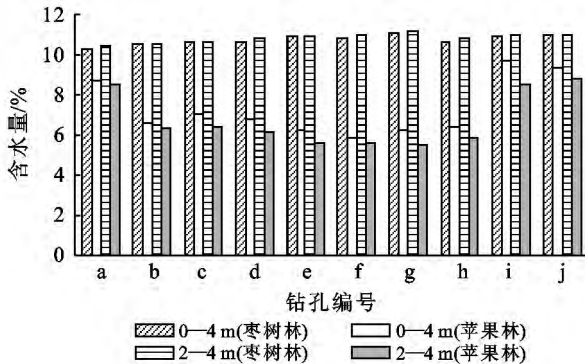


图4 延川县孙家塬枣树林与苹果林土壤剖面含水量分层

3.4 枣树林与苹果林土壤干层与水分平衡的影响

研究表明,黄土高原人工林在年降水量600 mm的条件下^[6],土壤水分处于平衡状态,大于这一降水量为正平衡,低于这一降水量为负平衡。在该区丰水年,土壤水分表现出清楚的正平衡^[24-26]。正平衡表明大气降水与土壤水较充足,每年有一部分大气降水转化成为地下水。水分循环的过程包括蒸发、植被蒸腾、水汽输送、降水形成地表径流或下渗形成地下径流最后流入江河湖海或成为地下水^[6]。根据上述的研究,发现枣树林地和苹果树林地2 m以下土层都有干层发育,说明研究区土壤水分输出量大于输入量,也就是说土壤干层是在土壤水分处于负平衡的条件下产生的^[6]。负平衡是指大气降水经过蒸发、蒸腾、植物叶片截留和地表径流损失之后,已没有剩余的水分通过土壤渗入地下。水分负平衡的出现造成了正常的水分下渗补给给地下水的环节被切断,使得大气降水只能转化成位于地表的土壤水,影响的深度只有2 m左右,一般不参与地下水循环。这表明研究区水循环主要是地表水循环,地下水循环基本不存在,形成了土壤—植物—地表径流—大气的水分循环模式,属于异常水分循环类型。这样的水循环在自然界也是很常见的,特别是在干旱地区,水分负平衡是广泛存在的^[26]。因此,该区枣树林与苹果树林土壤干层的出现,影响了该区的正常水循环和水分平衡,长期发展下去会导致该区地下水位的持续下降和地下水资源缺乏。在土壤水分负平衡的地区,适于发展耗水少的浅根系植被或作物。

4 结论

(1) 枣树林地土壤含水量平均为10.6%,有4.5%的土壤水资源可以利用。苹果林地4 m深度范围内平均含水量为7.4%,2—4 m深度范围内土壤水资源基本耗尽。苹果林地土壤含水量自上向下呈现高一低—高分层变化特点,枣树林地土壤水分剖面垂直向分层不明显。

(2) 枣树林地和苹果林地土壤水分基本都呈难效水状态,但枣树林土壤水分接近中效水,土壤水分对苹果林生长具有严重的抑制作用,对枣树林的生长基本没有抑制作用。

(3) 枣树林地仅有轻度干层发育,苹果林地土层2—4 m土层深度范围内轻度干层、中度干层和重度干层发育。干层长期发展下去会导致该区地下水位的持续下降和地下水资源减少。该区土壤水分更适于发展枣树林。干层长期发展会导致该区地下水位的持续下降和地下水资源的减少。

(4) 枣树林地和苹果林地土壤干层的发育切断了大气降水与地下水的联系。水循环主要是地表水循环,地下水循环基本不存在,形成了土壤—植物—大气的水分循环模式,属于异常水分循环类型。

致谢:参加研究工作的还有邢闪、魏君平、杨龙和刘磊同志,谨此致谢。

[参 考 文 献]

- [1] 侯庆春. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 76-83.
- [2] 付明胜, 钱卫东, 牛萍, 等. 连续干旱对土壤干层深度及植物生存的影响[J]. 干旱区研究, 2002, 19(2): 71-74.
- [3] 许喜明, 陈海滨, 原焕英, 等. 黄土高原半干旱区人工林地土壤水分环境的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 60-64.
- [4] 张海, 王延萍. 黄土高原坡地土壤干层形成机理及补水途径研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 162-164.
- [5] 刘刚, 王志强, 王晓岚, 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 126-129.
- [6] 杨文治. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版

- 社,2000.
- [7] 赵景波,曹军骥. 青海流域土壤水与土壤水库[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [8] 赵景波,曹军骥,侯雨乐. 青海湖北沙柳河镇土壤水分特征与植被建设[J]. 水土保持通报,2011,31(1):180-185.
- [9] 赵景波,祁子云,魏君平,等. 青海湖北土壤水分分布与土壤干层恢复[J]. 地理科学进展,2012,31(7):853-858.
- [10] Yuin E. An infiltration model to predict suction changes in the soil profile[J]. Water Resource Research, 1998,34(7):1617-1622.
- [11] Rapp I. Evaporation and crust imperdance role in seeding emergence[J]. Soil Science, 2000,165(4):354-364.
- [12] Ptrick J. Use of limited soil property data and modeling to estimate root zone soil water content[J]. Journal of Hydrology, 2003,272(1/4):131-147.
- [13] Lunt I A, Hubbard S S, Rubin Y. Soil moisture content estimation using ground penetrating radar reflection data[J]. Journal of Hydrology, 2005,307(1/4):254-269.
- [14] Anne H, Tobias V, Katrin V, et al. Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas [J]. Ecological Modelling, 2009, 220(17):2076-2087.
- [15] Sonia I S, Thierry C, Edouard L D, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2010,99(3/4):125-161.
- [16] Patricio G, You Jinsheng, Kenneth G H, et al. Soil water recharge in a semi-arid temperate climate of the Central U. S. Great Plains [J]. Agricultural Water Management, 2010,97(7):1063-1069.
- [17] Zoltan B, Wolfgang W. Initial soil moisture retrievals from the METOP: A advanced scatterometer [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(20): 1-5.
- [18] 黄明斌,杨新良,李玉山,等. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J]. 地理学报,2001,56(1):7-13.
- [19] Zhao Jingbo, Du Juan, Chen Baoqun. Dried earth layers of artificial forestland in the Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007,17(1):114-126.
- [20] 陈洪松,王克林,邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J]. 林业科学,2005,41(4):155-161.
- [21] 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):76-89.
- [22] 王力,邵明安,侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报,2000,14(4):87-90.
- [23] 陈海滨,刘淑明,党坤良,等. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(II):土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J]. 西北林学院学报,2004,19(1):5-8.
- [24] 赵景波,王长燕,岳应利,等. 西安地区人工林土壤干层与水分恢复研究[J]. 自然资源学报,2007,22(6):890-895.
- [25] 杜娟,赵景波. 西安地区不同植被下土壤含水量及水分恢复研究[J]. 水土保持学报,2006,20(6):59-61.
- [26] 赵景波,曹军骥. 青海湖流域土壤水与土壤水库研究[M]. 北京:科学出版社,2011.

(上接第 32 页)

- [12] 齐清,李传荣,许景伟,等. 沙质海岸不同植被类型土壤水源涵养功能的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):102-105.
- [13] 夏江宝,刘庆,谢文军,等. 废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(12):63-68.
- [14] 王晓芳,夏江宝. 黄河三角洲引黄灌区不同植被类型的降盐改土功能[J]. 水土保持学报,2012,26(3):141-144.
- [15] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey lakes watershed, central Ontario [J]. Journal Hydrology, 2005, 306(1/4): 1-20.
- [16] Rosa J D, Cooper M, Darboux F, et al. Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariogram-based index[J]. Soil and Tillage Research, 2012,124(8):226-232.