

# 黄土高原不同植被类型区人工林地 深层土壤干燥化效应

李 军<sup>1,2</sup>, 陈 兵<sup>1,4</sup>, 李小芳<sup>1</sup>, 赵玉娟<sup>3</sup>, 次仁央金<sup>1</sup>, 蒋 斌<sup>3</sup>,  
胡 伟<sup>1</sup>, 程积民<sup>2</sup>, 邵明安<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学资环学院, 陕西杨凌 712100; 4. 海南农垦科技创新中心, 海南海口 570206)

**摘要:**人工林地土壤干燥化正在日益严重的威胁着黄土高原人工植被建设成效。在黄土高原 3 个植被类型区广泛观测苹果、刺槐、油松、辽东栎、狼牙刺、沙棘和柠条等 23 种不同立地和树龄林地深层土壤湿度基础上, 比较和分析了各类林地土壤含水量、土壤湿度剖面分布和土壤干燥化强度, 定量评价了各类林地深层土壤干燥化效应。研究结果表明: (1) 23 种林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度、土壤贮水量和土壤有效含水量平均值依次为 10.84%、1409.8 mm 和 446.6 mm, 明显低于荒草地土壤湿度和当地土壤稳定湿度值, 各类林地平均土壤水分过耗量超过 500 mm, 每年多消耗土壤水分 36.8 mm。林地土壤水分过耗量和耗水速度以中部半干旱森林草原区最高, 南部半湿润森林区相对较低。林地土壤干燥化速度为: 柠条和狼牙刺林地 > 油松林地 > 刺槐和沙棘林地 > 苹果园地和辽东栎林地; (2) 除林龄较短的苹果、沙棘和柠条林地外, 各类林地在 300 cm 以下深层土壤湿度明显低于荒草地土壤湿度和土壤稳定湿度值, 林地深层土壤湿度表现为阳坡低于阴坡、坡地低于平地, 最大耗水深度接近或超过 1000 cm。随林龄增长, 林地深层土壤湿度逐渐降低, 土壤干层逐渐加深和加厚; (3) 23 种林地土壤干燥化指数平均值为 51.6%, 达到中度(偏重)干燥化强度, 林地土壤干层厚度达到或超过 800 cm, 随着降水量从半湿润区向半干旱偏旱区趋势性减少, 林地土壤干燥化强度趋于强化, 土壤干层厚度趋于增加。土壤干燥化强度和土壤干层厚度表现为: 油松、辽东栎、狼牙刺和柠条林地 > 刺槐林地 > 苹果和沙棘林地。

**关键词:**黄土高原; 人工林地; 土壤湿度; 土壤干燥化

文章编号: 1000-0933(2008)04-1429-17 中图分类号: S152.7 文献标识码: A

## Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China

LI Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Bing<sup>1,4</sup>, LI Xiao-Fang<sup>1</sup>, ZHAO Yu-Juan<sup>3</sup>, Ciren Yang-Jin<sup>1</sup>, JIANG Bin<sup>3</sup>, HU Wei<sup>1</sup>, CHENG Ji-Min<sup>2</sup>, SHAO Ming-An<sup>2</sup>

1 College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China

3 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

4 Scientific and Technological Innovation Center of Farm Management of Hainan, Haikou, Hainan 570206, China

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1429 ~ 1445.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(40371077 和 30471024)

**收稿日期:**2007-01-02; **修订日期:**2007-08-23

**作者简介:**李军(1964 ~), 男, 甘肃泾川人, 博士, 教授, 主要从事旱区农业生态、高效农作制度和农业生产系统模拟等研究. E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40371077 & No. 30471024)

**Received date:** 2007-01-02; **Accepted date:** 2007-08-23

**Biography:** LI Jun, Ph. D., Professor, mainly engaged in agroecology of dryland, high efficient farming system and agricultural production system simulation. E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

**Abstract:** Soil desiccation on artificial forestlands is increasingly threatening the achievements and effects of artificial vegetation constructions of the loess plateau. Based on widely observations of deep soil moisture on 23 kinds of tree and shrub forestlands, which included apple tree (*Malus domestica* Borkh), black locust tree (*Robinia pseudoacacia*), Chinese pine tree (*Pinus tabulaeformis* Carr.), Manchurian oak tree (*Quercus liaotungensis*), David's mountain laurel shrub (*Sophora viciifolia*), seabuckthorn shrub (*Hippophae rhamnoides*) and littleleaf peashrub (*Caragana microphylla*), at different growth locations and in different growth ages on 3 vegetation zones of the Loess Plateau, soil water amounts, soil water distributions and soil desiccation intensities on various forestlands were compared and analyzed, effects of soil desiccation of different forestlands were quantitatively assessed. The results show as following: (A) Average soil moistures, soil water storages and available soil water storages in 0—1000 cm soil layers of 23 forestlands were 10.84%, 1409.8mm and 446.6mm respectively, which were obviously lower than local natural grasslands and soil stable moisture, and soil water overuse amounts was higher than 500mm and annual soil water overuse was 36.8mm. Soil water overuse amounts and speeds on middle semi-arid forest-steppe zone was the highest one and south semi-humid forest zone was the lowest one in 3 vegetation zones. Sequences of soil desiccation speeds of forestlands from high to slow were littleleaf peashrub and David's mountain laurel shrub, Chinese pine tree, black locust tree and seabuckthorn shrub, apple tree and Manchurian oak tree. (B) Except young apple tree, seabuckthorn shrub and littleleaf peashrub land, soil moistures beneath 300 cm soil layers on all other forestlands were obviously lower than natural grasslands and local soil stable moisture, and soil moisture of south slope forestlands were lower than north slope forestlands, and slope forestlands were lower than that highlands. Maximum soil water use depth of forestlands were close to or over 1000 cm. soil moistures on deep soil layers of forestlands decreased and thickness of desiccated soil layers increased as forest growth age increased. (C) Average soil desiccation index of 23 forestlands was 51.6%, soil desiccation intensity was medium desiccated (prone to serious desiccated). Thicknesses of desiccated soil layers on forestlands reached or passed 800 cm, and soil desiccation intensities strengthened and thicknesses of desiccated soil layers deepened as rainfall decreased from south semi-humid zone to north semi-arid prone drought zone. Sequences of soil desiccation intensities and desiccated soil layer thicknesses of forestlands from high to low were Chinese pine tree, Manchurian oak tree and littleleaf peashrub firstly, black locust tree secondly, apple tree and seabuckthorn shrub lastly.

**Key Words:** the Loess Plateau; artificial forestlands; soil moisture; soil desiccation

近 40a 来,以植树造林为核心的人工植被建设是黄土高原水土保持和生态环境治理的重要内容。但随着气候干旱化趋势加剧,以土壤水分持续严重亏缺为特征的人工林地土壤干燥化现象正在日益严峻地威胁着黄土高原人工林正常生长,导致了“小老树”等大面积人工低产林的形成<sup>[1~6]</sup>。近 5a 来,有关专家初步调查研究和分析报道了黄土高原刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、柠条(*Caragana microphylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和苹果(*Malus domestica* Borkh)等主要类型人工林地土壤干燥化现象<sup>[7~21]</sup>。杨文治、邵明安等论述了黄土高原土壤水分特征与植树造林的关系<sup>[7,8]</sup>,李玉山、黄明斌等研究了黄土高原森林植被和苹果基地对陆地水循环的影响<sup>[9,10]</sup>,陈云明等论述了黄土高原土壤水分效应和林草植被建设的地带性特征<sup>[11,12]</sup>,穆兴民等研究了人工林对区域深层土壤水环境的影响<sup>[13]</sup>,程积民等定位测定了半干旱区沙棘和柠条林地土壤水分动态与水分过耗特征<sup>[14,15]</sup>,王力等调查分析了陕北刺槐林地土壤干层特征<sup>[16]</sup>,樊军等测定和比较了黄土旱塬苹果、刺槐、农田深层土壤水分消耗情况<sup>[18]</sup>,王进鑫等定位监测了人工林地 0~3.2 m 土层土壤水分亏缺与恢复特征<sup>[18]</sup>,杨新民等研究了柠条和沙棘等灌木林地的土壤水分平衡<sup>[19]</sup>,王志强等测定和分析了陕北绥德人工林地深层土壤湿度与林木存活能力的关系<sup>[20]</sup>,陈洪松等评述了黄土区人工植被深层土壤干燥化研究进展<sup>[21]</sup>。上述研究结果表明,黄土高原人工林地土壤干燥化导致各类林地深层土壤干层普遍发生,土壤干层具有较低的土壤含水量范围、位于降水渗深以下土体部位、形成之后具

有相对持久性、干层土壤湿度恢复困难等基本特征,已成为制约黄土高原植树造林成效的严重生态隐患。但已有相关研究未能覆盖黄土高原不同降水和植被类型区,对林地土壤湿度观测深度不足(通常不超过 5m),未能反映人工林地深层土壤水分利用特征,所得结论只是对林地土壤干燥化现象的初步定性描述,缺乏对不同类型人工林地土壤干燥化强度和区域分布特征的定量评价。本研究通过对不同降水类型区人工林地深层土壤湿度观测和分析,试图揭示和评价黄土高原主要类型人工林地深层土壤干燥化特征及其区域分布规律,为黄土高原人工林地水分可持续利用和人工植被重建提供科学依据。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域概况

按照黄土高原气候和自然植被地带地域分异规律,本研究选择了黄土高原南部半湿润森林区的长武、子午岭和洛川、中部半干旱森林草原区的定西、固原和安塞、北部半干旱偏旱典型草原区的海原等 7 个代表点实地观测和评价人工林地土壤干燥化效应。在南部半湿润森林区 3 个观测点,年均气温  $9.0 \sim 9.2^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $2998 \sim 3026.0^{\circ}\text{C}$ , 年降水量  $576.4 \sim 620.0\text{ mm}$ , 年蒸发量  $1481.6 \sim 1637.5\text{ mm}$ , 土壤为黑垆土,田间持水量和凋萎湿度分别为 22% 和 9%。在中部半干旱森林草原区 3 个观测点,年均气温  $6.1 \sim 8.8^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $2239.1 \sim 3177.4^{\circ}\text{C}$ , 年降水量  $425.1 \sim 505.3\text{ mm}$ , 年蒸发量  $1489.1 \sim 1772.5\text{ mm}$ , 土壤为黄绵土,田间持水量和凋萎湿度分别为 19% 和 5%。在北部半干旱偏旱典型草原区海原,年均气温  $7.3^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温  $2392.3^{\circ}\text{C}$ , 年降水量  $386.1\text{ mm}$ , 年蒸发量  $2157.4\text{ mm}$ , 土壤为黄绵土,田间持水量和凋萎湿度分别为 17% 和 4.5%。黑垆土和黄绵土的土壤容重均为  $1.30\text{ g/cm}^3$ 。

### 1.2 林地土壤湿度测定方法

于 2004 ~ 2005 年相继在长武、子午岭、洛川、定西、固原、安塞、海原等实验站分别选择具有代表性的人工乔木和灌木林地进行深层土壤水分测定。土壤含水量测定采用土钻取样、烘干法测定,测定取土最大深度 1000 cm,每 20 cm 取样一次,在  $105^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重,分别称量湿土重、干土重和铝盒重,最后计算各层土壤重量含水量。具体测定时间与林地选择(表 1)情况如下:

(1)南部半湿润高原沟壑森林区 于 2004 年 5 月上旬和 2005 年 8 月中旬,在地处黄土高原南部长武塬和洛川塬分别测定了塬地、阴坡和阳坡等不同立地类型的 20 年生和 30 年生刺槐林地、5 年生、9 年生和 15 年生旱塬苹果园地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度。2004 年 6 月,在陕西富县任家台林场测定了 15 年生人工油松林地、70 年生天然辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林地和 30 年生天然狼牙刺(*Sophora viciifolia*)林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度。在 2005 年 8 月,在甘肃省合水县连家砭林场选择和测定了 20 年生人工油松林地、60 年生天然辽东栎林地、8 年生天然狼牙刺林地和 20 年生天然沙棘林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度。

(2)中部半干旱丘陵沟壑森林草原区 在地处黄土高原中部丘陵区的甘肃农业科学院定西旱作农业试验站、中国科学院水利部水土保持研究所宁夏固原(上黄)农业生态试验站和陕西安塞水土保持试验站,于 2005 年 8 月选择和测定了 4 年生和 12 年生沙棘林地,阳坡 4 年生、梯田 5 年生、阳坡和阴坡 21 年生、东坡 25 年生柠条林地,东坡 25 年生刺槐林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度。

(3)北部半干旱偏旱丘陵典型草原区 在地处黄土高原北部缓坡丘陵区的西北农林科技大学宁夏海原(贾塘)旱作农业试验站,于 2005 年 8 月下旬测定了 25 年生柠条林地和荒草地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度。

尽管本研究对各类林地土壤湿度测定时间不同,也只有一次观测结果,但所得观测值是各类林地深层土壤干燥化效应多年累积结果的反映,降水渗深以下深层土壤湿度通常不随降水发生季节和年度变化,而林地浅层降水渗深以内土层土壤湿度的季节和年度变化特征,不足以反映深层土壤水分亏缺状况和人工林生长衰败原因。本研究的核心是比较和评价不同降水类型区、不同立地类型和不同生长年限林地深层土壤干燥化效应的差别,并非讨论林地土壤水分的季节和年度变化动态。因而,本研究的测定方法足以满足研究目的的需要,是可行的和可靠的。

### 1.3 土壤干燥化强度评价方法

在黄土高原半湿润和半干旱区,通常利用土壤稳定湿度值作为判别林地土壤干燥化的上限指标<sup>[7-9]</sup>。土

壤稳定湿度与田间持水量之间的水分亏缺现象,不属于土壤干燥化的范围。由于干旱地区的土壤湿度随年度和季节降水不断发生变化,在短期内深层土壤稳定湿度值不易直接测量和准确界定。在本研究中,土壤稳定湿度值的计算采用土壤凋萎湿度与田间持水量的算术平均值,取值范围介于 10%~16%之间,约为田间持水量的 50%~70%<sup>[22]</sup>。该值反映了某一种土壤对水分保持能力的中间状态,不随降水量的年度和季节变化而发生变化,便于在不同降水年型、不同季节和不同降水类型区之间比较林地土壤干燥化强度。南部半湿润森林区、中部半干旱森林草原区和北部半干旱偏旱典型草原区土壤稳定湿度值分别为 15.50%、12.00% 和 10.75%,与各类型区旱作农田正常生产条件下土壤湿度值的平均状态相一致。

为了便于定量描述土壤干燥化强度、比较人工林地土壤干层的剖面分布特征和区域分布规律,特此定义了一个定量描述林地土壤干燥化强度的概念——土壤干燥化指数  $SDI$ (soil desiccation index)<sup>[22]</sup>,定义为某一土层实际土壤有效含水量占该层土壤稳定有效含水量比值的百分数,其含义为某一土层可供植物吸收利用的土壤实际有效含水量占该层土壤正常有效含水量的比重,公式表达为:

$$SDI = \frac{SM - WM}{SSM - WM} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $SDI$  为土壤干燥化指数, $SM$  为土壤湿度, $WM$  为凋萎湿度, $SSM$  为土壤稳定湿度。土壤湿度、凋萎湿度和土壤稳定湿度用重量含水量百分数或者某一土层的水分毫米数表示。土壤干燥化指数  $SDI$  值越小,表明土壤干燥化强度越高,可供植物吸收利用的土壤有效含水量也越少。

依据土壤干燥化指数  $SDI$  值的大小,土壤干燥化强度可划分为 6 级:(1)若  $SDI \geq 100\%$ ,为无干燥化;(2)若  $75\% \leq SDI < 100\%$ ,为轻度干燥化;(3)若  $50\% \leq SDI < 75\%$ ,为中度干燥化;(4)若  $25\% \leq SDI < 50\%$ ,为严重干燥化;(5)若  $0 \leq SDI < 25\%$ ,为强烈干燥化;(6)若  $SDI < 0$ ,为极度干燥化<sup>[22]</sup>。其中,无干燥化和极度干燥化是林地土壤干燥化的 2 种极端状态,其余 4 级(轻度干燥化、中度干燥化、严重干燥化和强烈干燥化)是按照土壤干燥化指数每降低 25%,土壤干旱胁迫程度明显上升、林分生长明显滞缓为依据而划分的。如  $SDI < 50\%$  和  $SDI < 25\%$  分别表示林地土壤实际有效含水量尚达不到正常有效含水量的 50% 和 25%,表明林地土壤干燥化程度已经十分严重和十分强烈。这样划分为 6 个级别,有利于量化描述和区分不同降水地区、不同林地类型和不同生长年限林地的土壤干燥化程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 林地 0~1000 cm 土层土壤含水量

#### 2.1.1 南部半湿润森林区

在黄土高原南部半湿润森林区,苹果、刺槐和油松等 9 类人工林地,辽东栎、狼牙刺和沙棘等 5 类天然林地 0~1000 cm 土层土壤湿度平均值介于 9.75%~16.92%(表 1),平均值 12.70%,阳坡林地土壤湿度低于阴坡,人工林地和天然林地土壤湿度较为接近,土壤贮水量(由林地土壤湿度平均值与土壤容重和土层厚度相乘)1267.0~2200 mm,平均值 1652.0 mm,土壤有效贮水量(林地贮水量与凋萎湿度时贮水量的差值)97.0~1030.0 mm,平均值 481.7 mm。各类型人工林地和天然林地土壤湿度值均低于荒草地土壤湿度 18.15%,除塬地 5 年生和 9 年生苹果园地外,其它所有人工林地和天然林地土壤湿度均低于土壤稳定湿度值 15.5%,占土壤稳定湿度值的 62.9%~92.0%,均发生了程度不同的土壤干燥化现象,林地土壤水分过耗量(林地土壤贮水量与土壤稳定含水量时的土壤贮水量之差)为 156.2~748.0 mm,平均值为 443.0 mm,年均土壤干燥化速度(土壤水分过耗量除以生长年限)为 3.3~93.5 mm,平均值为 24.3 mm/a,即半湿润森林区各类林地每年多消耗土壤水分约 24 mm。

随苹果树龄增长,旱塬地 5 年生、9 年生和 15 年生苹果园地呈现土壤湿度逐渐降低和土壤干燥化加剧趋势,15 年生苹果园地土壤水分过耗量为 404.0 mm,年均土壤干燥化速度为 26.9 mm。在旱塬 23 年生、阴坡沟头 30 年生、阴坡沟口 20 年生和阳坡 20 年生等 4 类刺槐林地中,阴坡地土壤湿度和土壤含水量最高,旱塬地次之,阳坡地最低,土壤水分过耗量平均值 363.9 mm,年均土壤干燥化速度平均值为 17.0 mm/a。

表 1 黄土高原各类人工林地、天然林地和荒草地 0~1000 cm 土层土壤含水量比较

Table 1 comparison of soil water amount in 0—1000 cm soil layers on different artificial forestlands, natural forestlands and natural grassland of the Loess Plateau

| 气候和植被地带<br>Climate &<br>vegetation zone              | 林地类型<br>Forestland type                                                       | 土壤湿度<br>Soil moisture<br>(%) | 土壤贮<br>水量<br>Soil water storage<br>(mm) | 土壤有效<br>贮水量<br>Available soil<br>water storage<br>(mm) | 土壤水分<br>过耗量<br>Amount of soil<br>water overuse<br>(mm) | 平均土壤<br>干燥化速度<br>Average speed of<br>soil desiccation<br>(mm/a) |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 南部半湿润森林区<br>South semi-humid<br>forest zone          | 5 年生苹果园<br>5 yrs apple orchard                                                | 16.92                        | 2200.0                                  | 1030.0                                                 | -185.0                                                 | 0                                                               |
|                                                      | 9 年生苹果园<br>9 yrs apple orchard                                                | 15.88                        | 2064.0                                  | 894.6                                                  | -49.0                                                  | 0                                                               |
|                                                      | 15 年生苹果园<br>15 yrs apple orchard                                              | 12.39                        | 1611.0                                  | 441.0                                                  | 404.0                                                  | 26.9                                                            |
|                                                      | 塬地 23 年生刺槐林地<br>23 yrs black locust tree<br>land, highland                    | 12.84                        | 1669.1                                  | 499.1                                                  | 345.9                                                  | 15.0                                                            |
|                                                      | 阴坡 30 年生刺槐林地<br>30 yrs black locust tree land,<br>north slope                 | 14.26                        | 1858.8                                  | 683.8                                                  | 156.2                                                  | 5.2                                                             |
|                                                      | 阴坡 20 年生刺槐林地<br>20 yrs black locust tree land,<br>north slope                 | 13.35                        | 1735.3                                  | 565.3                                                  | 279.7                                                  | 14.0                                                            |
|                                                      | 阳坡 20 年生刺槐林地<br>20 yrs black locust tree land,<br>south slope                 | 10.32                        | 1341.4                                  | 171.4                                                  | 673.6                                                  | 33.7                                                            |
|                                                      | 阳坡 15 年生油松林地<br>15 yrs Chinese pine tree land,<br>south slope                 | 10.34                        | 1343.7                                  | 173.7                                                  | 671.3                                                  | 44.8                                                            |
|                                                      | 阴坡 20 年生油松林地<br>20 yrs Chinese pine tree land,<br>north slope                 | 12.45                        | 1619.0                                  | 449.0                                                  | 396.0                                                  | 19.8                                                            |
|                                                      | 60 年生辽东栎林地<br>60 yrs manchurian oak tree land                                 | 13.98                        | 1817.7                                  | 647.7                                                  | 197.3                                                  | 3.3                                                             |
|                                                      | 70 年生辽东栎林地<br>70 yrs manchurian oak tree land                                 | 10.28                        | 1337.0                                  | 167.0                                                  | 678.0                                                  | 9.7                                                             |
|                                                      | 阳坡 8 年生狼牙刺林地<br>8 yrs David's mountain laurel shrub<br>land, south slope      | 9.75                         | 1267.0                                  | 97.0                                                   | 748.0                                                  | 93.5                                                            |
|                                                      | 阳坡 30 年生狼牙刺林地<br>30 yrs David's mountain<br>laurel shrub land,<br>south slope | 10.85                        | 1410.1                                  | 240.1                                                  | 604.9                                                  | 20.2                                                            |
|                                                      | 20 年生沙棘林地<br>20 yrs seabuckthorn shrub land                                   | 14.20                        | 1853.7                                  | 683.7                                                  | 161.3                                                  | 5.4                                                             |
|                                                      | 各类林地平均<br>Average of forestlands                                              | 12.70                        | 1652.0                                  | 481.7                                                  | 443.0                                                  | 24.3                                                            |
|                                                      | 荒草地<br>natural grassland                                                      | 18.15                        | 2359.7                                  | 1189.7                                                 | -344.7                                                 | -                                                               |
|                                                      | 凋萎湿度<br>Wilting moisture                                                      | 9.00                         | 1170.0                                  | 0.0                                                    | -                                                      | -                                                               |
|                                                      | 土壤稳定湿度<br>Soil stable moisture                                                | 15.50                        | 2015.0                                  | 845.0                                                  | -                                                      | -                                                               |
| 中部半干旱森林草原区<br>Middle semi-arid<br>forest-steppe zone | 塬顶 4 年生沙棘林地<br>4 yrs seabuckthorn<br>shrub land, upland                       | 14.14                        | 1837.7                                  | 1187.7                                                 | -277.7                                                 | 0                                                               |
|                                                      | 东坡 12 年生沙棘林地<br>12 years seabuckthorn shrub land,<br>east slope               | 7.19                         | 934.2                                   | 284.2                                                  | 625.8                                                  | 52.2                                                            |

续表

| 气候和植被地带<br>Climate &<br>vegetation zone                                     | 林地类型<br>Forestland type                                           | 土壤湿度<br>Soil moisture<br>(%) | 土壤贮<br>水量<br>Soil water<br>storage<br>(mm) | 土壤有效<br>贮水量<br>Available soil<br>water storage<br>(mm) | 土壤水分<br>过耗量<br>Amount of soil<br>water overuse<br>(mm) | 平均土壤<br>干燥化速度<br>Average speed of<br>soil desiccation<br>(mm/a) |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
|                                                                             | 阳坡 4 年生柠条林地<br>4 years littleleaf peashrub land,<br>south slope   | 6.85                         | 890.6                                      | 240.6                                                  | 669.4                                                  | 167.4                                                           |
|                                                                             | 梯田 5 年生柠条林地<br>5 years littleleaf peashrub land,<br>terraced land | 8.84                         | 1149.1                                     | 499.1                                                  | 410.9                                                  | 82.2                                                            |
|                                                                             | 阳坡 21 年生柠条林地<br>21 years littleleaf peashrub land,<br>south slope | 7.36                         | 956.2                                      | 306.2                                                  | 603.8                                                  | 28.8                                                            |
|                                                                             | 阴坡 21 年生柠条林地<br>21 years littleleaf peashrub land,<br>north slope | 8.03                         | 1043.0                                     | 393.4                                                  | 516.6                                                  | 24.6                                                            |
|                                                                             | 东坡 25 年生柠条林地<br>25 years littleleaf peashrub land,<br>east slope  | 6.50                         | 845.6                                      | 195.6                                                  | 714.4                                                  | 28.6                                                            |
|                                                                             | 东坡 20 年生刺槐林地<br>20 years black locust tree land,<br>east slope    | 6.17                         | 801.5                                      | 151.5                                                  | 758.5                                                  | 37.9                                                            |
|                                                                             | 各类林地平均<br>Average of forestlands                                  | 8.14                         | 1057.2                                     | 407.3                                                  | 614.2                                                  | 60.2                                                            |
|                                                                             | 荒草地<br>Natural grassland                                          | 11.45                        | 1488.3                                     | 838.3                                                  | 71.7                                                   | —                                                               |
|                                                                             | 凋萎湿度<br>Wilting moisture                                          | 5.0                          | 650.0                                      | 0                                                      | —                                                      | —                                                               |
|                                                                             | 土壤稳定湿度<br>Soil stable moisture                                    | 12.0                         | 1560.0                                     | 910.0                                                  | —                                                      | —                                                               |
| 北部半干旱偏旱<br>典型草原区<br>North semi-arid prone<br>drought typical<br>steppe zone | 25 年生柠条林地<br>25 yrs littleleaf peashrub land                      | 6.46                         | 840.2                                      | 255.2                                                  | 557.3                                                  | 22.3                                                            |
|                                                                             | 荒草地<br>natural grassland                                          | 9.58                         | 1245.1                                     | 660.1                                                  | 152.4                                                  | —                                                               |
|                                                                             | 凋萎湿度<br>Wilting moisture                                          | 4.50                         | 585.0                                      | 0.0                                                    | —                                                      | —                                                               |
|                                                                             | 土壤稳定湿度<br>Soil stable moisture                                    | 10.75                        | 1397.5                                     | 812.5                                                  | —                                                      | —                                                               |

在子午岭林区,阳坡 15 年生油松林地土壤湿度低于阴坡 20 年生,土壤水分过耗量平均值 533.7 mm,土壤干燥化速度平均 32.3 mm/a。60 年生和 70 年生天然辽东栎林地、阳坡 8 年生和 30 年生天然狼牙刺林地、20 年生天然沙棘林地土壤湿度均低于土壤稳定湿度值,表明天然乔木和灌木林地也存在土壤干燥化现象,天然乔木林和灌木林低土壤水分过耗量平均值分别为 437.7 mm 和 504.7 mm,土壤干燥化速度平均值分别为 6.5 mm/a 和 39.7 mm/a,位于阳坡的天然狼牙刺林地土壤干燥化速度和强度明显高于沙棘林地,也高于天然辽东栎林地。

### 2.1.2 中部半干旱森林草原区

在中部半干旱森林草原区,沙棘、柠条和刺槐等 8 类人工林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度平均值介于 6.17% ~ 14.14% (表 1),平均值 8.14%,土壤贮水量为 801.5 ~ 1837.7 mm,平均值 1057.2 mm,土壤有效贮水量 151.5 ~ 1187.7 mm,平均值 407.3 mm。除塬顶 4 年生沙棘林地外,其它所有人工林地土壤湿度均低于荒草地土壤湿度 11.45% 和土壤稳定湿度值 12.00%,只占当地土壤稳定湿度值的 51.4% ~ 73.7%,土壤干燥化程度均十分严重,林地土壤水分过耗量为 410.9 ~ 758.5 mm,平均值为 614.2 mm,年均土壤干燥化速度为

24.6 ~ 167.4 mm, 平均值为 60.2 mm/a, 即半干旱森林草原区各类林地每年多消耗土壤水分约 60 mm。就林地土壤水分消耗量而言, 刺槐林地高于沙棘和柠条灌木林地, 阳坡柠条林地高于阴坡柠条林地, 长龄灌木林地高于短龄灌木林地。

### 2.1.3 北部半干旱偏旱典型草原区

在半干旱偏旱典型草原区, 25 年生柠条林地和天然荒草地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度平均值分别为 6.46% 和 9.58%, 分别为土壤稳定湿度值的 60.1% 和 89.1% (表 1)。其土壤贮水量、土壤有效贮水量分别为 840.2 mm 和 1245.1 mm, 土壤水分过耗量分别为 557.3 mm 和 152.4 mm, 25 年生柠条林地年均土壤干燥化速度为 22.3 mm。

### 2.1.4 不同类型区林地土壤含水量比较

将 3 个类型区各类林地 0 ~ 10m 土壤湿度平均值进行比较, 可以反映 3 个植被类型区之间林地土壤贮水量和土壤水分过耗量差异 (表 1)。南部半湿润森林区、中部半干旱森林草原区和北部半干旱偏旱典型草原区各类林地土壤湿度平均值依次为 12.70%、8.14% 和 6.46%, 林地土壤贮水量平均值依次为 1652.0、1057.2 mm 和 840.2 mm, 林地土壤有效贮水量平均值依次为 481.7、407.3 mm 和 255.3 mm, 呈现出随降水量趋势性减少林地土壤湿度和土壤有效贮水量明显下降趋势, 干燥化林地土壤水分过耗量分别为 443.0、614.2 mm 和 557.3 mm, 林地土壤干燥化速度分别为 24.3、60.2 mm/a 和 22.3 mm/a, 人工林地土壤水分过耗量和耗水速度以半干旱森林草原区最严重, 其次为半干旱偏旱典型草原区。

### 2.1.5 不同类型林地土壤含水量比较

将各类型区同类林地 0 ~ 10 m 土壤湿度平均值进行比较, 可以粗略反映 7 种林地深层土壤贮水量和土壤水分过耗量差异 (表 2)。苹果园地土壤湿度和土壤含水量最高, 刺槐、油松、辽东栎和沙棘林地较为接近且居中, 狼牙刺林地次低, 柠条林地最低。狼牙刺林地土壤有效贮水量最低, 平均不足 200 mm, 其次为油松和柠条林地, 刚过 300 mm, 再次为刺槐和辽东栎林地, 刚过 400 mm, 苹果园地和沙棘林地最高, 均超过 700 mm。林地土壤水分过耗量以狼牙刺林地最高, 超过 600 mm, 柠条和油松林地次之, 均超过 500 mm, 刺槐和辽东栎林地再次, 均超过 400 mm, 苹果园地和沙棘林地最少, 不足 200 mm。林地年均土壤干燥化速度以柠条和狼牙刺林地最高, 均超过 50 mm/a, 其次为油松林地, 超过 30 mm/a, 再次为刺槐和沙棘林地, 约为 20 mm/a, 苹果园地和辽东栎林地最低, 不足 10 mm/a。

表 2 各类林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤含水量比较

Table 2 Comparison of soil water amount in 0 — 1000 cm soil layers on different forestlands of the Loess Plateau

| 林地类型<br>Forestlands                         | 土壤湿度<br>Soil moisture<br>(%) | 土壤贮水量<br>Soil water storage<br>(mm) | 土壤有效贮水量<br>Available soil<br>water storage<br>(mm) | 土壤水分过耗量<br>Amount of soil<br>water overuse<br>(mm) | 平均土壤<br>干燥化速度<br>Average speed of<br>soil desiccation (mm/a) |
|---------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 苹果园地<br>Apple orchard                       | 15.06                        | 1958.3                              | 788.5                                              | 56.7                                               | 9.0                                                          |
| 刺槐林地<br>Black locust tree land              | 11.39                        | 1481.2                              | 414.2                                              | 442.8                                              | 21.2                                                         |
| 油松林地<br>Chinese pine tree land              | 11.40                        | 1481.4                              | 311.4                                              | 533.7                                              | 32.3                                                         |
| 辽东栎林地<br>Manchurian oak tree land           | 12.13                        | 1577.4                              | 407.4                                              | 437.7                                              | 6.5                                                          |
| 狼牙刺林地<br>David's mountain laurel shrub land | 10.30                        | 1338.6                              | 168.6                                              | 676.5                                              | 56.9                                                         |
| 沙棘林地<br>Seabuckthorn shrub land             | 11.84                        | 1541.9                              | 718.5                                              | 169.8                                              | 19.2                                                         |
| 柠条林地<br>Littleleaf peashrub land            | 7.34                         | 954.1                               | 315.0                                              | 578.7                                              | 59.0                                                         |

## 2.2 林地土壤湿度剖面分布特征

### 2.2.1 南部半湿润森林区

在南部旱塬地,5年生苹果园地与荒草地土壤湿度剖面分布比较接近(图1),其土壤干层分布于0~260cm土层,9年生苹果园地为120~380cm土层,而15年生苹果园地160cm以下均为土壤干层。随着苹果生长年限不断延长,根系分布深度和吸水强度增加,果园深层土壤湿度趋于降低,土壤干层趋于加深和加厚,15年生以后苹果园地土壤湿度剖面分布基本稳定<sup>[10]</sup>。若按照土壤湿度值低于17%的标准推断,5年生、9年生和15年生苹果园地耗水层分布最大深度分别为360、640cm和1000cm以上。

在旱塬沟壑区,坡向和地形等立地条件是影响刺槐林地土壤湿度状况的主要因素(图2)。位于沟壑阳坡的刺槐林地整个剖面土壤湿度均低于土壤稳定湿度值,更远低于荒草地土壤湿度,有较厚土层土壤湿度低于土壤凋萎湿度值。旱塬地刺槐林地60~760cm土层土壤湿度均低于土壤稳定湿度值15.5%。位于沟头阴坡的30年生刺槐林地180cm以下、位于沟口阴坡的20年生刺槐林地240cm以下均低于土壤稳定湿度值,且二者土壤湿度值比较接近,说明二者耗水强度相当,但30年生刺槐林地0~180cm土层明显高于20年生,表明沟头狭窄地形较沟口开阔地形有利于保持林地上层土壤水分。

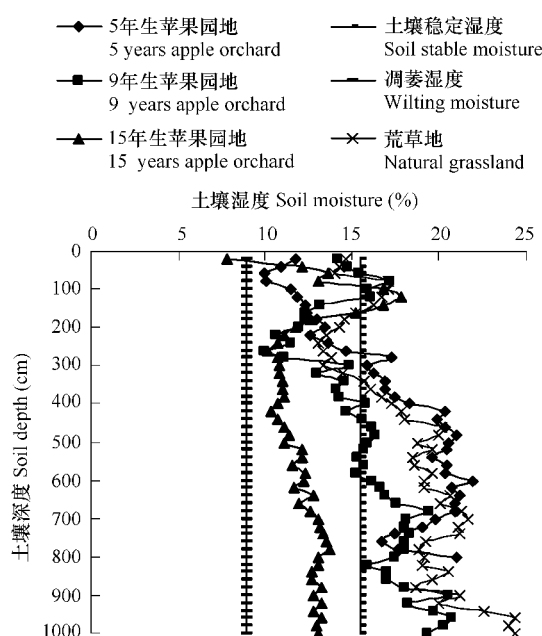


图1 黄土高原南部旱塬不同生长年限苹果园地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 1 Comparison of soil moisture distributions of different growth age apple tree lands on south highland of the Loess Plateau

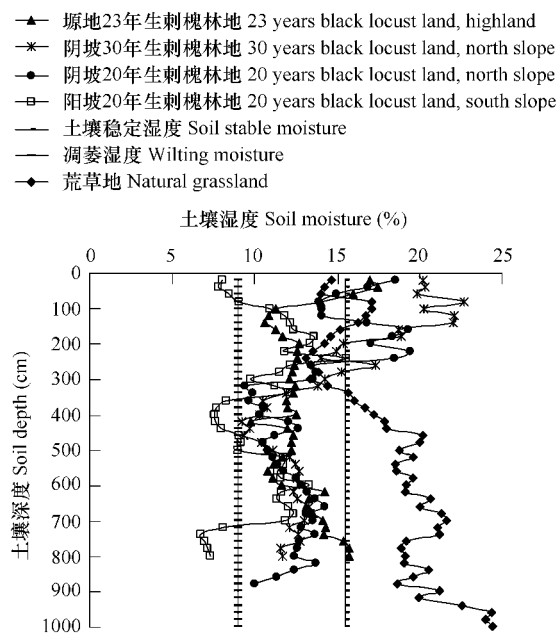


图2 黄土高原南部旱塬沟壑区不同坡向刺槐林地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 2 Comparison of soil moisture distributions of black locust tree lands at different facing slopes on south highland & gully area of the Loess Plateau

在子午岭林区乔木林地(图3),阳坡15年生油松林地有厚达5m土层土壤湿度低于10%,有厚达220cm的强烈耗水土层土壤湿度低于8%,阴坡20年生油松林地也有厚达340cm土层土壤湿度小于12%。在阴坡天然辽东栎林地,60年生120cm以下土层和70年生全部剖面土层均低于土壤稳定湿度值,70年生辽东栎林地有厚达860cm土层土壤湿度低于12%,有厚达440cm的强烈耗水土层土壤湿度低于10%,表明天然辽东栎林地土壤干燥化程度也较严重。

在子午岭林区天然灌木林地(图4),生长较为茂密的阳坡8年生和生长较为稀疏的阳坡30年生天然狼牙刺灌木林地分别有厚达720cm和480cm的强烈耗水土层土壤湿度低于10%,接近或者低于土壤凋萎湿度值。20年生天然沙棘林地剖面大部分土层土壤湿度均低于土壤稳定湿度值。

- 土壤稳定湿度 Soil stable moisture
- 凋萎湿度 Wilting moisture
- ◆ 阳坡15年生油松林 15 years Chinese pine tree land, south slope
- 阴坡20年生油松林 15 years Chinese pine tree land, north slope
- ▲ 60年生辽东栎林地 60 years manchurian oak tree land
- × 70年生辽东栎林地 70 years manchurian oak tree land
- 荒草地 Natural grassland

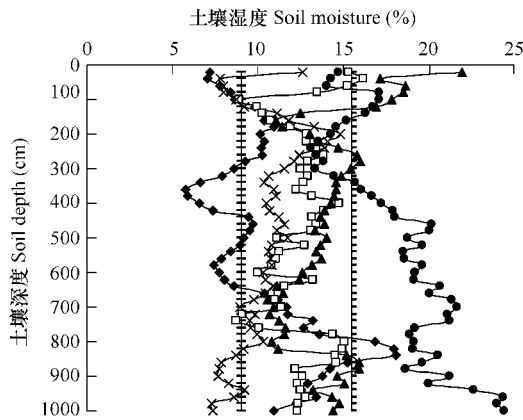


图3 黄土高原子午岭林区不同类型乔木林地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig.3 Comparison of soil moisture distributions of different tree lands on Ziuling forest area of the Loess Plateau

- 土壤稳定湿度 Soil stable moisture
- 凋萎湿度 Wilting moisture
- ★ 阳坡8年生狼牙刺林地 8 year David's mountain laurel shrub land, south slope
- 阳坡30年生狼牙刺林地 30 year David's mountain laurel shrub land, south slope
- 20年生沙棘林地 20yrs seabuckthorn shrub land
- ◆ 荒草地 Natural grassland

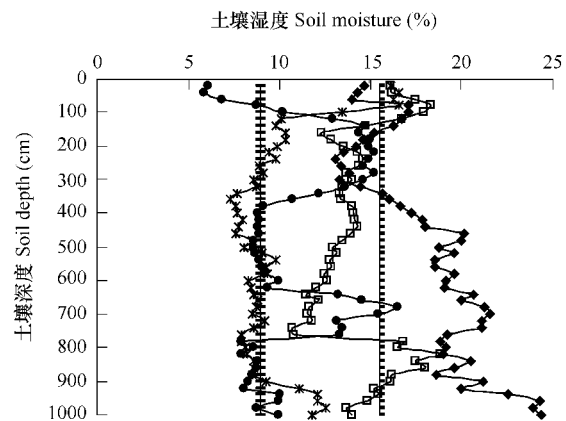


图4 黄土高原子午岭林区不同类型天然灌木林地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig.4 Comparison of soil moisture distributions of different natural shrub lands on Ziuling forest area of the Loess Plateau

### 2.2.2 中部半干旱森林草原区

在中部半干旱区沙棘林地,塬顶4年生沙棘林地土壤湿度剖面分布与荒草地较为接近,说明二者的耗水强度和深度类似(图5),主要耗水土层厚度达300cm左右,在520cm以下土层土壤湿度达到田间持水量。12年生沙棘林地0~840cm土层土壤湿度低于10%,有700cm土层土壤湿度低于8%,有厚达420cm土层土壤湿度低于7%。4年生和12年生沙棘林地最大耗水深度已分别达到500cm和超过880cm。荒草地土壤干层分布深度达到380cm。

在半干旱区柠条林地(图6),阳坡水平阶地4年生柠条林地0~800cm土层土壤湿度均低于8%,阳坡21年生和东坡25a柠条林地土壤湿度相似,其最大耗水深度超过800~1000cm。梯田5年生柠条林地有220cm土层低于土壤凋萎湿度值5%,有厚达480cm土层土壤湿度低于8%,其最大耗水深度已达760cm。阳坡和阴坡21年生柠条林地土壤湿度剖面分布也有差异,在400~800cm土层阴坡明显低于阳坡,土壤干层最大分布深度阳坡柠条林地超过了1000cm,而阴坡则为980cm。

12年生沙棘、25年生柠条和20年生刺槐林地深层土壤湿度分布较为接近(图7),沙棘林地和柠条林地在0~720cm土层土壤湿度分布相似,刺槐林地有厚达240cm土层土壤湿度低于土壤凋萎湿度值,其耗水强度高于柠条和沙棘灌木林地。柠条林地和刺槐林地土壤干层最大分布深度均超过了1000cm。

### 2.2.3 北部半干旱偏旱典型草原区

在半干旱偏旱典型草原区,25年生柠条林地土壤湿度明显低于荒草地(图8),有厚达280cm土层土壤湿度低于土壤凋萎湿度值,天然荒草地在0~580cm土层也形成了明显和深厚的土壤干层。

## 2.3 人工林地土壤干燥化强度

### 2.3.1 南部半湿润森林区

5年生、9年生苹果园地0~800cm土层和15年生苹果园地0~1000cm土层平均土壤干燥化指数分别为122%、106%和52%,分别为无干燥化、无干燥化和中度干燥化强度(表3)。在5年生苹果园地,由于树体

- ◆ 塬顶4年生沙棘林地 4years seabuckthorn shrub land, upland
- 东坡12年生沙棘林地 12 years seabuckthorn shrub land, east slope
- 荒草地 Natural grassland
- 土壤稳定湿度 Soil stable moisture
- 凋萎湿度 Wilting moisture

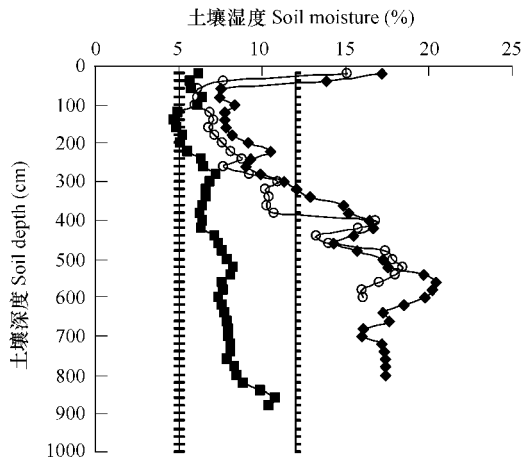


图5 黄土高原半干旱森林草原区沙棘林地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 5 Comparison of soil moisture distributions of seabuckthorn shrub lands on semi-arid forest-steppe zone of the Loess Plateau

- ▲ 阳坡4年生柠条林地 4 years littleleaf peashrub land, south slope
- 梯田5年生柠条林地 5 years littleleaf peashrub land, terraced land
- ✱ 阳坡21年生柠条林地 21 years littleleaf peashrub land, south slope
- ⊕ 东坡25年生柠条林地 25 years littleleaf peashrub land, east slope
- 荒草地 Natural grassland
- 土壤稳定湿度 Soil stable moisture
- 凋萎湿度 Wilting moisture

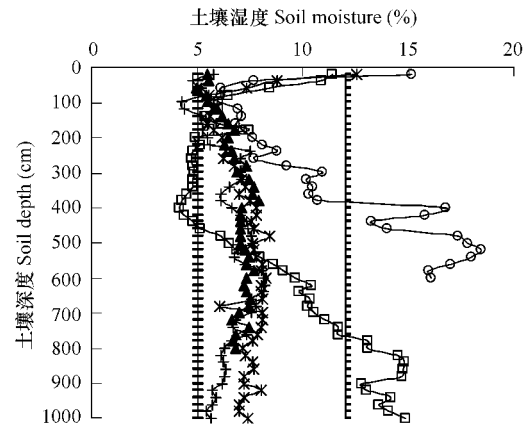


图6 黄土高原半干旱森林草原区柠条林地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 6 Comparison of soil moisture distributions of littleleaf peashrub lands on semi-arid forest-steppe zone of the Loess Plateau

- 东坡12年生沙棘林地 12 years seabuckthorn shrub land, east slope
- ◆ 东坡25年生柠条林地 25 years littleleaf peashrub land, east slope
- ▲ 东坡20年生刺槐林地 20 years black locust tree land, east slope
- 荒草地 Natural grassland
- 土壤稳定湿度 Soil stable moisture
- 凋萎湿度 Wilting moisture

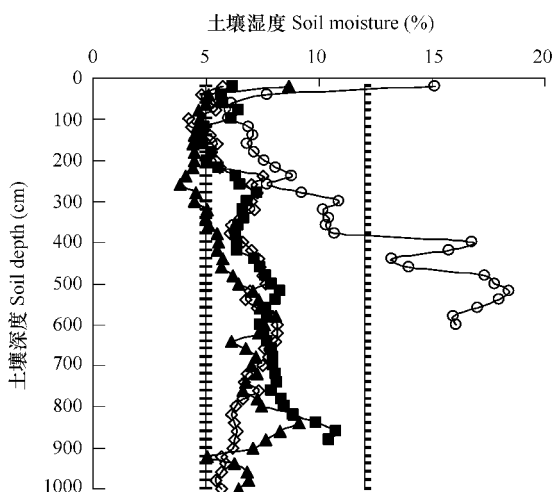


图7 黄土高原半干旱森林草原区不同类型林地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 7 Comparison of soil moisture distributions of different shrub and tree lands on semi-arid forest-steppe zone of the Loess Plateau

- ◆ 25年生柠条林地 25 years littleleaf peashrub land
- 荒草地 Natural grassland
- 土壤稳定湿度 Soil stable moisture
- 凋萎湿度 Wilting moisture

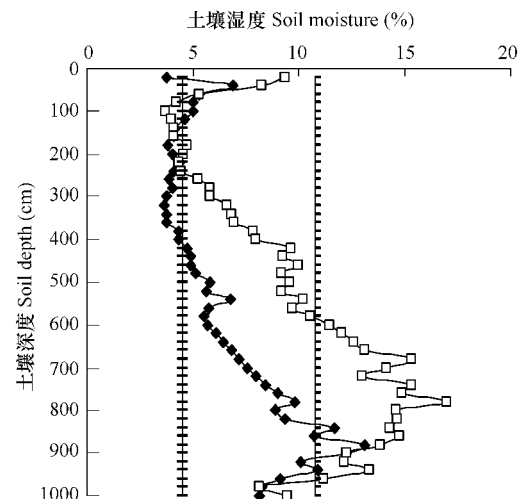


图8 黄土高原半干旱偏旱典型草原区柠条林地与荒草地土壤湿度剖面分布特征比较

Fig. 8 Comparison of soil moisture distributions of littleleaf peashrub land and natural grass land on semi-arid prone drought typical steppe zone of the Loess Plateau

较小、根系分布较浅、耗水量较少,土壤干燥化程度较轻,以严重干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 0 ~ 240 cm,260 cm 以下为无干燥化土层,土壤干层厚度为 260 cm。在 9 年生苹果园地,果树根系分布加深,耗水深度明显增加,以严重干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 120 ~ 320 cm,420 cm 以下为无干燥化土层,土壤干层厚度达到 360 cm。在 15 年生苹果园地,根系分布深度和耗水深度进一步增加,以严重和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 140 ~ 1040 cm,土壤干层最大分布深度达到 1180 cm,土壤干层厚度超过 940 cm。

表 3 黄土高原人工林地、天然林地和荒草地土壤干燥化强度及其剖面土壤干层厚度(cm)

Table 3 Soil desiccation intensity and thickness of desiccated soil layers on artificial forestlands, natural forestlands and natural grassland of the Loess Plateau

| 气候和植被地带<br>Climate &<br>vegetation zone      | 林地类型<br>Forestland type                                                         | 平均土壤<br>干燥化指数<br>Average<br>SDI(%) | 土壤干燥<br>化强度<br>Soil desiccation<br>Intensity | 极度<br>干燥层<br>Extreme<br>desiccated<br>soil layers | 强烈以上<br>干燥层<br>Strong<br>desiccated<br>soil layers | 严重以上<br>干燥层<br>Serious<br>desiccated<br>soil layers | 中度以上<br>干燥层<br>Medium<br>desiccated<br>soil layers | 土壤干层<br>Desiccated<br>soil layers |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 南部半湿润森林区<br>South semi-<br>humid forest zone | 5 年生苹果园地<br>5 years apple orchard                                               | 122                                | 无干燥化<br>Not desiccated                       | 0                                                 | 40                                                 | 120                                                 | 240                                                | 260                               |
|                                              | 9 年生苹果园地<br>9 years apple orchard                                               | 106                                | 无干燥化<br>Not desiccated                       | 40                                                | 60                                                 | 100                                                 | 140                                                | 360                               |
|                                              | 15 年生苹果园地<br>15 years apple orchard                                             | 52                                 | 中度干燥化<br>Medium desiccated                   | 20                                                | 40                                                 | 380                                                 | > 940                                              | > 940                             |
|                                              | 塬地 23 年生刺槐林<br>23 years black locust tree<br>land, highland                     | 59                                 | 中度干燥化<br>Medium desiccated                   | 0                                                 | 20                                                 | 380                                                 | 620                                                | 700                               |
|                                              | 阴坡 30 年生刺槐林地<br>30 years black locust tree<br>land, north slope                 | 81                                 | 轻度干燥化<br>Slight desiccated                   | 0                                                 | 140                                                | 200                                                 | > 480                                              | > 720                             |
|                                              | 阴坡 20 年生刺槐林地<br>20 years black locust tree<br>land, north slope                 | 67                                 | 中度干燥化<br>Medium desiccated                   | 0                                                 | 100                                                | 260                                                 | > 540                                              | > 700                             |
|                                              | 阳坡 20 年生刺槐林地<br>20 years black locust tree<br>land, south slope                 | 20                                 | 强烈干燥化<br>Strong desiccated                   | > 240                                             | > 300                                              | > 420                                               | > 520                                              | > 800                             |
|                                              | 阳坡 15 年生油松林<br>15 years Chinese pine tree<br>land, south slope                  | 21                                 | 强烈干燥化<br>Strong desiccated                   | 380                                               | 660                                                | > 740                                               | > 940                                              | > 940                             |
|                                              | 阴坡 20 年生油松林<br>20 years Chinese pine tree<br>land, north slope                  | 53                                 | 中度干燥化<br>Medium desiccated                   | 40                                                | 120                                                | 380                                                 | > 820                                              | > 960                             |
|                                              | 60 年生辽东栎林地<br>60 years manchurian<br>oak tree land                              | 77                                 | 中度干燥化<br>Medium desiccated                   | 0                                                 | 0                                                  | 240                                                 | 480                                                | > 880                             |
|                                              | 70 年生辽东栎林地<br>70 years manchurian<br>oak tree land                              | 20                                 | 强烈干燥化<br>Strong desiccated                   | > 240                                             | > 480                                              | > 600                                               | > 700                                              | > 1000                            |
|                                              | 阳坡 8 年生狼牙刺林地<br>8 years David's mountain<br>laurel shrub land,<br>south slope   | 11                                 | 强烈干燥化<br>Strong desiccated                   | 360                                               | 580                                                | > 580                                               | > 700                                              | > 920                             |
|                                              | 阳坡 30 年生狼牙刺林地<br>30 years David's mountain<br>laurel shrub land,<br>south slope | 28                                 | 严重干燥化<br>Serious desiccated                  | 400                                               | > 560                                              | > 620                                               | > 680                                              | > 1000                            |

续表

| 气候和植被地带<br>Climate &<br>vegetation zone                           | 林地类型<br>Forestland type                                     | 平均土壤<br>干燥化指数<br>Average<br>SDI(%) | 土壤干燥<br>化强度<br>Soil desiccation<br>Intensity | 极度<br>干燥层<br>Extreme<br>desiccated<br>soil layers | 强烈以上<br>干燥层<br>Strong<br>desiccated<br>soil layers | 严重以上<br>干燥层<br>Serious<br>desiccated<br>soil layers | 中度以上<br>干燥层<br>Medium<br>desiccated<br>soil layers | 土壤干层<br>Desiccated<br>soil layers |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 中部半干旱森林草原区<br>Middle semi-arid forest-steppe zone                 | 20 年生沙棘林地 20 years seabuckthorn shrub land                  | 81                                 | 轻度干燥化<br>Slight desiccated                   | 0                                                 | 0                                                  | 160                                                 | >360                                               | >740                              |
|                                                                   | 荒草地 Natural grassland                                       | 141                                | 无干燥化<br>Not desiccated                       | 0                                                 | 0                                                  | 0                                                   | 100                                                | 240                               |
|                                                                   | 塬顶 4 年生沙棘林地 4 years seabuckthorn shrub land, upland         | 131                                | 无干燥化<br>Not desiccated                       | 0                                                 | 0                                                  | 140                                                 | 240                                                | 260                               |
|                                                                   | 东坡 12 年生沙棘林地 12 years seabuckthorn shrub land, east slope   | 31                                 | 严重干燥化<br>Serious desiccated                  | 40                                                | 460                                                | 820                                                 | 880                                                | >880                              |
|                                                                   | 阳坡 4 年生柠条林地 4 years littleleaf peashrub land, south slope   | 26                                 | 严重干燥化<br>Serious desiccated                  | 0                                                 | 240                                                | >800                                                | >800                                               | >800                              |
|                                                                   | 梯田 5 年生柠条林地 5 years littleleaf peashrub land, terraced land | 55                                 | 中度干燥化<br>Medium desiccated                   | 260                                               | 440                                                | 500                                                 | 600                                                | 760                               |
|                                                                   | 阳坡 21 年生柠条林地 21 years littleleaf peashrub land, south slope | 34                                 | 严重干燥化<br>Serious desiccated                  | 0                                                 | 200                                                | >960                                                | >980                                               | >980                              |
|                                                                   | 阴坡 21 年生柠条林地 21 years littleleaf peashrub land, north slope | 43                                 | 严重干燥化<br>Serious desiccated                  | 0                                                 | 0                                                  | 780                                                 | 840                                                | 960                               |
|                                                                   | 东坡 25 年生柠条林地 25 years littleleaf peashrub land, east slope  | 21                                 | 强烈干燥化<br>Strong desiccated                   | 40                                                | >500                                               | >960                                                | >960                                               | >1000                             |
|                                                                   | 东坡 20 年生刺槐林地 20 years black locust tree land, east slope    | 17                                 | 强烈干燥化<br>Strong desiccated                   | 240                                               | >480                                               | >960                                                | >1000                                              | >1000                             |
| 北部半干旱偏旱典型草原区<br>North semi-arid prone drought typical steppe zone | 荒草地 Natural grassland                                       | 92                                 | 轻度干燥化<br>Slight desiccated                   | 0                                                 | 60                                                 | 240                                                 | 300                                                | 360                               |
|                                                                   | 25 年生柠条林地 25 years littleleaf peashrub land                 | 31                                 | 严重干燥化<br>Serious desiccated                  | 280                                               | 520                                                | 700                                                 | >760                                               | >880                              |
|                                                                   | 荒草地 natural grassland                                       | 81                                 | 轻度干燥化<br>Slight desiccated                   | 180                                               | 260                                                | 320                                                 | 380                                                | 560                               |

旱塬 23 年生刺槐林地、沟头阴坡 30 年生刺槐林地、沟口阴坡 20 年生刺槐林地和阳坡 20 年生刺槐林地 0 ~ 880cm 土层平均土壤干燥化指数分别为 59%、81%、67% 和 20% , 分别达到中度干燥化、轻度干燥化、中度干燥化和强烈干燥化强度。在旱塬 23 年生刺槐林地, 以严重和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 80 ~ 680 cm, 760 cm 以下为无干燥化土层, 土壤干层厚度达到 700 cm。在沟头阴坡 30 年生刺槐林地, 0 ~ 160 cm 土层为无干燥化土层, 以强烈和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 340 ~ 800cm, 土壤干层厚度超过 720 cm。在沟口阴坡 20 年生刺槐林地, 以严重和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 300 ~ 880 cm, 土壤干层厚度超过 700 cm。在阳坡 20 年生刺槐林地, 以极度和严重干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 0 ~ 800 cm, 土壤干层厚度超过 800 cm。除旱塬地外, 土壤湿度测定深度均未达到刺槐林地土壤干层分布最大深度。

在子午岭林区, 阳坡 15 年生油松林地、阴坡 20 年生油松林地、60 年生辽东栎林地和 70 年生辽东栎林地

0~1000 cm 土层土壤干燥化指数平均值分别为 21%、53%、77% 和 20%,分别达到强烈干燥化、中度干燥化、轻度干燥化和强烈干燥化强度。在阳坡 15 年生油松林地,以极度和强烈干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 0~780 cm,土壤干层厚度超过 940 cm。在阴坡 20 年生油松林地,以严重和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 80~760 cm,土壤干层厚度超过 960 cm。在 60 年生辽东栎林地,0~120 cm 为无干燥化土层,以严重和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层分布于 140~820 cm,土壤干层厚度超过 880 cm。在 70 年生辽东栎林地,以极度、强烈和严重干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 20~1000 cm,土壤干层厚度超过 1000 cm。

在子午岭林区,阳坡 8 年生和 30 年生狼牙刺灌木林地、20 年生沙棘灌木林地 0~1000 cm 土层土壤干燥化指数平均值分别为 11%、28% 和 81%,分别达到强烈干燥化、严重干燥化和轻度干燥化强度。在阳坡 8 年生狼牙刺林地,0~80 cm 土层为无干燥化土层,以极度和强烈干燥化强度为主体的主要耗水土层分布于 100~880 cm,土壤干层厚度超过 920 cm。在阳坡 30 年生狼牙刺林地,以极度和强烈干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 0~1000 cm,土壤干层厚度超过 1000 cm。在 20 年生天然沙棘林地,0~120 cm 和 760~900 cm 土层为无干燥化土层,以严重和中度干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 120~760 cm,土壤干层厚度超过 740 cm。南部旱塬荒草地剖面平均为无干燥化,其中 0~320 cm 土层以中度和轻度干燥化为主,土壤干层厚度为 240 cm。

### 2.3.2 中部半干旱森林草原区

在中部半干旱森林草原区,塬顶 4 年生沙棘林地剖面平均土壤干燥化指数为 131%,为无干燥化强度,严重和中度干燥化土层厚度达到 260 cm(表 3)。东坡 12 年生沙棘林地、阳坡 4 年生柠条林地、阳坡 21 年生柠条林地、阴坡 21 年生柠条林地剖面平均土壤干燥化指数分别为 31%、26%、34% 和 43%,均达到严重干燥化强度,其中东坡 12 年生沙棘林地有 40 cm 厚的极度干燥层,以强烈和严重干燥化强度为主的土壤干层厚度达到 880 cm,阳坡 4 年生柠条林地全部为强烈和严重干燥化土层,土壤干层总厚度达到 880 cm 以上,阳坡 21 年生柠条林地和阴坡 21 年生柠条林地分别以强烈和严重干燥化土层、严重和中度干燥化土层为主,土壤干层厚度分别达到 980 cm 以上和 960 cm。东坡 25 年生柠条林地和东坡 20 年生刺槐林地剖面平均土壤干燥化指数分别为 21% 和 17%,均达到强烈干燥化强度,以极度、强烈和严重干燥化强度为主的土壤干层厚度均超过 1000 cm。梯田 5 年生柠条林地土壤干燥化指数为 55%,为中度干燥化强度,以极度和强烈干燥化强度为主的土壤干层厚度达到 760 cm。天然荒草地土壤干燥化指数为 92%,为轻度干燥化强度,土壤干层厚度达到 360 cm。

### 2.3.3 北部半干旱偏旱典型草原区

海原 25 年生柠条林地和荒草地 0~1000 cm 土层剖面平均土壤干燥化系数分别为 31% 和 81%,分别属于严重干燥化和轻度干燥化(表 4)。在 25 年生柠条林地,以极度、强烈和严重干燥化强度为主体的主要耗水土层位于 120~800 cm,土壤干层厚度超过 880 cm。荒草地以极度和严重干燥化为主体的主要耗水层位于 20~580 cm,土壤干层厚度为 560 cm。

### 2.3.4 不同类型区和不同种类林地比较

3 个类型区比较,南部半湿润森林区、中部半干旱森林草原区和北部半干旱偏旱典型草原区各类林地平均土壤干燥化指数分别为 57%、45% 和 31%,分别达到中度干燥化、严重干燥化和严重干燥化强度,林地土壤干燥化强度依次加剧。在林地土壤湿度测定深度 0~1000 cm 范围内,23 类林地土壤干层厚度平均值为 802 cm,即各类林地土壤干层厚度达到或超过 800 cm,3 个类型区平均值依次为 780 cm、830 cm 和 880 cm,林地干层厚度随区域降水减少而呈现逐渐加厚趋势。

苹果、刺槐、油松、辽东栎、狼牙刺、沙棘和柠条等 7 类林地土壤干燥化指数平均值依次为 93%、49%、37%、49%、20%、81% 和 32%,苹果和沙棘林地为轻度干燥化强度,刺槐、油松、辽东栎和柠条林地均为严重干燥化强度,狼牙刺林地为强烈干燥化强度。在林地 0~1000 cm 测定深度范围内,7 类林地土壤干层厚度平

均值依次为 520、784、950、940、960、627 cm 和 911 cm, 苹果和沙棘土壤干层较薄, 刺槐林地次之, 油松、辽东栎、狼牙刺和柠条最厚, 均超过 900 cm。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 关于人工林生长耗水与林地土壤干燥化

黄土高原人工林地降水渗透以下深层土壤干层是树木连续生长过程中土壤水分过耗作用长期累积的结果。在林龄较小时, 人工林地树木生长耗水量小, 林地土壤水库供水充足, 树木生长耗水依靠深层土壤供水和降水补给两种水分来源供给。但随着林龄的增加, 在树木旺盛生长期, 林地耗水量持续增加, 根系耗水深度逐渐加深, 半湿润区大约在 7~10 龄(不同类型树种、立地条件和种植密度不同)以后, 半干旱区大约在 5~8 龄以后, 林地水分消耗量明显超过降水补给量, 林地 3m 以下深层土壤湿度明显降低, 土壤干层逐渐形成并不断加厚, 深层土壤水分供给量逐渐减少以至最终消失, 树木生长主要依靠上年雨季和当年降水供给, 水分供应不足导致树木生长速度明显减缓。由于每年雨季和湿润年份林地降水补给深度通常不超过 2~3m<sup>[8,9]</sup>, 只有降水渗透以内浅层(40~280 cm)土壤湿度随雨季降水补给和林木生长消耗而发生明显变化<sup>[18]</sup>, 但雨季降水补给量又很快被树木生长消耗, 难以实际入渗到林地 2~3m 以下的深厚土壤干层, 深层干燥化土壤难以得到降水补充, 土壤湿度长期维持干燥化状态, 因而林地深层土壤发生干燥化后并不能自动恢复到最初的土壤湿度状态。只有当树木砍伐或死亡后停止高强度耗水作用, 经过连续多年降水入渗补充, 上部土壤干层土壤湿度才会逐步得到恢复, 但下部土壤干层土壤湿度恢复速度缓慢, 完全恢复需要的时间漫长<sup>[12,18]</sup>。

人工林地发生土壤干燥化后, 受制于土壤干燥化和干旱胁迫, 树木生长量随着降水量的年际变化而发生波动性变化, 湿润年份生长量大, 干旱年份生长量小, 严重干燥化林地林分呈现典型“小老树”特征, 树冠小而分枝和树叶数量少, 树木生长十分缓慢甚至完全衰败和死亡。半湿润区塬地、沟道和阴坡林地土壤水分状况相对较好, 林地土壤干燥化较轻, 而阳坡、峁顶等立地类型林地蒸散量大, 林地土壤干燥化严重。半干旱区林地降水补给量小, 林地耗水量明显大于供水量, 林地土壤干燥化严重且较为普遍, 阳坡、峁顶比沟道和阴坡林地土壤干燥化更为严重, 容易发生树木生长衰败和死亡现象。在正常降水年份, 无论塬地、阴坡和阳坡林地, 树木都能够维持缓慢生长, 但当出现连续干旱年型, 半湿润区阳坡林地和半干旱区各类乔木林地水分供给难以维持树木生长需水, 就会出现黄叶、落叶、干梢现象, 严重时导致林木成片死亡。另外, 林地土壤干燥化程度和树木生长状况还与林分种植密度有关, 种植密度大, 树木耗水强度大, 干燥化程度严重, 容易出现衰败。

#### 3.2 关于林地土壤干燥化强度评价方法

虽然, 众多学者已经研究揭示了黄土高原人工林草地土壤干燥化现象及其区域分布特征, 但至今尚未形成有效的土壤干燥化评价方法。在早期土壤干燥化研究中, 通常采用当地土壤田间持水量作为判别土壤干燥化现象和计算土壤水分亏缺量的上限指标<sup>[9]</sup>, 但是黄土高原旱地土壤湿度普遍均低于当地土壤田间持水量值, 此指标无法区分由于干旱气候引起的正常土壤湿度降低和由于林草生长水分过耗导致的土壤干燥化。后来一些研究中采用荒草地或者旱作农田土壤湿度值作为判别林草地土壤干燥化上限指标值<sup>[12,13,21]</sup>, 但荒草地和旱作农田受年度和季节降水变化、地形地貌、土壤性质等因素的影响, 并非稳定不变, 在不同降水年型、不同立地条件和不同降水类型区之间难以比较。此后, 杨文治、李玉山等提出了土壤稳定湿度概念, 规定其值约为田间持水量的 50%~75%, 以此作为判别林草地土壤干层的上限湿度指标, 但并没有界定土壤稳定湿度的具体涵义、测定和计算方法<sup>[7~9]</sup>。

综合有关研究结果可以理解为, 土壤稳定湿度是指在黄土高原干旱气候、土壤质地、自然植被等因素作用下, 通常旱地土壤长期能够保持的土壤湿度。土壤稳定湿度与田间持水量之间的水分亏缺现象应视为干旱气候环境下旱地土壤正常状态的水分亏缺, 不属于土壤干燥化的范围。由于某一地区的土壤湿度随年度和季节降水而不断发生变化, 在短期内深层土壤稳定湿度值不易直接测量和准确界定, 若采用占田间持水量一定比例的方法来计算, 随意性又很大。本研究提出的土壤稳定湿度估算方法简单易行, 兼顾了由田间持水量所表征的土壤最大持水能力和由凋萎湿度所表征的土壤最低供水能力, 反映了某一地区某一种土壤保持水分的平

均状态,且不随降水量的年度和季节变化而发生变化,便于不同季节和年度之间比较,也便于不同降水类型地区 and 不同土壤类型之间比较。这种方法所确定的土壤稳定湿度取值范围介于 10% ~ 16% 之间,约为田间持水量的 50% ~ 70%,南部的中壤土其值稍高,介于 14% ~ 16%,中部轻壤土和北部砂壤土其值稍低,介于 10% ~ 14%。

至今尚未见到关于林草地土壤干燥化强度评价指标的研究报道,有关研究中多以林草地土壤湿度观测值高低直接分级和比较土壤干燥化程度,但在不同降水类型区、不同类型土壤和不同类型植被之间难以直接比较。依据林草地土壤湿度观测值和土壤稳定湿度值计算所得的土壤干燥化指数 *SDI*,可用来分级评价各类林草地土壤干燥化强度差异,消除了气候、植被和土壤差异所带来的直接影响,可以应用于不同区域、土壤和植被类型之间土壤干燥化强度的差异比较。

### 3.3 结论

(1)在黄土高原 3 种气候和植被类型区,不同立地条件和不同树龄苹果、刺槐、油松、辽东栎、狼牙刺、沙棘和柠条等 23 种人工林地和天然林地 0 ~ 1000 cm 土层土壤湿度介于 6.17% ~ 16.92%,平均值 10.84%,明显低于荒草地土壤湿度和当地土壤稳定湿度值,林地土壤含水量 801.5 ~ 2200.0 mm,平均值 1409.8 mm,林地土壤有效含水量 97.0 ~ 1187.7 mm,平均值 446.6 mm,除旱塬地 5 年生和 9 年生苹果园地以及 4 年生沙棘林地外,其它 20 种人工和天然林地均发生了程度不同的土壤干燥化现象,土壤水分过耗量 156.2 ~ 758.5 mm,平均值 508.6 mm,年均土壤干燥化速度为 3.3 ~ 167.4 mm/a,平均值为 36.8 mm/a。即与当地土壤稳定湿度值相比,黄土高原各类林地土壤水分过耗量超过 500 mm,平均每年多消耗土壤水分 36.8 mm。在 3 个降水和植被类型区中,林地土壤湿度和土壤有效含水量呈现出随降水量减少而明显下降趋势,林地土壤水分过耗量和耗水速度以中部半干旱森林草原区最高,其次为北部半干旱偏旱典型草原区,南部半湿润森林区相对较低。在 7 类林地中,苹果园地土壤湿度和土壤含水量最高,刺槐、油松、辽东栎和沙棘林地较为接近且居中,狼牙刺林地为次低,柠条林地最低。林地年均土壤干燥化速度为柠条和狼牙刺林地 > 油松林地 > 刺槐和沙棘林地 > 苹果园地和辽东栎林地。

(2)各类林地土壤湿度剖面分布特征显示,除林龄较短的苹果园地、沙棘和柠条林地外,各类林地在 300 cm 以下深层土壤湿度明显低于荒草地和土壤稳定湿度值,最大耗水深度接近或超过 1000 cm。随林龄增长,林地深层土壤湿度逐渐降低,土壤干层逐渐加深和加厚,立地条件也是影响林地土壤水分的重要因素,林地深层土壤湿度分布呈现阳坡低于阴坡、坡地低于平地的特征。天然辽东栎林地、天然狼牙刺和沙棘灌木林地深层土壤湿度分布和人工林地接近或更低,土壤干燥化也较为严重。

(3)23 种林地土壤干燥化指数为 11% ~ 131%,平均值为 51.6%,远低于荒草地土壤干燥化指数 81% ~ 141%,即黄土高原各类林地平均为中度干燥化强度,接近于严重干燥化强度。林地土壤干燥化指数:半湿润森林区 > 半干旱森林草原区 > 半干旱偏旱典型草原区,表明林地土壤干燥化强度从南向北趋于加重,林地土壤干层厚度平均达到或超过 800 cm,也呈现随区域降水量减少而逐渐加厚趋势。在 7 类林地中,苹果和沙棘林地为轻度干燥化强度,刺槐、油松、辽东栎和柠条林地均为严重干燥化强度,狼牙刺林地为强烈干燥化强度。7 类林地土壤干层厚度:油松、辽东栎、狼牙刺和柠条林地 > 刺槐林地 > 苹果和沙棘林地。

### References:

- [ 1 ] Li Y S. Characters of soil water cycling and its influences on land water cycling of the loess region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91 - 101.
- [ 2 ] Han S F, Li Y S, Shi Y J, *et al.* The characteristics of soil moisture resources on the loess plateau. *Bulltin of Soil and Water Conservation*, 1990, 10(1): 36 - 43.
- [ 3 ] Yang W X. The preliminary discusion on soil desiccationof artificial vegetation in the northern region of China. *Scientia of Silvae Sinicae*, 1996, 32(1): 78 - 84.
- [ 4 ] Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation on soil water conditions of conservation forest ecosystem of loess region. *Scientia of Silvae*

- Sinicae, 1996, 32(4): 289—296.
- [5] Wu Q X, Yang W Z. The vegetation construction and sustainable development of the loess plateau. Beijing: Science Press, 1998.
- [6] Hou Q C, Han R L, Han S F. Initial research on “dried soil layer” of artificial forestland and grassland in Loess Plateau. Soil and Water Conservation of China, 1999, (5): 11—14.
- [7] Yang W Z, Shao M A. Research on soil water of the loess plateau. Beijing: Science Press, 2000.
- [8] Yang W Z. Soil water resources and afforestation in loess plateau. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 433—438.
- [9] Li Y S. Effects of forest on water cycle on the loess plateau. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 427—432.
- [10] Huang M B, Yang X M, Li Y S. Effect of apple basin regional water cycle in Weiwei upland of the Loess Plateau. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(1): 5—13.
- [11] Chen Y M, Liang Y M, Cheng J M. The zonal character of vegetation construction on the loess plateau. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(3): 339—345.
- [12] Chen Y M, Liu G B, Yang Q K. Zonal characteristics of artificial forest effecting soil moisture on loess plateau. Journal of Natural Resources, 2004, 19(2): 195—200.
- [13] Mu X M, Xu X X, Wang W L, *et al.* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on loess plateau. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 210—217.
- [14] Cheng J M, Wan H E, Yong S P, *et al.* Soil water dynamic of Hippophae rhamnoides in loess hilly region. Acta Bot-occident Sinica, 2003, 23(8): 1352—1356.
- [15] Cheng J M, Wan H E, Wang J, *et al.* Growth of Caragana microphylla and depletion process of soil water in semi-arid region. Scientia of Silvae Sinicae, 2005, 41(2): 37—41.
- [16] Wang L, Shao M A, Zhang Q F. Distribution and characters of soil dry layer in northern Shaanxi loess plateau. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 436—442.
- [17] Fan J, Hao M D, Shao M A. Water consumption of deep soil layers and eco-environmental effects of agricultural ecosystem in the Loess Plateau. Transaction of CSAE, 2004, 20(1): 61—64.
- [18] Wang J X, Huang B L, Luo W X. Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of drought prone Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2395—2401.
- [19] Yang X M, Yang W Z. Study on soil water balance of shrubland. Research of Soil and Water Conservation, 1998, 5(1): 109—118.
- [20] Wang Z Q, Liu B Y, Xu C D, *et al.* Survival capability analysis of four kinds of artificial forests in Loess Plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 25—29.
- [21] Chen H S, Wang K L, Shao M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer of Loess Plateau. Scientia of Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 155—161.
- [22] Li J, Chen B, Li X F, *et al.* Effects of deep soil desiccation on alfalfa grasslands in different rainfall areas of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 75—89.

#### 参考文献:

- [1] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. 生态学报, 1983, 3(2): 91—101.
- [2] 韩仕峰, 李玉山, 石玉洁, 等. 黄土高原土壤水分资源特征. 水土保持通报, 1990, 10(1): 36—43.
- [3] 杨维西. 试论我国北方地区人工林植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32(1): 78—84.
- [4] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学, 1996, 32(4): 289—296.
- [5] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 侯庆春, 韩蕊莲, 等. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. 中国水土保持, 1999(5): 11—14.
- [7] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433—438.
- [9] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427—432.

- [10] 黄明斌,杨新民,李玉山. 黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响. 地理学报,2001,56(1):5~13.
- [11] 陈云明,梁一民,程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征. 植物生态学报,2002,26(3):339~345.
- [12] 陈云明,刘国彬,杨勤科. 黄土高原人工林土壤水分效应的地带性特征. 自然资源学报,2004,19(2):195~200.
- [13] 穆兴民,徐学选,王文龙,等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报,2003,40(2):210~217.
- [14] 程积民,万惠娥,雍绍萍,等. 黄土丘陵区沙棘灌木林地土壤水分动态研究. 西北植物学报,2003,23(8):1352~1356.
- [15] 程积民,万惠娥,王静,等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究. 林业科学,2005,41(2):37~41.
- [16] 王力,邵明安,张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布与分异特征. 应用生态学报,2004,15(3):436~442.
- [17] 樊军,郝明德,邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报,2004,20(1):61~64.
- [18] 王进鑫,黄宝龙,罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征. 生态学报,2004,24(11):2395~2401.
- [19] 杨新民,杨文治. 灌木林地的水分平衡研究. 水土保持研究,1998,5(1):109~118.
- [20] 王志强,刘宝元,徐春达,等. 连续干旱条件下黄土高原几种人工林存活能力分析. 水土保持学报,2002,16(4):25~29.
- [21] 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. 林业科学,2005,41(4):155~161.
- [22] 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. 生态学报,2007,27(1):75~89.