

# 黄土高原北部河北杨林的土壤水分特征

李洪建, 王孟本, 柴宝峰

(山西大学黄土高原研究所, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 以河北杨林为研究对象, 在对其土壤水分进行 7 a 定位观测的基础上, 对其特点进行全面分析。结果表明: 河北杨林土壤水分动态的周年变化规律主要受降水及其分配特点和生长期初土壤水分含量的影响。0 cm~300 cm 深度内, 生长期土层内土壤水分的年平均值得多数年在 64 g/kg 左右; 特旱年仅 50 g/kg; 特涝年也只有 76 g/kg; 土壤水分条件较差; 多数年份土壤水分基本平衡; 特旱、特涝年份土壤水分大量亏缺、积累, 其值均达 150 mm 以上。0 cm~300 cm 深度内土壤水分剖面的垂直分布自上而下分为活跃层、过渡层和稳定层, 但各层的厚度变化受年降水量的影响较大; 土壤含水量的平均值随深度增加而减少, 从 72 g/kg~57 g/kg。除特涝年份的生长季中后期外, 生长期内的土壤有效水分含量较少, 河北杨处于轻胁迫状态; 5 月下旬到 7 月上旬河北杨有近一半时间处于中胁迫状态。但河北杨有较大的贮水库容, 有利于土壤水的年际调节。

**关键词:** 河北杨; 土壤水分; 周年变化; 垂直分层; 年际调节

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

河北杨(*Populus hopeiensis*)是黄土丘陵地区的重要造林树种之一, 在山西主要分布在吕梁山西坡, 以晋西北河曲、保德县较为集中<sup>[1]</sup>。为了了解河北杨林土壤水分的特点, 我们在河曲县对其土壤水分进行了 7a 的定位观测。观测期间不仅有降水正常年、偏旱年和偏涝年, 而且遇到了极少出现的特旱年和特涝年。在进行初步分析的基础上<sup>[2]</sup>, 对河北杨林的土壤水分特征进行进一步分析, 全面了解黄土高原北部地区人工林土壤水分的变化特点, 对本区水土保持防护林建设具有一定意义。

## 1 研究概况

### 1.1 试验区概况

试验区位于晋西北河曲县境内黄河一级支流的砖窑沟流域(39°13'06"N~39°13'47"N, 111°12'03"E~111°19'28"E), 为典型黄土丘陵沟壑区。区内气候见参考文献<sup>[2,3]</sup>。供试林位于流域中部的沙坪村, 海拔 1 100 m 左右, 坡度 10°, 坡向北。试验用河北杨林密度 2 220 株/hm<sup>2</sup>, 平均株高 5.13 m, 平均胸径 5.9 cm。其植物群落特点为: 分层结构简单, 有草本层, 无灌木层。草本层植物种类较少, 以茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等种

类较为多见。试验地土壤质地为马兰黄土, 土层深厚, 土壤属黄土质淡栗褐土。整个剖面质地均匀, 土壤容重 1.25 g/cm<sup>3</sup>~1.39 g/cm<sup>3</sup>; <0.01 mm 的物理粘粒含量 13%~16%。孔隙度 44.3%~45.8%; 饱和渗透系数 0.35 mm/min~3.74 mm/min。

### 1.2 测试方法

土壤含水量用烘干法(105℃)测定。测深 300 cm, 11 个层次。测深下限分别为 10、20、40、60、80、100、120、150、200、250 和 300(cm)。每层次 3 个重复。生长季期间(4~10 月)每月中旬取样 1 次(1988 年每月 2 次), 1988~1990、1992~1995 年共测定了 7 a。用简易雨量筒测定降水量。不同深度的土壤贮水量按下面公式计算

$$WC=0.01R \cdot V \cdot H$$

式中 WC 为土壤贮水量(mm), R 为土壤含水量(干土重, g/kg), V 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>), H 为土层深度(cm)。土壤容重测定用环刀法。

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同降水年生长期内土壤水分动态特征

#### 2.1.1 土壤水分动态与降水量的关系

河北杨林地土壤水分的动态与降水量的大小及

收稿日期: 2002-04-01。

作者简介: 李洪建(1958-), 男(汉族), 山西洪洞县人, 副教授。主要从事区域治理、土壤水分生态和植物生理生态的研究。发表论文 30 余篇。电话: 0351-7010700 Email: hongli@sxu.edu.cn

其分配特点相一致(图 1)。1988 年生长期降水量 436.2 mm, 为正常降水年, 年降水量及月降水量的分配亦与平均年份相同, 生长期 6 月以前土壤水分呈下降趋势, 雨季 0 cm ~ 200 cm 土壤水分明显增加, 且 100 cm ~ 200 cm 的水分增加明显滞后于 0 cm ~ 100 cm。1989 年降水量 341.8 mm, 三个降水峰期间隔较远, 8 月份降雨量仅 44.2 mm。土壤水分整体呈下降趋势。1990 年由于生长季初降水量较多(4 月降水 83.5 mm), 6 ~ 8 月降水量少且分布均匀, 整个生长期土壤水分除 0 cm ~ 100 cm 变化较大, 总体变化呈下降趋势。1992 年为偏涝年, 5 月中下旬和 6 月上中旬降水较多, 7 月下旬到 8 月下旬降水亦较集中, 9 月中下旬和 10 月中旬降水仍较多, 生长期土壤水分一直增加, 但 200 cm ~ 300 cm 内土壤水分相对稳定。1993 年为特旱年, 4 ~ 10 月降水量仅 234.8 mm, 受上一年生长季末高土壤含水量的影响, 生长季初林地的土壤含水量仍较高, 由于整个生长季降水量较少, 不同深度的土壤含水量一直下降, 即使在雨季土壤水分的增加亦不很明显。1994 年是紧接着特旱年份后的降水偏少年, 除 0 cm ~ 100 cm 土层土壤贮水量在 8 月份有较大增加外, 土壤水分季节变化不大。1995 年为特涝年, 从 6 月中旬开始土壤水分就开始增加, 土壤含水量的季节变化以后

期大幅度增加为特征, 它与其它年份的差异在于中、下层的土壤水分都有明显增加。

2.1.2 土壤水分循环水平与降水量的关系

以每个测定年各次测定的不同深度土壤水分含量的平均值与深度进行加权平均, 可求出生长季 0 cm ~ 300 cm 深度内的土壤含水量值。7 a 分别为: 63.6 g/kg、64.4 g/kg、68.4 g/kg、60.7 g/kg、64.9 g/kg、50.2 g/kg 和 76.1 g/kg。可以看出, 多数年份土壤水分在 64.0 g/kg 左右, 最差年仅 50 g/kg, 最好年份亦仅 76.1 g/kg, 其土壤水分状况较差。

2.1.3 不同降水年土壤贮水量的平衡状况

据河北杨生长期初、末 300 cm 土层贮水量可以看出(表 1), 偏涝年和特涝年土壤水分积累较大; 特旱年土壤水分亏缺严重; 偏旱年和正常降水年土壤水分基本平衡。土壤水分的年内变化规律可分为平衡型、减少型和增加型。1988、1989、1990 和 1994 年为“平衡型”, 1993 年“减少型”。1992 年和 1995 年为“增加型”。值得注意的是, 平衡型并非意味着土壤水分处于最佳平衡状态。如 1994 年虽为平衡型, 但其土壤水分的循环水平最低, 这种平衡是由于土壤供水不足造成的一种假平衡。因此在考虑生长期初、末土壤贮水量的同时, 还应注意其循环水平。

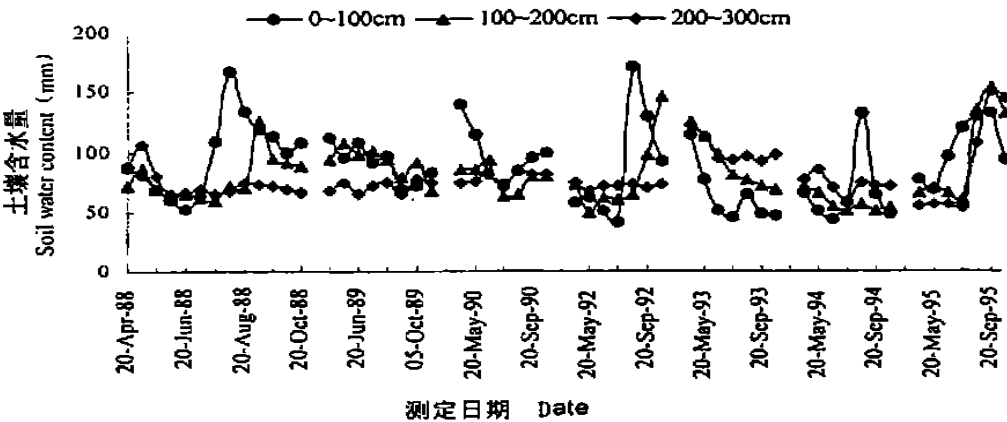


图 1 河北杨林地土壤水分的季节变化  
Fig. 1 Seasonal changes of soil water at different depth in *P. Hopeiensis* plantation

2.2 土壤水分的空间分布特征

2.2.1 土壤水分统计特征值及剖面层次的划分

根据土壤水分的定位测定数据, 对不同深度的

土壤水分进行的统计分析结果(表 2)表明, 土壤水分的垂直分布特征为: 40 cm 以上土壤含水量在 70 g/kg 以上, 40 cm ~ 200 cm 在 60 g/kg ~ 70 g/kg 范围

表 1 不同降水年河北杨生长期末 300 cm 土层的贮水量  
Table 1 Water storage at depth of 300 cm at the beginning and end  
of growing season in *P. Hopeiensis* plantation (mm)

年份 Year	生长期初贮水量 Water amount at the beginning of growing season	生长期末贮水量 Water amount at the beginning of growing season	末贮量-初贮量 Balance
1988	245.4	256.3	10.9
1989	265.0	225.0	-44.0
1990	314.2	270.6	-43.6
1992	205.8	313.8	108.0
1993	362.6	213.1	-149.5
1994	216.1	173.2	-42.9
1995	217.0	400.1	183.1

内, 200 cm 以下土壤水分 $< 60\text{ g/kg}$ , 总的趋势自上而下土壤含水量降小。同样, 标准差和变异系数从上

到下由大变小。95%的均值置信区间的上下界变化幅度自上而下逐渐变小。根据偏度系数, 不同深度的土壤水分均为偏正态分布; 偏度系数均 $> 0$ , 说明小于土壤水分平均值的变量分布较为集中, 偏度系数越大, 变量分布越集中。土壤水分的以上特点与本区土壤水分的补偿与消耗特点相一致。因为试验地土壤水分的唯一补充来源是大气降水, 无地下水补给, 土壤水分的消耗主要是土壤蒸发和林木蒸腾, 表层土壤水分受降水与蒸发影响最为激烈, 土壤含水量变化幅度也最大,  $17.8\text{ g/kg} \sim 171.8\text{ g/kg}$ 。随深度增加, 受降水与蒸发影响逐渐减小, 林木蒸腾消耗比重增加, 而降水只在特涝年份才能下渗到 250 cm $\sim 300\text{ cm}$  以下, 下层土壤水分亦只在特旱年份才得以消耗。

表 2 河北杨林土壤水分的剖面特征值  
Table 2 Profile of soil water in *P. Hopeiensis* plantation

深度 Depth (cm)	平均值 Mean (g/kg)	标准差 SD (g/kg)	变异系 数 CV	中位数 Median (g/kg)	95% 置信区域 (g/kg) 95% Confident interval		最小值 Min. (g/kg)	最大值 Max. (g/kg)	偏度系数 Skewness
					下界	上界			
					Lower bound	Upper bound			
10	71.6	36.4	50.8	73.1	61.8	81.2	17.8	171.8	0.63
20	71.7	29.0	40.4	70.4	63.9	79.4	27.8	163.8	0.75
40	72.7	30.2	41.5	69.5	64.6	80.8	30.4	153.2	0.62
60	68.3	28.7	42.0	65.7	60.7	76.0	28.1	148.6	0.71
80	68.0	27.9	41.0	63.3	60.5	75.5	31.3	141.5	0.72
100	67.8	27.2	40.1	62.4	60.5	75.1	30.3	134.6	0.67
120	63.7	23.9	37.5	55.2	57.3	70.1	34.2	120.8	0.84
150	63.3	20.8	32.9	57.5	57.7	68.8	35.4	114.5	0.83
200	60.9	20.5	33.7	55.2	55.4	66.4	35.2	129.7	1.50
250	58.9	17.0	28.9	53.3	54.4	63.5	39.9	122.0	2.00
300	57.9	14.5	25.0	55.2	54.0	61.8	37.7	116.0	1.99

根据标准差和变异系数对河北杨的土壤水分剖面进行的分层<sup>[3,4]</sup>表明, 河北杨的土壤水分剖面至上而下可分为活跃层、过渡层和稳定层。活跃层(变异系数 $> 50\%$ )深度 0 cm $\sim 10\text{ cm}$ ; 过渡层(变异系数 $25\% \sim 50\%$ ) 10 cm $\sim 250\text{ cm}$ ; 稳定层(变异系数 $< 25\%$ ) 250 cm $\sim 300\text{ cm}$ 。但是, 不同降水年差别较大(表 3), 因为土壤水分的垂直分布, 不仅与当年降水量有关, 还受上年降水的影响。1994 年是特旱年后的干旱年, 连续两年的土壤水分消耗, 土壤水分亏缺量很大, 降水很难入渗到 120 cm 以下。而 1995 年是特涝年份, 尽管前两年的干旱使土壤水分严重亏缺, 但大量的降水使其入渗深度达 300 cm 以下, 稳定层同样在 300 cm 以下。

2.2.2 土壤含水量与土层深度的关系模型

以各测定年相同深度的土壤水分含量的平均值( $y, \text{g/kg}$ )为因变量, 对应的土层深度( $x, \text{cm}$ )为自变量进行相关分析, 其最佳关系方程分别为

$$y = 8E - 06x^3 - 0.0039x^2 + 0.375x^1 + 67.94, \\ R^2 = 0.9316(1988);$$

$$y = -5E - 06x^3 + 0.0022x^2 - 0.324x + 84.649, \\ R^2 = 0.8933(1989);$$

$$y = 3E - 06x^3 - 0.0008x^2 - 0.1073x + 86.53, \\ R^2 = 0.9802(1990);$$

$$y = -8.1284Ln(x) + 100.84, \\ R^2 = 0.8753(1992);$$

$$y = -9E - 06x^3 + 0.0039x^2 - 0.3355x + 56.764, \\ R^2 = 0.9189(1993);$$

$$y = 2E - 06x^3 - 0.0003x^2 - 0.0685x + 56.11,$$

$$R^2=0.6626(1994);$$
$$y=-0.0579x+83.398,$$
$$R^2=0.3996(1995).$$

多数年份的关系方程为多项式, 1992 年为对数关系, 1995 年为线性关系。除 1995 年相关性较差外, 其余年份显著或极显著相关。

表 3 不同降水年河北杨林土壤水分剖面分层

Table 3 Profile layer in *P. Hopeiensis* plantation at different year

年份 Year	活跃层深度 Active layer (cm)	过渡层深度 Transition layer (cm)	稳定层深度 Stability layer (cm)	降水量 Precipitation (mm)
1988	0~150	150~200	200~300	436.2
1989	0~120	120~150	150~300	341.8
1990	0~100	100~150	150~300	423.9
1992	0~200		200~300	494.3
1993	0~150	150~250	250~300	234.8
1994	0~120		120~300	338.5
1995	0~300			651.6

2.2.3 生长期末土壤含水量与生长期初土壤含水量及降水量的关系

以生长期末的土壤贮水量 ( $WC$ , mm) 为自变量, 降水量 ( $P$ , mm) 和生长期初的土壤贮水量 ( $x$ , mm) 为因变量, 进行二元线性回归分析, 生长期末土壤含水量与生长期初土壤含水量及降水量的关系方程为

$$WC=0.488x+0.654P-135.494,$$
$$F=29.043(p<0.01)$$

用生长期末的土壤含水量与年降水量简单相关分析表明, 生长期末的土壤贮水量与降水量关系极显著, 关系方程为

$$WC=0.517p+48.924, r=0.92(p<0.01)$$

因此, 可用降水量预测当年生长季末的土壤贮水量。

2.3 土壤水分状况评价

2.3.1 有效水分状况

测定表明, 河北杨林 0 cm~300 cm 土层的贮水量绝大多数时段在 190 mm~320 mm 间。根据土壤水分的分类标准:  $-0.3\times10^5$  Pa 以上为重力水(无效水),  $-0.3\times10^5$  Pa~ $-3\times10^5$  Pa 为正常生理水,  $-3\times10^5$  Pa~ $-10\times10^5$  Pa 为轻胁迫水,  $-10\times10^5$  Pa~ $-20\times10^5$  Pa 为中胁迫水,  $-20\times10^5$  Pa 以下为重胁迫水(无效水)<sup>[5]</sup>, 同时根据河北杨土壤水分特征曲线相应水势的参数<sup>[6]</sup>, 可以计算出各类有效水分的上限值。结果表明, 多数年份河北杨在轻胁迫状态(0 cm~300 cm 贮水量<316.5 mm)下生长; 个别时段(1988 年的 5~6 月份; 1992 年的 5~7 月;

1994 年的 6~10 月份)在中胁迫状态(0 cm~300 cm 贮水量<194.5 mm); 只在少数时段土壤水分处于正常生长状态(0 cm~300 cm 贮水量在 316.5 mm~479.5 mm)。用不同月份土壤的实测贮水量与田间持水量( $-0.3\times10^5$  Pa 对应的含水量)之比( $W_f$ )来衡量河北杨林潜在的贮水性能<sup>[7]</sup>, 其值多在 0.5 左右, 说明其潜在的贮水能力较大, 有利于土壤水分的年内、年际调节。

2.3.2 土壤水分的补充、消耗过程

在测定的 0 cm~300 cm 土层内, 土壤水分的补充来源是大气降水, 而其消耗则主要是蒸腾和蒸发。与本区柠条林的土壤水分特点不同<sup>[8]</sup>, 河北杨林地土壤水分不存在明显的“干层”, 300 cm 土层以下的土壤水分多数年份参与土壤水分循环。图 2 为 1993—04~1995—09 不同月份的土壤水分剖面测定结果, 它们构成了土壤水分由高到低、又由低到高的年际变化过程。1993—04 的剖面受 1992 年(丰水年)的降水补充, 生长期初土壤含水量较高, 然而 1993 年为少有的特旱年, 生长期降水量不到 250mm, 整个生长期消耗的土壤水分来源于入渗的降水及中、下层土壤贮水, 到生长期末整个剖面土壤水分明显减少。紧接着的 1994 年为偏旱年, 由于 4~6 月降水量较少, 尽管 7、8 月份的降水量近于年平均水平, 但是由于上一年以及生长前期的土壤水分亏缺, 土壤水分也难以补充, 生长期末土壤水分水平与 6 月份相似。1995 年为特涝年, 但前期降水量较少, 土壤水分以消耗为主, 7 月上旬开始, 降水量大量增加, 上层土壤水分迅速增加, 0 cm~50 cm 达田间持水量水平, 8 月下旬至 9 月上旬的大量降水, 使土壤水分下渗重新分配, 9 月中旬测定时土壤水分已下渗到 300 cm 以下。由此可见, 极端的大量降水对土壤水分的补充、恢复及其年际调节具有重要意义, 深层贮水在干旱年份对林木生长所需水分的供给起着不可忽视的重要作用。

3 小结

1. 试区土壤水分的季节变化主要受降水量及其季节分配的影响, 其变化规律与降水量的分配相一致, 但是中(100 cm~200 cm)、下(200 cm~300 cm)层存在明显的滞后现象。河北杨林地 0 cm~300 cm 深度内土壤水分的年循环水平在 50 g/kg~76 g/kg 间, 土壤水分状况较差。大多数年份土壤水分基本

平衡;特旱年份土壤水分亏缺严重;偏涝年和特涝年土壤水分有较大积累。

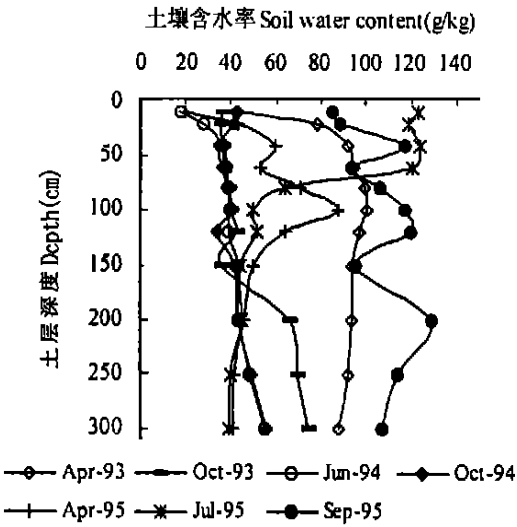


图 2 河北杨土壤水分的年际变化

Fig. 2 Yearly changes of soil water in *P. Hopeiensis* plantation

2. 土壤水分的空间分布特征表现为自上而下土壤水分含量逐渐减少,根据土壤水分的变化情况,可将其分为活跃层、过渡层和稳定层。但是不同降水年份各层的厚度变化较大。各测定年土壤水分变化与深度的关系模型拟合较好。

3. 河北杨林地的土壤水分状况总体较差;多数年份河北杨在轻胁迫状态下生长,春季约一半时间处于中胁迫状态。但其潜在的在贮水能力较大,有利于接纳伏秋降水。

4. 土壤水分补充主要来自降水和深层土壤贮水。一般年份土壤水分靠当年降水进行年内调节,但在极端降水年深层贮水参与土壤水分的年际调节。

参考文献:

[ 1 ] 王宗汉, 钟静辉. 河北杨生长特性调查[ J ]. 山西林业科技, 1987, (4): 2~6.  
[ 2 ] 王孟本, 李洪建. 河北杨人工林土壤水分状况的研究[ J ]. 山西大学学报(自然科学版), 1990 (增刊): 61~68.  
[ 3 ] 王孟本, 李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[ J ]. 生态学报, 1995, 15(2): 178~185.  
[ 4 ] 韩仕峰. 黄土高原农田水量平衡[ A ]. 见: 黄土高原区域治理与评价[ C ]. 北京: 科学出版社, 1992. 190~240.  
[ 5 ] 张小泉, 张清华, 毕树峰. 太行山北部中山幼林地土壤水分的研究. 林业科学[ J ], 1994 30(3): 193~200.  
[ 6 ] 王孟本, 柴宝峰, 李洪建, 等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[ J ]. 林业科学, 1994 35(2): 193~200.  
[ 7 ] 姚贤良. 华中丘陵红壤的水分问题 IV. 桔园红壤的水分状况[ J ]. 土壤学报, 1998, 35(2): 210~217  
[ 8 ] 王孟本, 李洪建. 柠条林地土壤水分生态环境特征研究初报[ A ]. 见: 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊[ C ]. 1989, (10): 155~160.

A Study on the Soil Water Characteristics of Populus Hebeinsis Plantation on Northern Loess Plateau

LI Hong-jian, WANG Meng-ben and CHAI Bao-feng  
(Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006 China)

**Abstract:** Based on the data of seven-year field measurement, the paper deals with the characteristics of soil moisture of *Populus hopeiensis* plantation. The results showed that the annual changing regularity of soil moisture of *P. hopeiensis* plantation depended mainly on both annual precipitation and its distribution as well as soil moisture storage amount in the beginning of growing season. The cycle level of soil moisture from extra-dry year to extra-wet year was from 50 g/kg to 76 g/kg, and the mean value was about 64 g/kg. The soil water content was in balance in most of the years, but was in a greatly deficit in extra-dry year and a considerably surplus in extra-wet year reaching as much as 150mm. According to the vertical profile of soil water, the distribution of soil moisture were divided from surface to bottom into three layers: active layer, transitive layer and stable layer. The thickness of the each layer changed greatly from year to year. The available water storage amount in the plantation was lower in the whole growing season. The plantation suffered from water stress slightly in most of the year, and suffered from water stress moderately about a half period of time from May to July, and had a high capacity for raining water storage. But this kind of situation provided with a favorable condition for soil water regularity between years.

**Key words:** *Populus hopeiensis* plantation; soil water dynastic; distribution of vertical profile; water regularity between years  
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>