

晋西黄土残塬沟壑区土壤水分的时空变化研究

郑芳¹, 张建军^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 干旱半干旱黄土区土壤水分的研究对该区植被恢复与重建具有重要意义, 对晋西黄土残塬沟壑区荒草坡、刺槐林地、虎榛子林地的土壤含水量进行时空变化分析后发现: 不同降水年份各地类土壤含水量的季节变化和垂直变化差异显著。偏涝年各地类土壤含水量的季节变化呈凹型曲线, 正常降水年各地类土壤含水量的季节变化呈 W 型曲线; 无论偏涝年还是正常降水年, 各地类生长季内土壤水分一直处于消耗状态; 虎榛子林地正常降水年的土壤含水量在垂直剖面上的变化幅度远小于偏涝年, 刺槐林地在正常降水年深层土壤水分的亏缺比偏涝年更大。经多重比较得出, 荒草坡各层土壤含水量差异不显著, 林地表层(0-20, 20-40 cm)与深层(60-100 cm)土壤含水量差异显著。

关键词: 土壤水分; 季节变化; 垂直变化; 黄土残塬沟壑区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)05-0226-05

Temporal and Spatial Changes of Soil Moisture in Remanent Loess Plateau Gully Region of Western Shanxi Province

ZHENG Fang¹, ZHANG Jian-jun^{1,2}

(1. College of Soil & Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. The key Laboratory for Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: Studying on soil moisture is of great significance for vegetation restoration and reconstruction in arid and semi-arid on the Loess Plateau. The dynamic changes of soil moisture in slope grassland, *Robinia pseudoacacia* forestland, *Ostryopsis davidiana* shrubland in remanent loess plateau gully region of western Shanxi province were analyzed. The results showed that whether seasonal or vertical variation of soil moisture, the dynamic changes of soil moisture in the study area in the rainy year (1990) were significantly different from those in the normal rainfall pattern year (1991). In the rainy year (1990) the charts of seasonal variation of soil moisture in experimental plots were concave curve, while in the normal year (1991) the charts of seasonal variation of soil moisture in experimental plots were W-shaped curve; whether in the rainy year (1990) or in the normal year (1991), the soil water contents decreased during the growing season; the vertical changes of soil moisture in *Ostryopsis davidiana* shrubland in the normal year (1991) were much smaller than in the rainy year (1990), and the loss of soil water in deep layers in *Robinia pseudoacacia* forestland was greater in the normal year (1991) than in the rainy year (1990). After multiple comparisons, differences of soil water contents among all layers in slope grassland were not significant, while differences of soil water contents between top layers (0-20, 20-40 cm) and deep layers(60-100 cm) in forestland were significant.

Key words: soil moisture; seasonal variation; vertical variation; remanent Loess Plateau gully region

土壤水分是限制林木生长的重要因子^[1-3]。尤其在降水资源有限且水土流失严重的黄土区, 土壤水分对植被恢复的影响作用更为重要。近年来国内外学者对土壤水分进行了广泛的研究。如 Penna^[4]等采

用相关分析等方法对土壤水分与地形因素的关系进行研究, 认为坡度和地形湿度指数对土壤水分的空间变化有较大影响; Liang^[5]等采用的土壤水分模型考虑了林地树干茎流对树木周围土壤水分变化的影响,

收稿日期: 2010-01-14

资助项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAD03A1204)

作者简介: 郑芳(1983-), 女, 江西上饶人, 在读硕士, 主要从事数字水文研究。E-mail: fang_515119@163.com

通信作者: 张建军(1964-), 男, 甘肃天水人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与植被恢复、水文学等研究。E-mail: zhangjianjun@bjfu.edu.cn

其模型模拟的结果与观测结果极为一致; 张建军^[6] 等以水分亏缺量为依据提出了利用胸径计算刺槐和油松林合理密度的公式, 并以刺槐和油松林地的土壤水分含量、最低含水量和难效水频率为指标提出了黄土区适宜的刺槐和油松水土保持林的管理密度; 陈海滨^[7] 等对黄土高原沟壑区林地土壤水分进行了季节变化和垂直变化的分析; 李世荣^[8] 等对不同密度刺槐林地土壤水分运动规律及年际变化特征进行了研究, 认为土壤水分随着林分密度增大而减小, 而林下植被种类的数量亦随林分密度的增大而减少, 且逐步由中生植物向旱生植物过渡。不同降水年份条件下土壤水分时空变化的研究也有一定成果, 如王孟本^[9] 等分析了极端降水条件对柠条灌木林地土壤水分循环水平和降水年渗深等方面的影响; 李洪建^[10] 等对晋西北砖窑沟流域荒地 7 a 土壤水分与降水量关系进行了定量分析。但对黄土残塬沟壑区不同降水年份不同地类土壤水分时空变化的研究并不多。本文对偏涝年份和正常降水年份乔、灌、草植被的土壤水分时空变化规律进行分析研究, 以期为该区域的植被恢复、林分生产力的提高等提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区是北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站所在地, 位于吕梁山南端山西省吉县红旗林场, 地理坐标为 $110^{\circ}45' - 110^{\circ}48' E$, $36^{\circ}00' - 36^{\circ}05' N$, 属于晋西黄土残塬沟壑区。该地

表 1 研究地类的基本情况

地类	坡向	坡位	坡度/ $^{\circ}$	郁闭度/ $\%$	地表植物盖度/ $\%$	胸径或地径/cm	树高/m
刺槐林地	阳坡	上	27	74	90	5.82	4.2
荒草坡	阳坡	中	22		70		
虎榛子林地	阳坡	中	35	95		0.7	0.8

注: 表示未测。

2 结果与分析

2.1 不同地类土壤水分的季节动态

图 1 为偏涝年份不同地类土壤水分的季节变化情况。从图 1 中可以看出, 偏涝年份(1990 年) 降雨分布不均, 7-9 月降雨占全年降雨的 59.64%。不同地类土壤水分的季节动态总体呈凹型曲线: 即土壤含水量先减小后增大, 最后趋于平稳。进入 4 月后, 随着气温的逐步升高, 植物生理活动日趋活跃, 植物蒸腾和土壤蒸发作用逐渐增强, 从而导致土壤含水量逐渐减少。进入 7 月后降雨量增多, 土壤含水量逐渐增加。但 7 月降雨量达到最大时, 各地类土壤含水量仍

区属暖温带大陆性气候, 冬季寒冷干燥, 夏季温度较高。夏季雨量集中在 6-9 月, 约占全年降水的 70%, 年均降雨量为 494.7 mm。年均气温 $10^{\circ}C$, 最高为 $38.1^{\circ}C$, 无霜期 170 d 左右。风以偏南为主, 每年出现 8 级以上的大风日约为 6 d。当地主要土壤类型为褐土, 黄土母质。森林覆盖率为 39.8%, 主要造林树种为刺槐(*Robinia Pseudoacacia*) 和油松(*Pinus Tabulae Formis*), 灌木树种主要有虎榛子(*Ostryopsis Davidiana*)、沙棘(*Hippophae Rhamnoides*) 等^[11]。

1.2 数据来源与研究方法

土壤水分数据是张建军等人于 1990 年、1991 年 4-10 月, 在研究区内的刺槐林地、荒坡草地和虎榛子林地以每周观测一次的频度采用烘干法测定, 观测土壤深度为 1 m, 分 5 个层次, 分别为 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm。研究地类的基本情况见表 1。

降雨数据是用标准雨量筒实测得到, 1990 年的降雨量为 572.1 mm, 1991 年的降雨量为 452.8 mm。山西省气象科学研究所根据年降水量与降水量平均值之差占降水量平均值的百分率 P 将年降水量划分为 5 级: P 在 $\pm 15\%$ 之间为正常年, $15\% \sim 40\%$ 为偏涝年, $-15\% \sim -40\%$ 为偏旱年, P 在 40% 以上为特涝年, P 在 -40% 以下为特旱年^[12]。与研究地区的多年平均降雨量 494.7 mm 相比, 1990 年降雨量高出了 15.6%, 为偏涝年; 1991 年降雨量降低了 8.5%, 为正常年。

然处于较低水平。这可能是由于各样地均处于阳坡, 在 7 月高温下, 地表土壤蒸发更加旺盛, 且植被蒸腾耗水大, 使得土壤水分的消耗量仍然大于雨水的补给量, 故土壤含水量仍然较低。直到 8 月, 土壤含水量才迅速增加。这说明降水对土壤水分的补偿具有一定的滞后性, 土壤含水量的季节变化落后于降雨的季节变化。进入 9 月后降水逐渐减少, 气温也开始降低, 林木蒸腾和地面蒸发作用均减弱, 土壤耗水量和补给量处于相对平衡稳定状态, 各地类的土壤含水量基本上趋于稳定。从整体上看, 偏涝年份(1990 年) 降水对土壤水分的补偿作用比较显著。在整个生长季内(4-10 月), 荒草坡的土壤含水量高于刺槐林地和

虎榛子林地,说明刺槐林地和虎榛子林地的耗水量高于荒草坡。虎榛子林地在生长季初期和末期的土壤含水量较高,但在生长季中期土壤含水量却处于较低水平,整个生长季内虎榛子林地土壤含水量的波动幅度(9.18%~17.18%)大于荒草坡(10.96%~16.37%)和刺槐林地(10.42%~14.52%)。这是因为虎榛子灌木林的水土保持作用有限,生长季中期正值降雨较多的季节,降雨时有更多的雨水以地表径流的形式流走,而虎榛子林地的旺盛生长又要消耗大量土壤水分,使其土壤含水量低于荒草坡和刺槐林地;而生长季初期和末期气温不高,虎榛子展叶晚,落叶早,对土壤水分的消耗不大,因而虎榛子林地土壤含水量又处于较高水平。

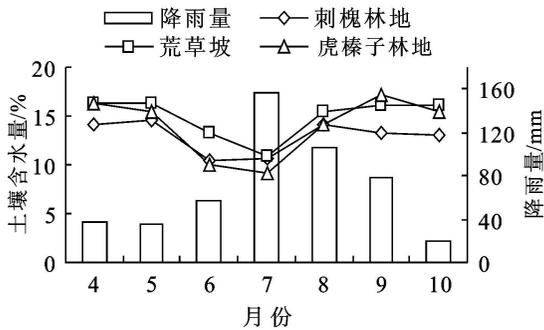


图 1 1990 年(偏涝年份)不同地类 0-100 cm 土壤含水量季节变化

图 2 为正常降水年份(1991 年)不同地类土壤水分的季节变化情况。从图 2 可见,正常降水年份(1991 年)的降雨量虽然较偏涝年份(1990 年)明显偏少,但降雨的年内分布比较平均,只有 7 月降水比较突出。从整个年生长季来看,不同地类土壤水分总体均呈下降趋势,这主要是受生长季后期降水量偏少、蒸发量仍然较大的影响所致。7 月份后在降雨的影响下土壤水分开始有所积累,但由于降水量少,生长季后期增加的土壤水分仍然不能弥补生长季前期消耗的土壤水分,因此到 10 月底各地类的土壤含水量仍未能恢复到 4 月的水平。在正常降水年份条件下不同地类的土壤水分季节动态基本一致。虎榛子林地土壤含水量的年生长季内波动幅度(9.14%~19.28%)仍然大于荒草坡(7.07%~16.97%)和刺槐林地(7.92%~14.53%)。

表 2 1990 年(偏涝年份)和 1991 年(正常降水年份)生长季土壤平均含水量及生长季初、末期土壤含水量 %

年份	刺槐林地				荒草坡				虎榛子林地			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
偏涝年份	13.06	14.15	13.06	-1.09	14.89	16.37	16.09	-0.28	13.90	16.31	15.48	-0.83
正常降水年份	11.2	14.53	12.41	-2.12	12.4	16.97	14.59	-2.38	13.88	19.28	14.39	-4.89

注: A 为生长季土壤平均含水量; B 为生长季初期土壤含水量; C 为生长季末期土壤含水量; D 为生长季末期与初期土壤含水量的差值。

2.3 不同地类土壤水分的垂直变化特征

表 3 为各地类不同层次土壤水分特征值的统计

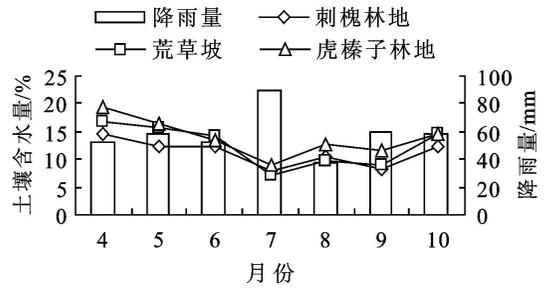


图 2 1991 年(正常降水年份)不同地类 0-100 cm 土壤含水量季节变化

2.2 不同降水年份土壤水分的比较

对比图 1 和图 2 可见,偏涝年份(1990 年)和正常降水年份(1991 年)土壤含水量的季节变化趋势并不一致,尤其是从雨季开始,两者的变化差异较大,说明年降水量及雨季降水分布对土壤水分影响较大。表 2 为偏涝年份(1990 年)和正常降水年份(1991 年)生长季土壤平均含水量及生长季初期、末期土壤含水量表。从表 2 可见,正常降水年份(1991 年)的土壤含水量总体上低于偏涝年份(1990 年)。在偏涝的 1990 年,刺槐林地、荒草坡、虎榛子林地的土壤平均含水量分别比正常降水年份的 1991 年高出 16.61%、20.08%、0.14%,生长季末期的土壤含水量分别比正常降水年份的 1991 年高出 5.24%、10.28%、7.57%。但各地类在正常降水年份(1991 年)生长季初期的土壤含水量较高,这是由于偏涝年份(1990 年)降水较多,导致年末土壤中蓄积的水分较多的缘故。可见前一年降雨量对当年生长季初期土壤含水量有一定的影响,这与李洪建等^[12]的研究结果一致。从表 2 还可以看出,不论是在正常降水年份还是在降水较多的偏涝年份,各地类生长季末期的土壤含水量均低于生长季初期的土壤含水量,尤其是降水相对较少的 1990 年各地类生长季初期和末期土壤含水量的差值更大。可见在干旱半干旱的黄土高原地区,生长季内土壤水分一直处于亏缺状态,这势必严重影响植物的正常生长发育。因此,在黄土高原地区必须采取水土保持措施有效拦蓄地表径流,增加土壤水分,同时应该采取适当的抚育管理措施,调整林分密度,降低植物的蒸腾耗水。

表。从表 3 可见,刺槐林地和虎榛子林地土壤含水量的均值随土层深度的增加呈下降趋势,虎榛子林地各

层的土壤含水量均高于刺槐林地, 说明虎榛子灌木林的耗水量小于刺槐乔木林。荒草坡土壤含水量随土

层深度的增加变化不大, 这正是荒草坡和林地土壤水分垂直分布的主要区别。

表 3 各地类不同层次土壤水分的特征值

样地	深度/ cm	样本 数	均值/ %	标准 差	变异 系数/%	95% 置信区域			最小值/ %	最大值/ %	偏度
						下界	上界	范围			
刺槐林地	0- 20	60	14.13	5.11	36.14	12.81	15.45	2.64	4.68	27.52	0.43
	20- 40	60	12.97	3.84	29.61	11.97	13.96	1.99	5.46	21.95	0.18
	40- 60	60	11.87	3.28	27.60	11.02	12.71	1.69	5.50	22.82	0.63
	60- 80	60	10.85	2.31	21.29	10.25	11.44	1.19	5.46	15.16	- 0.16
	80- 100	60	10.63	2.12	19.95	10.08	11.17	1.09	5.14	16.81	- 0.08
荒草坡	0- 20	60	13.84	5.56	40.20	12.40	15.28	2.88	3.37	23.61	- 0.11
	20- 40	60	13.55	4.31	31.80	12.43	14.66	2.23	4.81	20.86	- 0.40
	40- 60	60	13.72	3.92	28.56	12.71	14.74	2.03	4.39	19.95	- 0.77
	60- 80	60	13.67	3.23	23.64	12.83	14.50	1.67	5.05	20.09	- 0.65
	80- 100	60	13.67	3.17	23.17	12.85	14.49	1.64	5.42	21.74	- 0.37
虎榛子林地	0- 20	60	16.52	5.75	34.79	15.03	18.00	2.97	4.37	28.09	- 0.22
	20- 40	60	14.65	4.47	30.49	13.50	15.81	2.31	5.04	22.24	- 0.41
	40- 60	60	13.60	4.02	29.59	12.56	14.64	2.08	5.23	21.34	- 0.41
	60- 80	60	12.71	3.88	30.54	11.71	13.71	2.00	4.63	25.30	0.34
	80- 100	60	12.35	3.66	29.66	11.40	13.29	1.89	5.34	20.91	0.29

从表 3 可见, 各地类土壤含水量的最小值、最大值随土层深度的变化趋势基本一致, 即最小值自上而下增加, 最大值则相反。偏度表示数据相对平均值的分散程度。偏度小于 0, 说明小于土壤含水量平均值的数据分布较为分散; 偏度大于 0, 说明大于土壤含水量平均值的数据分布较为分散; 偏度接近零则可以认为数据分布为正态分布。偏度值越大, 则数据分布越分散。荒草坡各层的偏度值均小于零; 刺槐林地 0- 60 cm 土层的偏度值大于零, 60- 100 cm 土层的偏度值小于 0; 虎榛子林地 0- 60 cm 土层的偏度值小于 0, 60- 100 cm 土层的偏度值大于 0。各地类土壤含水量偏度的绝对值都在 40- 60 cm 土层处达到最大, 这可能是因为在 40- 60 cm 土层处植物根系活动最强烈, 导致植物耗水引起的土壤水分差异在这一土层处达到最大。

对各地类土壤含水量的变异系数 C_v 与土层深度的关系进行相关分析得到表 4。从表 4 可见, 各地类土壤含水量的 C_v 值与土层深度呈负相关。从 95% 置信区域上下界变化范围来看, 各地类土壤含水量的变化幅度均自上而下逐渐变小, 说明随土层深度的增加, 土壤水分值趋于稳定、集中。

表 4 各地类土壤水分变异系数与土层深度的关系方程

样地	关系方程	显著水平
刺槐林地	$Y = 39.128 - 0.204x$	$R = 0.979 (P < 0.01)$
荒草坡	$Y = 42.14 - 0.211x$	$R = 0.956 (P < 0.05)$
虎榛子林地	$Y = 34.077 - 0.051x$	$R = 0.748 (P > 0.05)$

表 5 1990 年不同地类各层土壤含水量的比较

土层深度/cm	刺槐林地/%	荒草坡/%	虎榛子林地/%
0- 20	14.87±4.63a	15.09±4.91a	17.99±5.74a
20- 40	13.82±3.71ab	15.26±3.15a	15.08±4.02b
40- 60	12.87±3.37bc	15.14±3.10a	13.55±4.17bc
60- 80	11.81±2.04c	14.82±2.56a	11.77±3.03c
80- 100	11.42±1.96c	14.52±2.70a	11.60±3.19c

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著, 下表同。

表 6 1991 年不同地类各层土壤含水量的比较

土层深度/cm	刺槐林地/%	荒草坡/%	虎榛子林地/%
0- 20	13.39±5.52a	12.59±5.97a	15.04±5.45a
20- 40	12.12±3.84ab	11.83±4.66a	14.23±4.91a
40- 60	10.86±2.89bc	12.30±4.18a	13.65±3.94a
60- 80	9.88±2.18c	12.52±3.46a	13.65±4.43a
80- 100	9.84±2.00c	12.81±3.41a	13.10±3.99a

2.4 不同降水年份条件下土壤含水量垂直变化分析

从表 5、表 6 中可以看出, 各地类不同降水年份下土壤含水量的垂直剖面变化并不一致。虎榛子林地在偏涝年份 (1990 年) 0- 40 cm 土层的土壤含水量高于正常降水年份 (1991 年), 而 40- 100 cm 土层的土壤含水量均低于正常降水年份 (1991 年)。这可能是因为偏涝年份 (1990 年) 强降雨较多, 而虎榛子林地的拦蓄作用有限, 使得大量雨水以地表径流形式流失, 对深层土壤水分的补偿较小, 且虎榛子根系耗水较大, 导致表层土壤水分高, 深层土壤水分却仍然较低; 而正常降水年份 (1991 年) 降雨强度较小, 虎榛子林地能够有效拦蓄雨水, 并渗入土壤深层, 使虎榛子

林地正常降水年份(1991年)的土壤含水量垂直变化幅度远小于偏涝年份(1990年)。经多重比较(LSD法),虎榛子林地在偏涝年份(1990年)0-20 cm 土层与其他各层土壤含水量存在显著差异,20-40 cm 土层与0-20,60-80,80-100 cm 土层土壤含水量也存在显著差异;在正常降水年份(1991年)各层土壤含水量无显著性差异。

刺槐林地偏涝年份(1990年)和正常降水年份(1991年)深层(60-100 cm)土壤含水量均较低,尤其在正常降水年份(1991年)深层土壤水分亏缺更大,这显然对刺槐林的生长极为不利。因此在黄土干旱半干旱区,应对刺槐林适当采取抚育管理措施,如适当进行间伐,以避免因刺槐根系耗水过度引起的深层土壤干层现象。经多重比较,刺槐林地在偏涝年份(1990年)和正常降水年份(1991年)0-20 cm 土层与40-60,60-80,80-100 cm 土层的土壤含水量存在显著差异,20-40 cm 土层与60-80,80-100 cm 土层的土壤含水量存在显著差异。

荒草坡在偏涝年份(1990年)20-40 cm 土层的土壤含水量为100 cm 土层内的最高值,在40-100 cm 土层深度范围内随土层深度增加而略有降低;而在正常降水年份(1991年)20-40 cm 土层的土壤含水量在整个土层深度范围内最低,40 cm 土层深度以下随土层深度增加而略有增加。这说明偏涝年份(1990年)强降雨条件下能够有效渗入到40 cm 以下土层的雨水较少,从而使40 cm 以下土层的土壤含水量逐渐减少;而在降雨相对较少的正常降水年份(1991年),长历时、低强度降雨形式的雨水能够有效渗入深层土壤,从而形成40 cm 以下土层的土壤含水量逐渐增加。经多重比较分析,不论偏涝年(1990年)还是正常降水年(1991年),荒草坡各层土壤含水量之间均不存在显著差异。

3 结论

(1)不同降雨年份的土壤水分季节动态并不一致。偏涝年份(1990年)各地类土壤水分季节变化均呈凹型曲线,即先减小后增大,最后趋于稳定;正常降水年份(1991年),各地类土壤水分季节变化均表现为W型曲线,这一年的土壤含水量总体呈下降趋势。

(2)无论偏涝年份(1990年)还是正常降水年份(1991年),荒草坡土壤含水量均高于林地。虎榛子灌木林土壤水分条件明显好于刺槐乔木林。

(3)正常降水年份(1991年)土壤含水量总体低于偏涝年份(1990年)。无论偏涝年(1990年)还是正常降水年(1991年),各地类生长季末期的土壤含水

量均低于生长季初期的土壤含水量,这说明该地区生长季内土壤水分一直处于亏缺状态,这对林木的生长极为不利。因此必须采取适当的水土保持措施和抚育管理措施,以增加林地的土壤水分。

(4)在不同降水年份下,各地类土壤含水量在垂直剖面上的变化不尽相同。荒草坡土壤含水量垂直变化较小,在偏涝年份(1990年)各层土壤含水量均高于正常降水年份(1991年);虎榛子林地在偏涝年份(1990年)的土壤含水量垂直变化幅度远大于正常降水年份(1991年);刺槐林地深层土壤含水量较低,尤其在降水相对较少的1991年深层土壤水分亏缺更大,这势必影响刺槐林的生长。因此必须采取抚育管理措施,以减缓刺槐林地深层土壤水分继续亏缺的趋势。

参考文献:

- [1] 张超,王会肖.黄土高原丘陵沟壑区土壤水分变化规律的研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):47-50.
- [2] 原焕英,许喜明.黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究[J].西北林学院学报,2004,19(2):5-8.
- [3] 郝文芳,韩蕊莲,单长卷,等.黄土高原不同立地条件下人工刺槐林土壤水分变化规律研究[J].西北植物学报,2003,23(6):964-968.
- [4] Penna D, Borga M, Norbiato D, et al. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain[J]. Journal of Hydrology, 2009, 364: 311-327.
- [5] Liang W L, Kosugi K, Mizuyama T. A three-dimensional model of the effect of stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope[J]. Journal of Hydrology, 2009, 366: 62-75.
- [6] 张建军,贺维,纳磊.黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究[J].中国水土保持科学,2007,5(2):55-59.
- [7] 陈海滨,孙长忠,安锋,等.黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(1):土壤水分的垂直变化和季节变化特征[J].西北林学院学报,2003,18(4):13-16.
- [8] 李世荣,张卫强,贺康宁.黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态[J].中国水土保持科学,2003,1(2):28-32.
- [9] 王孟本,李洪建,柴宝峰.极端降水条件对林地水分循环的影响[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):83-92.
- [10] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [11] 张建军,吴斌,朱金兆.晋西黄土残塬沟壑区水土保持林地土壤水分有效性的研究[J].北京林业大学学报,1994,16(增刊):59-65.
- [12] 李洪建,王孟本,柴宝峰.晋西北人工林土壤水分特点与降水关系研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):60-65.