

# 晋西黄土区人工刺槐林生理生态特点分析与研究

曹奇光, 张学培, 牛丽丽, 杨文文

(北京林业大学水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 采用 Li- cor6400 便携式光合仪, 对山西省吉县蔡家川流域试验区内刺槐的光合速率、蒸腾速率、气孔导度及其环境因子进行了观测, 并辅以不同水分梯度下的林木生理指标观测与比较, 研究了生理指标与环境因子之间的相互关系。结果表明: 刺槐在生长过程中没有充足水分供应时, 光合速率会出现负值; 蒸腾日变化曲线单峰或双峰取决于土壤水分条件; 各环境因子之间呈显著相关关系, 综合作用于蒸腾速率, 其中光合有效辐射是蒸腾速率的主要影响因子; 气孔导度与相对湿度的变化一致, 它们之间显著相关, 呈二次项曲线关系。

**关键词:** 环境因子; 光合速率; 蒸腾速率; 气孔导度

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)03-0330-03

## Analyze and Study on Characteristics of Artificial *Robinia pseudoscacia* Plantation Physiological Ecology in Loess Areas in West Shanxi

CAO Qi-guang, ZHANG Xue-pei, NIU Li-li, YANG Wen-wen

(College of Soil and Water Conservation in Beijing Forestry University, Key Lab of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education Beijing 100083, China)

**Abstract:** The photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and environmental elements of *Robinia pseudoscacia* L. in the test field of Caijiachuan watershed of Jixian of Shanxi Province were measured with a portable photosynthesis system (Li-6400), physiological characteristics were studied and compared under different soil moisture gradient, correlation between characteristics and environment elements were studied. The results show that the photosynthetic rate would bring negative number if *Robinia pseudoscacia* L. hasn't enough moisture during its growth; daily variation of transpiration rate displays a double-peak or a single-peak pattern, which depended on soil moisture condition; environmental elements correlated significantly with each other, they operated on transpiration rate together, the photosynthetic active radiation is the main factor which affects transpiration; the variation of stomatal conductance accords with reference humidity, it presents a quadratic relation with reference humidity.

**Key words:** environmental elements; photosynthetic rate; transpiration rate; stomatal conductance

刺槐(*Robinia pseudoscacia*)林是黄土高原半干旱半湿润地区植被恢复和重建的主要人工林类型之一,作为一种典型的中生树种,既喜湿润肥沃的土壤又耐干旱瘠薄,有较强的适应性和抗逆性<sup>[1]</sup>,它对改善生态环境、防治水土流失、调节水文状况发挥着重要的作用。因此几十年来,作为黄土高原主要的水土保持树种,人工刺槐林得到大面积的营造<sup>[2]</sup>,但由于刺槐的耗水性特强,过高的林分密度造成了严重的林地土壤水分亏缺,出现土壤干化现象<sup>[3]</sup>,进一步恶化了林地水分生态环境,使刺槐生长受到影响,从而严重制约了黄土高原的植被建设。为了寻求解决土壤水分亏缺的理论依据和方法,很多学者对林地水分进行了广泛的研究。研究表明,水分(尤其是土壤水分)对植物的生长、蒸腾、光合及有机物运输等生理过程具有明显的影响,从而影响植物对水资源的利用效率<sup>[4]</sup>。因此,在水分是植被生产力第一决定因子的干旱半干旱地区,以主要抗旱造林树种——刺槐为研究对象,探索刺槐光合特性及其与环境因子的关系,分析不

同土壤水分条件下刺槐的生理生态特点,对于提高黄土高原人工刺槐林的造林成活率和水分利用效率有重要的意义。

### 1 试验区概况

试验区位于山西省吉县蔡家川流域,该流域地理坐标为东经 110°37' 与北纬 36°40',海拔在 904~1592 m 之间,属暖温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季温度较高。年降水量为 575.9 mm,且集中于 7、8、9 三个月,占全年降水量的 59.5%。年均蒸发量为 1723.9 mm,4~7 月份蒸发量最大,占全年蒸发量的 54%。各月份蒸发量远大于降水量,而 4~6 月蒸发量是降水量的 4~5 倍。本地区地面温度除 12 月至第二年 2 月外,日平均气温  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温为 3357.9 $^\circ\text{C}$ ,极端最高温为 38.1 $^\circ\text{C}$ ,极端最低温为 -20.4 $^\circ\text{C}$ ,无霜期 172 d。从多年观测来看,风向除冬季外,以偏南风为多。年平均风速 2 m/s,3~6 月份平均风速 2.4 m/s。地形多为典型黄土高原侵蚀地形,特殊的气候条件和地形条件使吉县常受不同

\* 收稿日期: 2006-10-02

基金项目: 国家 973 课题“森林植被调控区域农业水土资源与环境的尺度变析与转换”(2002CB111503)

作者简介: 曹奇光(1974-),女,硕士研究生,主要研究方向:林业生态工程;责任作者:张学培,男,副研究员,硕士生导师,主要研究方向:林业生态工程。

程度的旱、雹、洪、风、霜冻等自然灾害的威胁。

## 2 试验材料、研究内容及方法

试验选择2004年生长状况良好无病虫害的刺槐纯林,林龄为11 a,平均树高5.68 m,平均胸径5.44 cm,坡度25°,密度2 204株/hm<sup>2</sup>,郁闭度0.74。选择在刺槐的生长旺季进行试验,每月分上、中、下旬,在晴朗无风的天气对刺槐的生理指标及环境因子进行测定,每株树按照林冠层上、中、下3个部位,将有代表性的叶片作为测定对象。

2005年选取生长状况良好的2~3年生刺槐幼苗,在当年春季造林时节移植到盆栽容器中,在试验测定开始前提供充足的供水保证苗木的成活,在测定开始前7~15 d开始控制土壤水分。本次研究采用灌水的方法,在干旱的4月到7月初进行土壤水分控制,以不同的持水量作为灌溉的土壤水分域值,采用随机机组设计,分4%~6%,8%,12%,16%,20%共5种处理水平,在5月22日、5月23日、5月24日、5月25日、6月14日、6月15日、6月16日、7月12日、7月13日进行观测。

试验仪器选用便携式光合仪(LiCor6400),从早8:00开始,每2 h测定1次,至18:00结束。观测因子包括:刺槐的蒸腾速率( $T_r$ )、光和速率( $P_n$ )、气孔阻力、气孔导度( $S_i$ )、胞

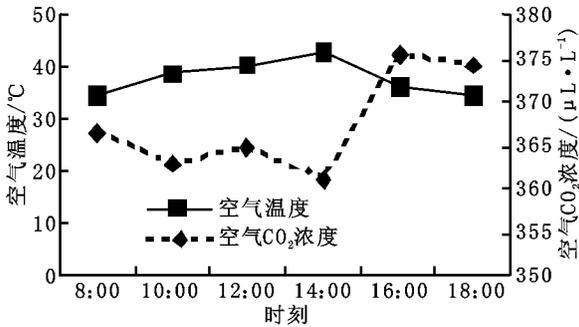


图1 环境因子的日变化

### 3.2 不同土壤含水量下光合速率的日变化及限制因素

图2表示在不同土壤水分条件下,刺槐光合作用变化的规律。从图中可以看出,4%的土壤水分条件下光合速率均为负值,因为在这种水分条件下刺槐已接近凋萎。在较高的土壤水分条件下(16%、20%),光合作用比较强,最高在10:00可达到6.038 μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s),随后逐渐降低。在8%和12%的条件下,刺槐有微弱的光合作用,光合速率的峰值和谷值都低于16%和20%条件下的光合速率,10:00左右光合作用减弱降低至负值,到16:00左右又缓慢恢复,但由于一天内大量的水分消耗,所以无法恢复到上午的水平。

光合的低谷即所谓的光合“午休”现象。刺槐光合速率日变化和产生“午休”现象的内在原因不单是气孔关闭的结果,因为引起叶片光合速率降低的因素主要有两种:一种是气孔因素,即气孔的关闭,气孔导度降低引起CO<sub>2</sub>供应不足<sup>[6]</sup>;另一种为非气孔因素,叶肉细胞光合活性降低引起同化力不足而限制了光合碳同化。根据Farquhar和Sharkey的观点,只有当光合速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度变化方向相同,且气孔限制值增大,才可认为光合速率的下降主要由气孔因素引起;如果胞间CO<sub>2</sub>浓度和光合速率变化方向相反,气孔限制值减小,则光合速率下降归因于叶肉细胞同化能力的降低。

### 3.3 蒸腾速率分析

#### 3.3.1 不同土壤含水量下蒸腾速率的日变化分析

刺槐的蒸腾作用过程也表现出周期性变化特征,蒸腾的日变化一方面受到气象因子变化的影响,一方面与土壤的供

间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )等生理指标和环境因子如光合有效辐射(PAR)、空气温度( $T_{ar}$ )、空气相对湿度( $R_H$ )、空气CO<sub>2</sub>浓度、饱和水气压差( $V_{pdL}$ )及叶温( $T_l$ )等。

## 3 结果与分析

### 3.1 环境因子分析

环境因子的日变化如图1所示。

强烈的太阳辐射是引起一天中空气温度、相对湿度以及CO<sub>2</sub>浓度等一系列环境条件变化的根本原因<sup>[5]</sup>。试验区从上午8:00开始光合有效辐射持续上升,到14:00达到最高,为1 607.50 μmol/(m<sup>2</sup>·s),然后开始下降,在下午18:00降到最低。当光合有效辐射升高时,地面接收的光的辐射增多,能量增加,引起大气温度升高。气温的变化也是从8:00开始升高,到14:00达到最高,然后逐渐下降。随着光合有效辐射和气温的不断升高,空气相对湿度从上午8:00开始逐渐降低,12:00前后降到最低,为3.23%,然后缓慢回升。大气CO<sub>2</sub>浓度日变化呈“W”型曲线,经过夜间的富集,在早晨时较高,日出后随着植物光合作用的进行,逐渐降低,到12:00前后又出现高峰,然后又开始下降,14:00前后出现谷值,然后又开始回升。

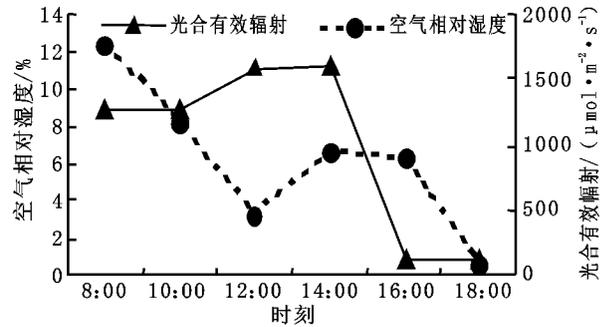


图1 环境因子的日变化

水密切相关。根据王力等<sup>[7]</sup>对土壤干层的等级划分,可以把土壤含水量为12%作为划分土壤干层的界限。从图3可看出,刺槐蒸腾速率的日变化曲线在12%的土壤含水量条件之上呈“双峰”曲线,符合蒸腾速率成双峰形变化的规律,究其原因是在春夏季土壤水分含量充足,无水分亏缺蒸腾作用都有两个较强的主峰;低于12%的土壤含水量下刺槐的蒸腾速率变化接近抗旱能力强的针叶树种的蒸腾速率规律,只有一个较强主峰。高含水量相对应的林木具有较高的蒸腾速率,在低水平的土壤含水量时,林木蒸腾速率的日变化相差不大,都维持在很低的水平。因此,刺槐蒸腾速率的日变化曲线是单峰型还是双峰型决定于土壤水分条件。

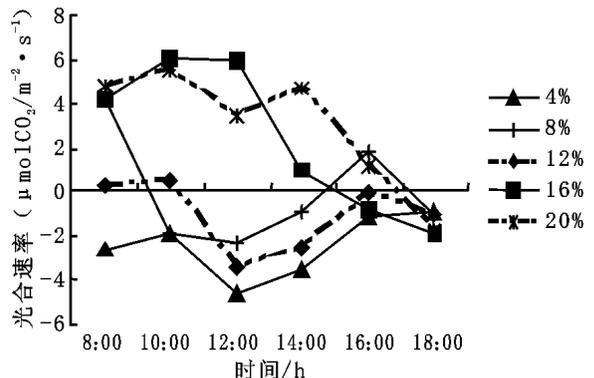


图2 不同土壤含水量下光合速率的日变化

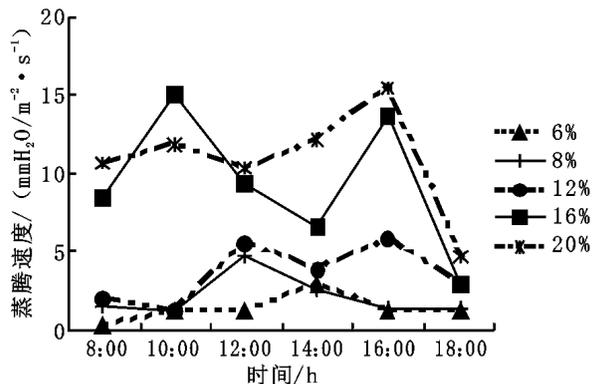


图 3 不同土壤含水量下蒸腾速率的日变化

3.3.2 不同月份典型日的蒸腾速率的变化分析

从不同季节典型日的测定结果分析(表 2), 刺槐自 5 月中旬发叶后, 随着气温的升高, 生长加速, 蒸腾强度逐渐增强, 7 月份达到最大值, 其蒸腾速率达 4.232 6 mmolH<sub>2</sub>O / (m<sup>2</sup> · s), 8 月份气温高, 降水少, 限制蒸腾作用的进行, 蒸腾

表 1 2004 年刺槐生长季上下旬部分蒸腾速率的测定

时 间	5 月 26 日	6 月 8 日	6 月 28 日	7 月 10 日	7 月 27 日	8 月 6 日	8 月 26 日	9 月 7 日	9 月 22 日	10 月 12 日
蒸腾速率/ (mmolH <sub>2</sub> O · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup> )	2.3658	2.6589	3.5487	4.1474	4.2326	3.1963	4.0126	2.3698	1.2021	0.6778

表 2 刺槐蒸腾速率与环境因子之间的相关系数

	蒸腾速率	气温	叶温	空气相对湿度	光合有效辐射
蒸腾速率	1.000	0.871*	0.888*	-0.714	0.975*
气 温	0.871*	1.000	0.993**	-0.960**	0.847*
叶 温	0.888*	0.993**	1.000	-0.953**	0.885*
空气相对湿度	-0.714	-0.960**	-0.953**	1.000	-0.720
光合有效辐射	0.975**	0.847*	0.885*	-0.720	1.000

注: \*\* 在 0.01 水平上差异显著, \* 在 0.05 水平上差异显著。

$$T_r = -18.565 + 0.505T_a + 0.262R_H + 1.232 \times 10^{-3} P_{AR}, R^2 = 0.999$$

3.4 气孔状况的变化及其与环境因子的关系

气孔状况指标分别采用气孔阻力和气孔导度(气孔阻力的倒数表示)。气孔阻力是指一定温度下单位水蒸气量通过单位叶面积由叶肉扩散到叶外空气所需要的时间, 它与气孔的开度有密切关系<sup>[8]</sup>。在干旱胁迫下, 气孔运动的一个显著特点就是气孔关闭, 由于气孔关闭使植物蒸腾大幅度降低, 因而有利于植物保持体内的水分平衡。随着土壤含水量的降低, 苗木体内水分胁迫程度增加, 气孔开度减小, 气孔阻力增加。

刺槐气孔导度日变化呈“凹型”曲线, 如图 4 所示, 清晨随着光照的不断增强, 气孔受光线的影响而张开, 在 8:00 前后气孔导度出现峰值, 为 0.017 2 μmol / (m<sup>2</sup> · s); 之后由于气温升高增大了叶内外水汽压梯度, 强烈蒸腾引起气孔导度持续下降, 在 12:00 前后出现低谷值, 为 0.004 7 μmol / (m<sup>2</sup> · s); 蒸腾也因之减弱, 蒸腾的下降使叶肉细胞的含水量在午后得到一定程度的恢复, 从而又带来气孔导度的缓慢回升。气孔导度对环境因子的变化十分敏感, 凡是影响植物光合作用和叶片水分状况的各种因素都有可能对气孔导度造成影响<sup>[9]</sup>, 刺槐林也具有这个特点。

结合图 1 和图 4, 可以看出, 光对刺槐气孔导度的直接影响是短时间的。早上随着光照的加强, 刺激气孔开放, 引起光合和蒸腾的迅速上升; 随着太阳辐射的进一步增强, 气温上升而空气相对湿度下降, 使气孔部分关闭, 气孔导度下

速率开始下降, 8 月份之后继续平稳降低。6~7 月是刺槐蒸腾的高峰期, 这时正是刺槐旺盛生长阶段, 正值高温和干旱时期, 因此, 在这一时期能否有足够的分水收入对刺槐生长至关重要。

3.3.3 蒸腾速率与主要环境因子的关系

蒸腾作用和光合作用一样, 既受外界因子的影响, 也受植物体内部结构和生理状况的调节。光照是影响蒸腾作用的最主要的外界条件, 光对蒸腾的影响首先是引起气孔开放, 其次是提高大气和植物体的温度, 增加叶内外水汽压差而加速蒸腾。

研究蒸腾作用与环境因子之间的关系, 结果如表 3 所示, 刺槐蒸腾速率( $T_r$ )与气温( $T_a$ )、叶温( $T_l$ )空气相对湿度( $R_H$ )和光合有效辐射(PAR)之间具有显著相关关系。

从表中可以看出, 环境因子中光合有效辐射是影响刺槐蒸腾速率的主要因子。刺槐的蒸腾作用虽然受诸多环境因子的影响, 但各个环境因子对蒸腾作用的影响不是独立的, 而是综合作用于蒸腾作用, 因此进一步通过多元线性回归分析, 得出蒸腾速率与各环境因子之间的多元回归方程:

降比较明显。气孔导度的变化趋势基本与空气相对湿度的变化一致, 而与饱和水汽压差呈相反的变化趋势。这表明气孔的开张程度与湿度的关系更密切一些, 这与一些学者通过研究得出的结论一致<sup>[10]</sup>。光照强度并不是限制气孔导度变化的主要环境因子, 而土壤水分的亏缺则可能是最主要的环境限制因子。通过多元回归分析表明, 气孔导度与相对湿度显著相关, 呈二次曲线关系, 回归方程为:

$$S_i = 0.000155R_H^2 - 0.00105R_H + 0.006402, R^2 = 0.9958$$

式中:  $S_i$ ——气孔导度(μmol / m<sup>2</sup> · s),  $R_H$ ——相对湿度,  $R^2$ ——相关系数。

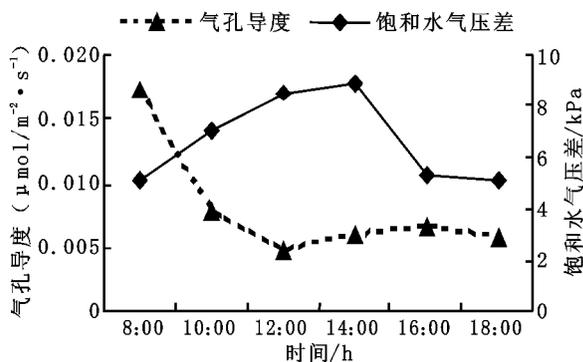


图 4 气孔导度与饱和水汽压差的日变化

4 结 论

太阳辐射是其它环境因子(空气温度、相对湿度以及 CO<sub>2</sub> 浓度等)发生变化的根本原因。各种环境因子相互作用引起了不断变化, 影响着植物光合作用和蒸腾作用的整个过程。

在较高的土壤水分条件下, 刺槐的光合作用较强, 而在较低的土壤水分条件下, 刺槐的生长没有足够的水分供应, 接近凋萎, 只有微弱的光合作用, 所以光合速率出现负值。

刺槐蒸腾的日变化受气象因子变化和土壤水分条件两方面的影响, 水分条件的优劣决定了刺槐蒸腾速率日变化曲线是单峰型还是双峰型。从刺槐的整个生长季来看, 6, 7 月份是

现为: 小雨强时差异规律性不是很明显, 当雨强为 53.95 mm/h 和 111.69 mm/h 时顺坡垄作的侵蚀率分别是平面耕作侵蚀率的 3.5~36 倍和 1.5~5.5 倍(见表 2), 这与蔡强国在红壤上得出的结果基本一致, 即顺坡耕作加大了土壤的侵蚀<sup>[3]</sup>。顺坡垄作由于其垄沟有汇水作用, 在相同的降雨强度下径流深远大于平面耕作条件下的径流深, 随着径流深增大, 径流对泥沙的作用力亦增大, 从而加大了土壤侵蚀<sup>[9]</sup>。而在大雨强时这种作用有可能减弱, 这是由于径流的水流携沙力不是无限增大的, 当径流携沙量达到饱和时, 土壤侵蚀率就会稳定在一个范围不会随着雨强无限增大。因此会出现大雨强时顺坡垄作加大土壤侵蚀的程度有所减弱。

表 2 两种耕作方式下地表的侵蚀率比较

雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	g/(min·m)					
	19.62		53.95		111.69	
坡度°	平面耕作	顺坡垄作	平面耕作	顺坡垄作	平面耕作	顺坡垄作
10	0.04	0.03	0.26	8.45	3.84	22.47
15	0.02	0.2	0.26	9.49	4.89	25.97
20	0.19	0.28	2.36	14.16	14.98	31.21
25	0.08	0.05	2.27	9.12	17.73	28.97

#### 参考文献:

- [1] 刘俊, 彭珂珊. 山地水平沟在黄土高原水土流失区的作用与地位[J]. 西北水资源与水工程, 1995, 6(3): 89-92.
- [2] 王鸿斌, 赵兰波, 等. 松辽平原玉米连作黑土不同耕作制度下土壤侵蚀特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 26-28.
- [3] 蔡强国, 马绍嘉, 等. 横厢耕作措施对红壤坡耕地水土流失影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 1994, 14(1): 49-55.
- [4] M A Choudhary, R Lal, W A Dick. Long-term tillage effects on runoff and soil erosion under simulated rainfall for a central Ohio soil [J]. Soil & Tillage Research, 1997, (42): 175-184.
- [5] 刘刚才, 高美荣, 等. 紫色土两种耕作制的产流产沙过程与水土流失观测准确性分析[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 108-111.
- [6] 王玉宽. 黄土丘陵沟壑区坡面径流侵蚀试验研究[J]. 中国水土保持, 1991, 5(2): 25-28.
- [7] 吴普特, 周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J]. 水土保持通报, 1993, 13(3): 1-5.
- [8] 王占礼, 黄新会, 张振国, 等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 1-4.
- [9] 汤立群, 陈国祥. 坡面土壤侵蚀公式的建立及其在流域产沙计算中的应用[J]. 水科学进展, 1994, 5(2): 104-110.

(上接第 332 页)

刺槐蒸腾的高峰期, 在这个阶段充足的水分条件十分重要。

刺槐蒸腾作用受环境因子综合作用的影响, 各环境因子之间也显著相关。刺槐蒸腾速率与气温、空气相对湿度和光合有效辐射之间的多元线性回归方程为:  $T_r = -18.565 + 0.505T_a + 0.262R_H + 1.232 \times 10^{-3}P_{AR}$ ,  $R^2 = 0.999$ , 相关系数达极显著水平, 三个环境因子中光合有效辐射是影响刺槐蒸腾作用的主导因子。

#### 参考文献:

- [1] 中国树木志编纂委员会. 中国主要造林树种(上册)[M]. 北京: 农业出版社, 1976. 631-641.
- [2] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用[J]. 林业科技开发, 2002, (5): 11-13.
- [3] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. 林业科学, 1996, 32(1): 78-85.
- [4] Saltier R O. Plant-water Relationships[M]. London and New York: Academic Press, 1967.
- [5] 张华, 郑培龙, 王百田. 黄土半干旱区土壤水分条件对刺槐蒸腾速率的影响[J]. 五夷科学, 2005, 21: 40-46.
- [6] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Ann. Rev. Plant Physiol., 1982. 33: 317-345.
- [7] 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): 89-90.
- [8] 王克勤, 王立. 不同土壤水分下金矮生苹果叶片蒸腾速率研究[J]. 西南林学院学报, 1999, 19(1): 8-13.
- [9] 王玉辉, 周广胜. 松嫩平原盐碱化草地羊草叶片生理生态特性分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 12-19.
- [10] 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(4): 817-823.

### 3 结论

采用人工模拟降雨方法对川中丘陵紫色土区两种典型耕作方式对土壤侵蚀的影响实验结论如下:

(1) 平面耕作与顺坡垄作下地表侵蚀随降雨历时的变化过程可以由对数的相关方程描述, 降雨初期随着降雨历时的增加而增大, 在产流开始后 20 min 侵蚀率就会停留在一个相对稳定的范围之内。顺坡垄作土壤侵蚀率的增长速率明显高于平面耕作。

(2) 在平缓坡度上, 平面耕作与顺坡垄作径流含沙量都有一个先开始减小然后保持稳定的趋势。当坡度变陡时顺坡垄作呈现先增大然后保持稳定的趋势。

(3) 平面耕作与顺坡垄作土壤侵蚀差异表现为: 小雨强时差异不明显, 随着雨强的增大顺坡垄作的侵蚀率可以达到平面耕作侵蚀率的 30 多倍, 但是在大雨强时这种影响有所减弱。

(4) 平面耕作的水土保持效益明显高于顺坡垄作, 而且耕作简单, 节省工序是一种比较实用的水土保持措施。