

小陇山林区日本落叶松人工林林冠截留特征

袁一超^{1,2,3}, 王得祥^{1*}, 刘小林^{2,3}, 蔺岩雄^{2,3}, 郑子龙^{2,3},

(1. 西北农林科技大学, 陕西 杨陵 712100; 2. 甘肃省小陇山林业科学研究所, 甘肃 天水 741022;

3. 甘肃小陇山森林生态系统定位研究站, 甘肃 天水 741022)

摘要:2011年4月—10月7个月在秦岭西段小陇山林区对25年生日本落叶松人工林共33次降水事件的林冠截留特征定位观测,期间,林外大气降水总量为951.30 mm,林冠截留率、树干茎流率、穿透率分别为16.63%、0.86%和82.51%;不同雨量级分析,穿透降水量和穿透降水率、树干茎流量和树干茎流率、林冠截留量均随着总降水量的增加呈递增趋势,而林冠截留率则随着大气降雨量和林内净降水量的增加呈递减趋势。比较相近雨量下的不同降雨强度林冠截流变化,降雨强度越大林冠截留量和截留率越小,表明持续时间较短强度大降雨,林冠截留量少,截留率亦小;强度小历时较长的降雨,截留量和截留率都大。当林外降水量 > 0.5 mm时才观测到林内穿透雨。树干茎流的变化幅度不大。

关键词:日本落叶松;林冠截留;穿透水;树干茎流

中图分类号:S718.5

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2013)06-0020-05

Characteristics of Canopy Interception of *Larix kaempferi* in Xiaolongshan Forest

YUAN Yi-chao^{1,2,3}, WANG De-xiang^{1*}, LIU Xiao-lin^{2,3}, LIN Yan-xiong^{2,3}, ZENG Zi-long^{2,3}

(1. Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Xiaolong Mountain Forest Science and Technology, Tianshui, Gansu 741022, China;

3. Forest Ecosystem Locational Research Station in Xiaolong Mountain, Tianshui, Gansu 741022, China)

Abstract:Based on the orientational observations from April to October 2011, canopy interception characteristics of 25 a *Larix kaempferi* plantation were studied in Xiaolong Mountain forest region. The results showed that in the total precipitation of 951.30 mm from 33 times observation, the canopy interception, the stemflow and the throughfall accounted for 16.63%, 0.86% and 82.51% of total precipitation, respectively. Based on analysis of different rainfall classes, the higher the rainfall class, the greater the throughfall and the stemflow and the interception, the greater the throughfall ratio and stemflow ratio, and the lower the interception ratio. Under similar rainfall conditions, the higher the rainfall intensity, the lower the interception and interception ratio. It indicated that the interception and interception ratio in rainfall of short duration and high intensity were lower than that in rainfall of long duration and low intensity. Throughfall was observed when precipitation >0.5 mm. The rangeability of stemflow was tiny.

Key words:*Larix kaempferi*; interception; throughfall; stemflow

森林与水分的关系及相互作用过程是当今森林生态学研究领域的核心问题之一^[1]。森林植被对水文过程的影响主要是通过林冠截留、地被物蓄水、土壤蓄水等层次来实现^[2]。林冠截留是森林对输入降

水发挥调节作用的起点,可使降雨在数量及空间上进行重新分配,也是土壤—植物—大气连续体(SPAC)水分循环的重要环节,国内外在林冠对降雨的截留分配方面开展了大量的监测研究^[3-8]。秦

收稿日期:2012-10-09 修回日期:2013-03-26

基金项目:甘肃省科技支撑计划项目(1104FKCE070)。

作者简介:袁一超,男,在读硕士,助理工程师,研究方向:森林生态。E-mail:547025141@qq.com

* 通信作者:王得祥,男,教授,博士,研究方向:森林生态。E-mail:Wangdx66@126.com

岭西段小陇山林区是甘肃省东南部重点天然林资源保护区,为长江流域与黄河流域的分水岭,是嘉陵江、渭河中上游重要的水源涵养林和甘肃省东南部重要的生态屏障,也是兼有我国南北气候特点的典型天然次生林区^[9-11]。日本落叶松(*Larix kaempferi*)是小陇山林区的主要造林树种,20世纪80年代以来,该区营造了大面积的日本落叶松人工林,该林区对于日本落叶松的研究多在造林技术、抚育管理、迹地更新等方面,而对林冠留、穿透降雨、树干茎流等水文过程未进行研究。研究该区日本落叶松人工林大气降水、林冠截留与树干茎流特征等水文状况,对小陇山林区日本落叶松人工林生态系统的水源涵养功能研究和科学经营具有重要意义。

1 观测区概况及研究方法

1.1 观测区域概况

研究区位于小陇山林业科学研究所试验基地乱石窖沟,是甘肃小陇山森林生态系统定位站主要研究区域,地理坐标 105°54'E,34°07'N,区域内山体较低,地形地势起伏小,海拔 1 565~2 019 m,年均气温 12.1℃;观测年(2011 年)的年降水量为 1 035 mm,降水主要集中在 7—9 月份,占全年降水量的 63.2%;为大陆性季风型气候。林冠截留试验设在流域内日本落叶松人工林的固定样地内,该人工林为 1987 年营造,试验点处在坡面中下部,坡度为 17°,土壤山地褐土;林龄 25 a,林分密度为 750 株·hm⁻²,平均树高 17.8 cm,平均胸径 18.7 cm,平均冠幅 5.3 m²;林下灌木较少,以草本为主。

1.2 研究方法

1.2.1 大气降水观测 在距离最近的林缘空旷地上放置自记雨量计以测定试验期间大气降雨量,同时,用距观测研究区 1 km 的气象站资料进行校正。

1.2.2 林冠截留、树干茎流观测 在林分中测设 30 m×30 m 固定标准样地,进行每木检尺,在样地内,分别选择林木分布均匀、林冠枝叶结构能代表林分平均水平的位置设置 6 个承雨槽(用铁皮制成:宽 20 cm,高 20 cm,长 120 cm),沿水平方向在树冠投影半径 1/2 处放置,测量每次降雨的穿透雨量。于每次降雨后测量降水的体积,再除以容器口径面积,算出林内穿透雨量。

在固定标准地内,按林木胸径进行 2 cm 分级,分别选择 16、18、20 径阶各 3 株立木作为径阶标准木进行观测。将橡皮管剖开后按 30°蛇形缠绕,用小钉子将收集管固定在树干上,并用密封胶将收集槽与树干缝隙密封,下接收集桶测量径流。分东西、

南北量取冠幅,求算树冠平均面积。

树干茎流按下式计算:

$$C = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{K_i} M_i \tag{1}$$

式中, C 为树干茎流量(mm); M 为单位面积上的树木株数; C_i 为每个径级树干茎流量(mm); M_i 为每个径级的树木株数; K_i 为各径级的树冠平均投影面积(m²)。

根据水量平衡法,在林冠层次内,存在如下水量平衡: $P_w = T + C + I$ (2)

其中: P_w 为总降水量(mm); T 为穿透雨量(mm); I 为林冠截留量(mm)。

观测时间为 2011 年 4 月至 10 月份。

2 结果与分析

2.1 降水输入与分配

根据 2011 年 4 月—10 月 7 个月的连续观测资料统计,总降水量为 951.3 mm,约占该年总降水量的 91.94%(表 1)。其中,林内的净降水量(包括穿透水和树干茎流)占 7 个月总降水量的 83.37%,达到 793.14 mm;林冠截留量为 158.18 mm,占 7 个月总降水量的 16.63%。进入日本落叶松人工林内的雨水绝大部分是穿透水,为 785.0 mm,占 7 个月总降水量的 82.51%;以树干茎流形式进入林内的水量为 8.16 mm,占 7 个月总降水量的 0.86%。日本落叶松人工林生态系统的降水分配的月变化曲线可以看出,林内的穿透水、树干茎流和林冠截留量随着降水量的增加而增加,林冠的截留率则随着降水量的增加呈下降趋势(图 1)。

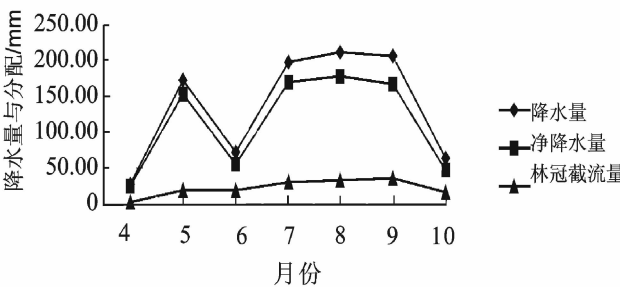


图 1 日本落叶松人工降水量的分配情况
Fig. 1 Distribution of precipitation of *Larix kaempferi* plantation

净降水率和林冠截留率成反方向变化。林内净降水率以 10 月最小为 74.89%。4 月最大为 90.06%;而林冠截留率 10 月最大为 25.11%,4 月最小为 9.94%。各月的树干茎流也有一定的变化,但其总量非常小,在降水量最大的 8 月份,月茎流量也仅为 2.08 mm(图 2)。

表 1 日本落叶松人工林降水输入及分配情况

Table 1 Rainfall input and distribution of *Larix kaempferi* plantation

| 时间/月 | 降水量/mm | 穿透水 | | 树干茎流 | | 净降水 | | 林冠截流 | |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | 总量/mm | 百分比/% | 总量/mm | 百分比/% | 总量/mm | 百分比/% | 总量/mm | 百分比/% |
| 4 | 26.8 | 24.1 | 89.79 | 0.07 | 0.26 | 24.13 | 90.06 | 2.67 | 9.94 |
| 5 | 172.2 | 149.9 | 87.02 | 1.86 | 1.08 | 151.71 | 88.10 | 20.49 | 11.90 |
| 6 | 73.2 | 54.8 | 74.92 | 0.30 | 0.41 | 55.14 | 75.32 | 18.06 | 24.68 |
| 7 | 198.6 | 166.4 | 83.76 | 1.95 | 0.98 | 168.30 | 84.74 | 30.30 | 15.26 |
| 8 | 211.9 | 176.5 | 83.33 | 2.08 | 0.98 | 178.62 | 84.31 | 33.25 | 15.69 |
| 9 | 205.0 | 165.9 | 80.93 | 1.66 | 0.81 | 167.52 | 81.74 | 37.43 | 18.26 |
| 10 | 63.7 | 47.5 | 74.51 | 0.24 | 0.38 | 47.71 | 74.89 | 15.99 | 25.11 |
| 合 计 | 951.3 | 785.0 | 82.51 | 8.16 | 0.86 | 793.14 | 83.37 | 158.18 | 16.63 |

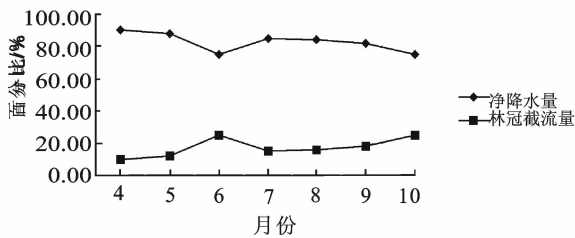


图 2 净降水率和林冠截流率的月变化
Fig. 2 Monthly variations of net precipitation and canopy interception

2.2 不同雨量降水输入及再分配

根据 33 次降雨过程整理而成的日本落叶松人工林平均降水再分配水量数据,对于不同降水量级来说,穿透降水量和穿透降水率、树干茎流量和树干茎流率都随着总降水量的增加而呈递增趋势,但树干茎流量较小;林冠截留量则随着大气降雨量和林内净降水量的增加呈递增趋势,而林冠截留率则随着大气降雨量和林内净降水量的增加呈递减趋势。观测 6 月 5 日在大气降雨量为 0.5 mm 时未产生林冠穿透水和树干茎流,即林冠截留率 100%(表 2)。

表 2 日本落叶松人工林不同降水量降水输入及再分配

Table 2 Precipitation input and redistribution in different precipitation of *Larix kaempferi* plantation

| 降水量 /mm | 降水次数 /次 | 平均降水量 /mm | 穿透水 | | 树干茎流 | | 净降水 | | 林冠截流 | |
|------------|------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 总量/mm | 百分比/% | 总量/mm | 百分比/% | 总量/mm | 百分比/% | 总量/mm | 百分比/% |
| <10 | 15 | 4.24 | 3.36 | 79.25 | 0.01 | 0.15 | 3.37 | 79.40 | 0.87 | 20.60 |
| 10~20 | 4 | 14.63 | 12.07 | 82.50 | 0.03 | 0.21 | 12.10 | 82.71 | 2.53 | 17.29 |
| 20~30 | 8 | 24.75 | 19.33 | 78.10 | 0.14 | 0.55 | 19.47 | 78.65 | 5.28 | 21.35 |
| 30~40 | 3 | 32.40 | 25.23 | 77.87 | 0.26 | 0.80 | 25.49 | 78.67 | 6.91 | 21.33 |
| 40~50 | 1 | 49.90 | 39.84 | 79.83 | 0.58 | 1.15 | 40.41 | 80.98 | 9.49 | 19.02 |
| 50~60 | 1 | 55.90 | 46.68 | 83.50 | 0.78 | 1.39 | 47.46 | 84.90 | 8.44 | 15.10 |
| >60 | 5 | 85.74 | 73.88 | 86.17 | 0.94 | 1.10 | 74.82 | 87.26 | 10.92 | 12.74 |

2.3 不同雨强降水输入及再分配

在不同的降雨强度下林冠截流率变化情况很明显,一般地,降雨强度越大截留率越小,在降雨强度很大,或降雨持续时间很长、林冠已饱和的情况下,则截留率趋于 0^[12]。表 3 选择了 7 月 7 日和 7 月 21 日大小接近的 2 次降雨量对比:7 月 7 日降雨量 27.0 mm,降雨强度 1.53 mm·h⁻¹,历时 17.6 h,截留量 8.90 mm;7 月 21 日降雨量为 29.1 mm,降

雨强度 11.64 mm·h⁻¹,历时 2.5 h,截留量为 3.38 mm。表明强度大持续时间较短的降雨,由于雨滴的冲击力较大,造成枝叶的摇晃,停留在枝叶表面的水滴容易往下滴,形成二次降雨,削弱了林冠截留的功能,林冠截留量少,截留率也小;强度小历时较长的降雨,截留作用得到充分的发挥,截留水分蒸发到大气的的时间也较长,因而增加了截留量和增大了截留率。

表 3 日本落叶松人工林降水不同强度降水输入及再分配比较

Table 3 Precipitation input and redistribution of different intensity precipitation of *Larix kaempferi* plantation

| 日期(月,日) | 降雨量 /mm | 降雨历时 /h | 降雨强度/ (mm·h ⁻¹) | 树干茎流量 /mm | 穿透水 /mm | 林冠截留量 /mm | 穿透率 /% | 径流率 /% | 林冠截 流率/% |
|---------|------------|------------|--------------------------------|--------------|------------|--------------|-----------|-----------|-------------|
| 7.7 | 27.00 | 17.60 | 1.53 | 0.105 | 18.00 | 8.90 | 66.65 | 0.39 | 32.96 |
| 7.21 | 29.10 | 2.50 | 11.64 | 0.160 | 25.56 | 3.38 | 87.83 | 0.55 | 11.62 |

3 结论与讨论

在秦岭西段小陇山林区日本落叶松人工林中龄

林分中,2011 年 4 月—10 月份的 7 个月林内的净降水量占总降水量的 83.37%,林冠年截留量占总降水量的 16.63%。进入日本落叶松人工林内的雨水

绝大部分是穿透水,占总降水量的 82.51%,以树干茎流形式进入林内的水量为 8.16 mm,占总降水量的 0.86%。林内的穿透水、树干茎流和林冠截留量随着降水量的增加而增加,林冠的截留率则随着降水量的增加呈下降趋势,净降水率和林冠截留率成反方向变化,林内净降水率以 10 月最小,为 74.89%,4 月最大为 90.06%;而林冠截留率 10 月最大为 25.11%。4 月最小为 9.94%。这可能是由于观测期内 4 月气温较低,日本落叶松的针叶刚萌发,郁闭度小,林冠截留率为观测期内最小值;5 月—6 月气温开始回升,枝叶缓慢生长,林冠截留雨水的的能力逐渐增强;6 月由于气候干旱,月降水总量较小且以小雨量为主,降雨强度小,所以,虽然表现为 6 月的林冠截留总量较少,但林冠截留率高;7 月—9 月,冠层生长旺盛,郁闭度大,林冠截留雨水的的能力有所增强,但由于降水量较大,多以中、大雨为主,且连续降雨的间隔时间短,所以,表现为虽然林冠截留量大,但林冠截留率随月降水量加大却相对低;10 月由于林冠的郁闭度大且降水量小,所以,表现为 10 月的林冠截留量虽小,但林冠截留率却高。这与 L. Schellekens^[13]等对北美洲热带雨林林冠截留研究结果一致。与周晓峰^[14]等关于对任何一种林分进行林冠截留量的实际观测,其结果都或多或少地受到一些因素的影响,所以用实测截留量就不能准确地反映出不同气候区不同林分的截留效果,用截留率能比较客观地反映出不同气候区不同林分截留降雨作用的大小等论述一致。

在小陇山日本落叶松 25 年生林分中,一次降雨低于 0.5 mm 时不产生林冠穿透水和树干茎流,即林冠截留率 100%,与刘春延^[15]观测塞罕坝地区 32 年生华北落叶松人工林,当林外降雨量小于 0.6 mm 时,林冠几乎截留了全部降水,没有产生穿透雨的结果一致;低于张学龙^[16]等研究云杉林冠截留临界值。0.8 mm 和高人^[17]等在辽宁东部山区油松、落叶松林等 5 种林分的林冠饱和截留量 2.75~6.4 mm,是由于日本落叶松针叶细小坚硬,截获的降水少,且其枝条大都从主干上水平伸出且在顶端稍向下垂,针叶截获的降水直接滴下成为穿透降水;另外,日本落叶松的树干茎流量很小,一般占降雨量的比例不到 1%,其主要原因是由于日本落叶松林冠截留量小、树皮粗糙而松软也具有一定的持水量。

参考文献:

[1] 高甲荣,肖斌,张东升,等. 国外森林水文研究进展述评[J]. 水土保持学报,2001,15(5):60-65.
GAO J R,XIAO B,ZHANG D S,*et al.* Review on forest hy-

drology study in world[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(5):60-65. (in Chinese)

[2] 王晓燕,鲁绍伟,杨新兵,等. 北京密云油松人工林林冠截留模拟[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(2):93-99.
WANG X Y,LU S W,YANG X B,*et al.* Canopy interception simulation of pine plantation in Miyun of Beijing[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science edition,2012,40(2):93-99. (in Chinese)

[3] 张建军,贺康宁,朱金兆. 晋西黄土区水土保持林林冠截留的研究[J]. 北京林业大学学报,1995,17(2):27-31.
ZHANG J J, HE K N, ZHU J Z. The study on the crown interception soil and water conservation forests in the Loess Plateau of western Shanxi[J]. Journal of Beijing Forestry University,1995,17(2):27-31. (in Chinese)

[4] 曾杰,郭景唐. 太岳山油松人工林生态系统降雨的第一次分配[J]. 北京林业大学学报,1997,19(3):21-27.
ZENG J, GUO J T. Study on the first distribution of precipitation by *Pinus tabulaeformis* plantation in the Taiyue forest region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1997, 19(3):21-27. (in Chinese)

[5] 鲍文,包维楷,何丙辉,等. 岷江上游油松人工林对降水的截留分配效应[J]. 北京林业大学学报,2004,26(5):10-16.
BAO W,BAO W K,HE B H, *et al.* Redistribution effects of tree canopy of the artificial *Pinus tabulaeformis* forest on precipitation in the upper stream of Minjiang River[J]. Journal of Beijing Forestry University,2004,26(5):10-16. (in Chinese)

[6] 赵鸿雁,吴钦孝. 黄土高原人工油松林林冠截留动态过程研究[J]. 生态学杂志,2002,21(6):20-23.

[7] IROUMÉ A,HUBER A. Comparison of interception losses in a broadleaved native forest and a *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) plantation in the Andes Mountains of southern Chile[J]. Hydrological Processes. 2002,16(12):2347-2361.

[8] 常志勇,包维楷,何丙辉,等. 岷江上游油松与华山松人工混交林对降雨的截留分配效应[J]. 水土保持学报,2006,20(6):37-40.
CHANG Z Y,BAO W K,HE B H,*et al.* Interception and distribution effects of mixed artificial *Pinus tabulaeformis* and *Pinus armandi* forests on precipitation in the upper reaches of Minajiang River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(6):37-40. (in Chinese)

[9] 安定国. 甘肃省小陇山高等植物志[M]. 兰州:甘肃民族出版社,2000.

[10] 马愿翔. 小陇山林林的可持续发展之路[J]. 甘肃林业,2006(5):21-23.

[11] 王一峰,张海栋,金杰强,等. 甘肃小陇山种子植物区系地理及多样性分析[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2007,43(5):75-76.
WANG Y F,ZHANG H D,JIN J Q,*et al.* The diversity and flora of spermatophyte in Xiaolong Mountain in Gansu[J]. Journal of Northwest Normal University: Natural Science, 2007,43(5):75-76. (in Chinese)

[12] 范世香,高雁,程银才,等. 林冠对降雨截留能力的研究[J]. 地理科学,2007,27(2):200-204.
FAN S X,GAO Y,CHENG Y C,*et al.* Rainfall-intercepting capability of forest canopy[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007,27(2):200-204. (in Chinese)

[13] SCHELLEKENS L, SCATENA F N, BRNIJNZEEL L A, *et al.* Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 225(3/4): 168-184.

[14] 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林水文效应[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 420-426.

ZHOU X F, ZHAO H X, SUN H Z. Proper assessment for forest hydrological effect[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 420-426. (in Chinese)

[15] 刘春延, 李良, 赵秀海, 等. 塞罕坝地区华北落叶松人工林对降雨的截留分配效应[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(3): 1-5.

LIU C Y, LI L, ZHAO X H, *et al.* Redistribution effects of tree canopy of *Larix principis-rupprechtii* plantation on precipitation in the upper stream of Saihanba Area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(3): 1-5. (in Chinese)

[16] 张学龙, 罗龙发, 敬文茂, 等. 祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应[J]. *山地学报*, 2007, 25(6): 678-683.

ZHANG X L, LUO L F, JING W M, *et al.* Study on the distribution effect of canopy interception of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains[J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(6): 678-683. (in Chinese)

[17] 高人, 周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型林冠层对降雨的再分配作用[J]. *辽宁农业科学*, 2002(1): 5-9.

(上接第 5 页)

[11] SACK L, PASQUET-KOK J. Leaf pressure-volume curve parameters[J/OL]. <http://prometheuswiki.publish.csiro.au>. Prometheus Wiki, 2011.

[12] 王孟本, 冯彩平, 李洪建, 等. 树种保护酶活性与 PV 曲线水分参数变化的关系[J]. *生态学报*, 2000, 20(1): 173-176.

WANG M B, FENG C P, LI H J, *et al.* The relationship between the activities of protecting enzymes and water parameters from pressure-volume curves in six tree species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 173-176. (in Chinese)

[13] 狄晓燕, 王孟本, 陈建文, 等. 杨树无性系 PV 曲线水分参数的研究[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(1): 1422-1428.

DI X Y, WANG M B, CHEN J W, *et al.* Study on water parameters with PV curves in eight Poplar clones[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(1): 1422-1428. (in Chinese)

[14] BARTLETT M. K, SCOFFONI C, SACK L. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis[J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(5): 393-405.

[15] BATTLETT M K, SCOFFONI C, ARDY R. *et al.* Rapid determination of comparative drought tolerance traits: using an osmometer to predict turgor loss point[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(5): 880-888.

[16] LENZ T I, WRIGHT I J, WESTOBY M. Interrelations among pressure-volume curve traits across species and water availability gradients[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 127(3): 423-433.

[17] 张建国, 李吉跃, 沈国舫. 树木耐旱特性及其机理研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000. 98-101

[18] 王迪海, 赵忠, 张彦. 黄土高原刺槐细根与土壤水分特征[J]. *西北林学院学报*, 2012, 27(1): 1-5.

WANG D H, ZHAO Z, ZHANG Y. The fine root of *Robinia pseudoacacia* and soil moisture in the Loess Plateau[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(1): 1-5. (in Chinese)

[19] 田胄, 左小容, 梁宗锁. 黄土高原 3 种优势种对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性评价[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(6): 18-23.

TIAN Z, ZUO X R, LIANG Z S. Responses and drought resistance of three dominant species to soil water stress from Loess hilly region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(6): 18-23. (in Chinese)

(上接第 19 页)

[27] QIU D L, LIU X H, GUO S Z. Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of Longan[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 441-446.

[28] 余春珠, 温达志, 彭长连. 三种木本植物对酸雨的敏感性和抗性[J]. *生态环境*, 2005, 14(1): 86-90.

YU C Z, WEN D Z, PENG C L. Sensitivity and resistance of three woody species to acid rain pollution[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(1): 86-90. (in Chinese)

[29] 张学星, 何蓉, 施莹, 等. 云南 13 种乡土绿化树种对 SO₂、NO₂ 气体反应的研究[J]. *西部林业科学*, 2005, 34(4): 41-46.

ZHANG X X, HE R, SHI Y, *et al.* Study on the reaction of 13 indigenous tree species for greening in Yunnan to SO₂ and NO₂[J]. *Yunnan Forestry Science and Technology*, 2005, 34(4): 41-46. (in Chinese)

[30] 黄雅娟, 张成君, 殷树鹏, 等. 兰州市大气中 SO₂ 对植物碳同位素组成的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(34): 15170-15171.

HUANG Y J, ZHANG C J, YIN S P, *et al.* Effects of atmospheric SO₂ on carbon isotope composition of plants in Lanzhou city[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(34): 15170-15171. (in Chinese)