

土壤温度对油松 (*Pinus tabulaeformis*) 树干液流活动的影响

徐军亮^{1,2}, 马履一^{2,*}

(1. 河南科技大学林学院, 河南 洛阳 471003; 2. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:为了弄清土壤温度对油松树干边材液流活动的影响作用,利用热扩散式边材液流测定系统(TDP-30)和自动气象站对油松边材液流速率和土壤温度等环境因子进行了为期一年的同步测定。结果表明,土壤温度对树干液流活动的影响,一方面与靠近植物最适吸水温度的土层有关,另一方面,与树种的根系分布特征有关。春季表层土壤温度对液流速率的影响最为显著,夏季深层土壤最大,秋季的最大影响土层间于春夏之间。10.0~14.9℃的土壤温度对油松树干边材液流活动的作用最为明显。土壤温度开始对油松液流活动起显著作用的温度阈值约为10℃左右。

关键词:油松;土壤温度;边材液流速率;温度阈值

文章编号:1000-0933(2008)12-6107-06 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Influence of soil temperature on sap flow of *Pinus tabulaeformis*

XU Jun-Liang^{1,2}, MA Lü-Yi^{2,*}

1 College of Forestry, He'nan University of Science and Technology, Luoyang He'nan, 471003, China

2 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6107 ~ 6112.

Abstract: Studies on the relationship between sap flow activities and major environmental factors have mainly focused on solar radiation; air temperature, air moisture, soil moisture and vapor pressure deficit, however, the effect of soil temperature were usually neglected. In fact, soil water may not be available to trees and thus leading to the potential loss of forest yield due to reduction of transpiration and photosynthesis by low soil temperature. Therefore quantified studies on the influence of soil temperature on sap flow are necessary. Accordingly, the sap flow velocity of *Pinus tabulaeformis*, soil temperature and other environmental factors were synchronously measured in one year with Thermal Dissipation Probe systems (TDP-30) and an automatic weather station. The results show that the soil layers in which soil temperature has strong effect on sap flow velocity are related with root distributions, and soil temperature conditions at which water could be easier absorbed. Soil temperature of surface layer has the most significant influence on sap flow activities in spring while that of deep layer in summer and middle layer in autumn. Furthermore, the effect of soil temperature on sap flow is most significant at 10.0–14.9℃, and the soil temperature threshold is about 10℃.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30371147);国家教育部高等学校博士点基金资助项目(20030022009);北京市自然科学基金资助项目(6052016);北京林业大学省部共建重点实验室基金资助项目(JD100220535)

收稿日期:2007-08-13; **修订日期:**2008-06-17

作者简介:徐军亮(1979~),男,河南人,博士,主要从事树木水分生理生态研究. E-mail: xjl_790626@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: maluyi@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30371147), Beijing Municipal Natural Science Foundation (No. 6052016), National Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20030022009), and the Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of education Project (No. JD100220535)

Received date: 2007-08-13; **Accepted date:** 2008-06-17

Biography: XU Jun-Liang, Ph. D., mainly engaged in water ecophysiology in trees. E-mail: xjl_790626@126.com

Key Words: *Pinus tabulaeformis* soil temperature; sap flow velocity; temperature threshold

生长在高海拔的针叶林容易遭受季节性土壤和空气冻结温度的影响。土壤冻结的深度、持续时间和空气低温的持续时间一样,在很大程度上受到冰雪覆盖分布的影响,呈现一定的时空变化,进而影响着造林生产实践^[1,2]。冬季,土壤和空气低温以及过量的光照等胁迫因子的联合作用会严重的削减净光合生产能力^[3~5]。春季和初夏植物净光合生产能力的恢复主要依赖于温度,许多研究表明,空气温度和恢复速率之间呈现极显著相关关系^[6,7]。然而,在土壤解冻前,松类树种的净光合生产能力却不能得到恢复,这可能与土壤温度影响树体水分动态的机制有关^[3,8]。影响树体液流动态的因子有多种,地上部分的大气饱和水气压亏缺使得根系与大气之间形成了一个水势梯度,从而对蒸腾作用起到了非常重要的作用。地下部分水分的吸收通常受土壤干旱的限制,而土壤含水量的多少,一方面与降水量和土壤水分流失量有关,另一方面则与土壤温度影响水分的蒸发和冻结有关。土壤高温在加速土壤蒸发的同时,容易使植物根系灼伤,根系的自保护作用限制了水分的吸收。土壤低温提高了水分的粘滞度和膜透性^[9],从而降低了土壤和植物的水力导度,使得根系吸水减少^[10],同时也阻碍了新的细根生成。

目前,冻土对苗木和幼树水分关系和气体交换的抑制作用已成为多数研究的焦点,但多是在实验室条件下进行的^[11~14]。Schwarz 等的研究发现^[15],红云杉(*Red Picea rubens*)幼树的净光合作用对土壤温度变化的敏感性要大于空气温度,当温度在 10℃ 以下时,土壤温度和液流之间呈现极显著相关关系。这一研究清晰地阐明了土壤低温对 SPAC(soil-plant-atmosphere continuum,土壤-植物-大气连续体)水流阻力提高的直接或间接作用。由于试验设计和试验树种间的差异^[16],土壤温度开始对光合和蒸腾作用起显著作用的温度阈值约为 10℃ 左右。由于这一温度阈值的变异,以及寒冷气候条件下针叶树种水分动态田间试验的缺乏,很难评价春季冻土对造林决策的作用,从而有可能降低森林生产力。本文对林分条件下土壤温度对油松树干液流活动的影响作用进行了分析,力求找到对树液萌动起显著作用的土壤温度阈值,以期春季冻土条件下的造林决策提供一定的理论依据。

1 试验地概况

在北京西山林场(E116°25', N 39°54')的油松纯林内开展本研究。该地区属温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润。年平均气温 12.8℃,年均有效积温 4 500℃ 以上,年平均降水量在 600mm 左右,其中 7、8、9 月 3 个月份降水量占全年的 70% 以上。年平均蒸发量约为 1 800 ~ 2 000mm。试验林地 48 年生的人工林,位于低山,海拔约 170m,坡度 16°。土壤以砂页岩坡积物上发育而成的山地粗骨褐土和山地淋溶褐土为主,土层厚度多在 80cm 左右,壤土或沙壤土,通气透水性较好。现有林分多为 20 世纪 50 ~ 60 年代营造的人工林,有侧柏(*Platyclusus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、元宝枫(*Acer truncatum*)、黄栌(*Cotinus coggygia* var. *cinerea*)等树种,林相整齐,生长良好。林下灌木阴坡以三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、大花溲疏(*Deutzia grandiflora*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)和蚂蚱腿子(*Myrica dioica*)等为主,阳坡以荆条(*Vitex* var. *heterophylla*)和酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)为主。

2 研究方法

在林分调查的基础上,于 2005 年 2 月在油松纯林内选择有代表性的生长良好的林分平均木作为被测单株($D_{1.3}$ (胸径) = 16.5cm, H (树高) = 6.7m),在树干基部 1.3 m 左右(要求测定部位 ± 50 cm 内无节疤或损伤)插入热扩散式边材液流探针(TDP-30, Thermal Dissipation Probe, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, U. K.)测定树木的边材液流速率。探针的安装及测定原理详见 Granier^[17]和王华田^[18]。将 TDP 馈线与数据采集器(DI2e Data Logger, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, U. K.)连接,用以自动采集和记录液流数据。另外,利用自动气象站(WS-UM, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, U. K.)同步监测土壤温度(土壤深度分别为 5cm, 15cm, 35cm 和 65cm)等环境因子。数据采集间隔期为 10min(每 5min 测定 1 次,取其平均值进行记录)。

根据 Delta-T (U. K.) 公司提供的数据处理软件计算树干边材液流速率,利用逐步回归分析剔除太阳辐射,空气温湿度等环境因子对树干液流活动的影响作用,利用 SPSS12.0 软件对土壤温度和边材液流速率的统计关系进行分析处理。

3 结果与分析

3.1 不同土层温度对油松树干液流活动的影响

对不同季节晴天条件下 5、15、35cm 和 65cm 土层深度的土壤温度和油松树干边材液流速率的相关关系进行了分析,结果表明(表 1)不同季节影响油松边材液流速率变化的土壤温度层次是有差异的。春季,液流速率与表层(5cm)土壤温度的相关性更为显著,液流速率随着土壤温度的增加而增加,这种正相关效应随着土壤深度的增加而逐渐减弱;夏季,液流速率与深层(35cm 或 65cm)土壤温度的相关性更为显著,液流速率随着土壤温度的增加而降低,这种负相关效应随着土壤深度由深到浅而逐渐减弱;秋季,液流速率与中层(35cm 或 15cm)土壤温度的相关性更为显著,液流速率多随着土壤温度的增加而降低。总的来说,土壤温度对液流速率的影响,春季以表层土壤为最大,夏季深层土壤最大,秋季的最大影响土层间于春夏之间。

植物从温暖土壤中吸水要比冷凉土中吸水更容易,根生长的最适土温为 20~25℃^[19]。从表 2 可以看出,春季表层土壤温度最高(高出其它土层大约 0.75~2.24℃),即最靠近根系吸收水分和生长的最适温度,所以春季表层土壤温度对液流速率的影响最为显著。夏秋两季土壤的平均温度都处于根系最适生长温度范围,此时所研究大树的根系主体分布范围(多在 35cm 左右)则成为影响树木吸水多少的主要因素,油松为深根性树种,所以能从深层土壤中吸到更多的水分,另外,夏季白天 5cm 和 15cm 土壤温度均较高,所以土壤更容易吸收 35~65cm 土层的水分。随着秋季太阳辐射对表层土壤增温作用的减弱,最适宜植物吸收水分的土壤层次逐渐上移至 15~35cm 之间。同时,通过表 1 可以看出,在春季土壤解冻时期,5cm 土层(表层土壤)温度对树干液流活动的影响最为剧烈,所以在以下的分析中,主要就春季 5cm 土层温度与树干液流活动之间的关系展开分析。

表 1 不同土层温度与油松树干边材液流速率间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between soil temperatures and sap flow velocities of *P. tabulaeformis*

季节 Season	5cm	15cm	35cm	65cm
春季 Spring (n=864)	0.761 **	0.582 **	0.158 **	0.153 **
夏季 Summer (n=1584)	-0.085 **	-0.264 **	-0.335 **	-0.338 **
秋季 Autumn (n=864)	-0.054	-0.196 **	-0.200 **	-0.162 **

** $\alpha = 0.01$

表 2 研究期内各土层温度的均值(℃)

Table 2 Averaged soil temperatures in different soil depths in research days(℃)

季节 Season	5cm	15cm	35cm	65cm
春季 Spring	13.09	12.34	11.64	10.85
夏季 Summer	23.54	22.75	21.81	20.49
秋季 Autumn	19.21	19.08	19.37	19.73

3.2 不同土壤温度梯度与油松树干液流活动的相关关系

为了更加清晰的了解表层土壤温度对油松树干液流瞬态变化的影响,将土壤温度划分为 5.0~9.9℃; 10.0~14.9℃; 15.0~19.9℃; 20.0~24.9℃ 和 25.0~29.9℃ 等 5 个等级,利用相应温度区段两者的变化值来进一步分析不同土壤温度梯度对油松树干液流活动影响的差异。

结果表明,不同土壤温度梯度与油松树干液流速率之间的相关关系均达到了极显著水平,但对液流活动的影响强弱是有明显差异的(表 3)。当土壤温度处于 5.0~9.9℃ 之间时,两者之间的相关性最差;当土壤温度处于液流活动的最适温度区间(15.0~24.9℃)时,两者之间的相关性也较差;而当土壤温度处于 10.0~14.9℃ 之间时,土壤温度对液流活动的作用则最为明显,两者间的相关系数达到了 0.868。这一结果说明,树干液流年活动周期内土壤低温(10.0~14.9℃)对液流活动的影响要明显大于其他温度梯度。

进一步分析得知,在液流开始启动的 3 月 18 日和液流活动趋于停止的 11 月 28 日,土壤温度的日平均值分别为 9.16℃ 和 10.14℃,所以在 5.0~9.9℃ 的温度区间内油松树干液流的活动是非常微弱的,显然,两者之

间的相关性最差也是非常正常的。当土壤温度处于 10.0 ~ 14.9℃ 之间时,土壤溶液的粘滞度和水分膜透性开始提高,从而降低了土壤和植物的水力导度,使得根系吸水减少,液流传输的速度也随之减慢,此时土壤温度成为限制液流活动的主要环境因子,所以土壤温度与液流速率的相关性也最强。

表 3 不同土壤温度梯度与油松树干液流活动的相关关系

Table 3 Correlation between soil temperature grads and sap flow velocity of *P. tabulaeformis*

土壤温度梯度 Soil temperature grads	5.0 ~ 9.9℃	10.0 ~ 14.9℃	15.0 ~ 19.9℃	20.0 ~ 24.9℃	25.0 ~ 29.9℃
样本量 Sample quantity	297	297	297	297	297
相关系数 Correlation coefficient	0.193 **	0.868 **	0.383 **	0.257 **	0.444 **
显著性水平 Significance level	Sig. = 0.001	Sig. = 0.000	Sig. = 0.000	Sig. = 0.000	Sig. = 0.000

3.3 影响油松树干液流活动的土壤低温阈值

进一步分析发现(图 1),当土壤温度间于 5 ~ 15℃ 之间时,土壤温度和油松树干液流速率之间基本遵从指数函数关系。其函数关系式可表达为:

$$y = 0.00000104e^{0.4498x} (r=0.927)$$

式中, y 表示油松树干液流速率 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$), x 表示土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$), $x \in [5, 15]$ 。

通过微分方程求解得知,该曲线不存在拐点,只能大致描述这一曲线的特征。即:当土壤温度位于 10℃ 左右时,油松的树干液流速率开始明显上升,而在 10℃ 以下时变化不大。所以可以将 10℃ 左右作为影响油松树干液流活动的土壤低温阈值。

4 讨论

不同土层温度以及不同土壤温度梯度对油松树干液流活动的影响都呈现很大差异,这是自然界物种长期进化适应的结果。土壤水分是液流活动的“源”,土壤

温度对土壤水分的有效性有着重要的影响,决定着根系的吸水能力及其生理活动。也就是说,土壤温度不是影响液流活动的直接因子,但对液流的活动有着重要的影响,尤其在土壤冻结初期和解冻时期。

在国内的相关研究报道中,除个别研究^[20~24]外,多数研究认为土壤温度不是影响液流活动的主要因子。在本研究的初期,利用日平均土壤温度和日平均树干边材液流速率分析了一个完整年周期变化过程中两者之间的关系(图 2),也得出了相似的结论,即:油松树干边材液流速率的年变化特征与土壤温度的峰型变化特征完全不同,土壤温度的年变化特征呈现明显的峰型特征,而液流速率年变化的峰型特征却不明显(图中春季液流速率的突增特征与空气温度的异常变暖有关)。从多数研究的研究日期来看,多处于 5 ~ 9 月份,即集中在树木生长的旺盛季节,在郁闭度较大的林分中,林下土壤温度并不直接限制根系对土壤水分的吸收,而主要通过加速蒸发对液流活动造成一些间接影响,所以认为土壤温度不是影响液流活动的主要因子。也就是说,这些研究忽略了土壤温度对液流活动起关键作用的时段,即冬季土壤冻结时期和春季土壤解冻时期。从另一个角度来讲,液流活动主要受气象因子(尤其是太阳辐射)的影响,呈现非常明显的日变化峰型特征,而土壤温度的变化相对平缓得多,利用瞬间变化值代替日平均值来衡量两者间的关系,可能更为恰当些。

研究表明^[25],土壤的冻结温度均低于 0℃,在土壤含水率、含盐量相同的情况下,土壤冻结温度由高到低依次为砂壤土、轻壤土、黏土。高鹏程等^[26]在陕西省米脂县的研究结果表明,土壤温度小于 12.585℃ 时,水的粘滞度较大,水分子能态和有效性较低。Schwarz^[16]和 Kramer^[17]认为,由于试验设计和试验树种间的差异,土

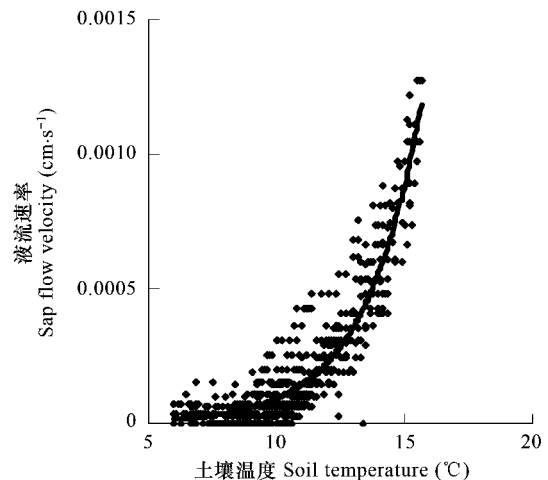


图 1 土壤低温和油松边材液流速率的关系

Fig. 1 Relationship between low soil temperature and sap flow velocity of *P. tabulaeformis*

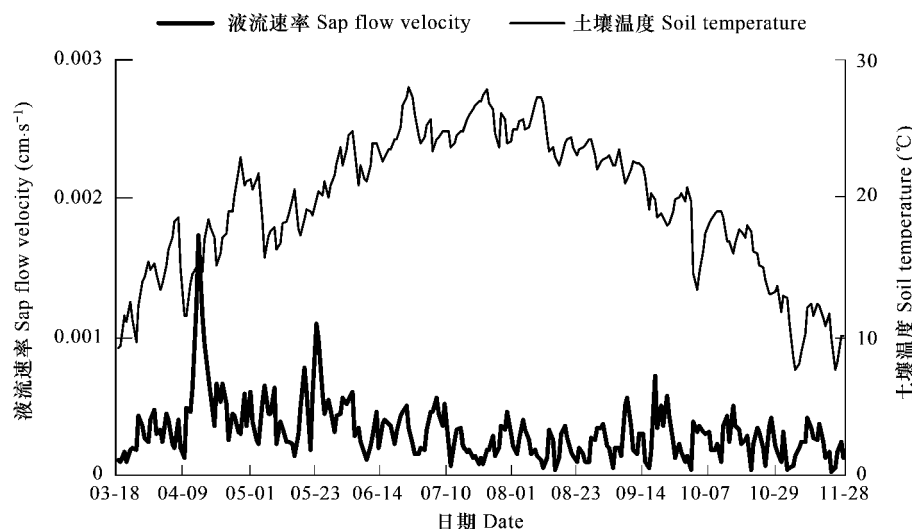


图2 土壤温度和油松树干液流的年变化

Fig. 2 Annual change of soil temperature and sap flow of *P. tabulaeformis*

壤温度开始对光合和蒸腾作用起显著作用的温度阈值约为 10℃ 左右,本研究与之相一致。这说明,显著影响树干液流活动的土壤温度区段,并不在冰点左右,而与影响水分子能态和有效性的温度等有关。由此也从侧面体现了土壤温度对树干液流活动的影响的间接性。土壤温度一方面通过影响根系层吸水温度,进而改变植物的水力导度而起作用,另一方面,土壤温度通过影响土壤的孔隙结构和供水性能,从而进一步影响土壤中水的运动特性以及水分的有效性,最终影响植物的蒸腾^[27]。

References:

- [1] Ångström A. soil temperature in forest stands of different crown density. Meddelanden Från Statens Skogsförsöksanstalt, 1936, 29:187—218.
- [2] Pierce R S, Lull H W, Stotey H C. Influence of land use and frost condition on soil freezing and snow depth. For. Sci., 1958, 4:246—263.
- [3] Troeng E, Linder S. Gas exchange in a 20-year-old stand of Scots pine. I. Net photosynthesis of current and 1-year-old shoots within and between seasons. Physio. Plant, 1982, 54:7—14.
- [4] Hällgren J E, Strand M, Lundmark T. Temperature stress. In: Physiology of Trees. Wiley Press, 1991.301—355.
- [5] Strand M, Lundmark T. Effects of low night temperature and light on chlorophyll fluorescence of field-grown seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Tree Physiol., 1987, 3:211—224.
- [6] Lundmark T, Hällgrén J E, Hedén J. Recovery from winter depression of photosynthesis in pine and spruce. Trees, 1988, 2:110—114.
- [7] Lundmark T, Bergh J, Strand M, Koppel A. Seasonal variation of maximum photochemical efficiency in boreal Norway spruce stands. Trees, 1998, 13:63—67.
- [8] Linder S, Troeng E. Photosynthesis and transpiration of 20-year-old Scots pine. Ecol. Bull., 1980, 32:165—181.
- [9] Kaufmann M R. Leaf water stress in Dngelmann Spruce; influence of the root and shoot environments. Plant Physiol., 1975, 58:841—844.
- [10] Kramer P J, Boyer J S. Water relations of plants and soil. SanDiego:Academic Press, 1995. 123—130.
- [11] Grossnickle S C. Planting stress in newly planted jack pine and white spruce. Factors influencing water uptake. Tree Physiol., 1988, 4:71—83.
- [12] Day T A, heckathorn S A, Delucia E H. Limitations on photosynthesis in *Pinus taeda*. at low soil temperatures. Plant Physiol., 1991, 96:1246—1254.
- [13] Pavel E W, Fereres E. Low soil temperatures induced water deficits in olive (*Olea europaea*) trees. Physiol. Plant., 1998, 104:525—532.
- [14] Wang Y, Zwiazek J J. Spring change in water relations, gas exchange and carbohydrates of white spruce (*Picea glauca*) seedlings. Can. J. For. Res., 1999, 29:332—338.
- [15] Schwarz P A, Fahey T J, Dawson T E. Seasonal air and soil temperature effects on photosynthesis in red spruce (*Picea rubens*) saplings. Tree Physiol., 1997, 17:187—194.
- [16] Kramer P J. Species differences with respect to water absorption at low soil temperatures. Am. J. Bot., 1942, 29:828—832.

- [17] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.*, 1987, 3:309—320.
- [18] Wang H T, Ma L Y. Measurement of whole tree's water consumption with thermal dissipation sap flow probe (TDP). *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6):661—667.
- [19] Li J W. Forest ecology. Beijing: China Forestry Press, 1994. 121.
- [20] Zheng H Z, Zhu J M, Li S Z, *et al.* Sap flux density of *Pinus Massoniana* during growing season in the soil erosion area of Changting County. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 2(2):21—29.
- [21] Yue G Y, Zhang T H, Zhao H L, *et al.* Characteristics of sap flow and transpiration of *Salix gordejewii* and *Caragan microphylla* in Horqin Sandy Land, northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10):3205—3213.
- [22] Zhang G H, Chen B F, Nie J Z, *et al.* *Castanopsis jianfengensis* sap flow and its relationships with environmental factors in tropical montane rainforest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4):742—748.
- [23] Zhang Y L, Guo H. Variations and environmental factors of *Castanopsis Fargesii* stem sap flow. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2007, 30(4):25—28.
- [24] Su W H, Zhang G F. The effect of soil and air temperature on photosynthesis and transpiration of *Primula sinopurpurea*. *Acta Bot. Boreal. Occident. Sin.*, 2002, 22(4):824—830.
- [25] Xing S Y. Experiment study on measurements of soil frozen Temperature. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35(4):385—387.
- [26] Gao P C, Zhang Y P, Zhang H, *et al.* Influence of temperature on soil water character. *Journal of Northwest Forestry University*, 2003, 18(1):77—79.
- [27] Liu S R, Wen G Y. Ecohydrological functions of forest ecosystems in China. Beijing: China Forestry Press, 1996.

参考文献:

- [18] 王华田, 马履一. 利用热扩散式液流探针(TDP)测定树木整株蒸腾耗水量的研究. *植物生态学报*, 2002, 26(6):661~667.
- [19] 李景文. 森林生态学. 北京: 中国林业出版社, 1994. 121.
- [20] 郑怀舟, 朱锦懋, 李守中, 等. 长汀水土流失区生长季马尾松树干液流密度特征. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(2):21~29.
- [21] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征. *生态学报*, 2006, 26(10):3205~3213.
- [22] 张刚华, 陈步峰, 聂洁珠, 等. 热带山地雨林尖峰栲边材液流及其与环境因子的关系. *应用生态学报*, 2007, 18(4):742~748.
- [23] 张永利, 郭浩. 丝栗栲树干液流变化规律与环境因子影响. *气象与减灾研究*, 2007, 30(4):25~28.
- [24] 苏文华, 张光飞. 土壤温度与气温对紫花雪山报春光合作用和蒸腾作用的影响. *西北植物学报*, 2002, 22(4):824~830.
- [25] 邢述彦. 土壤冻结温度测定试验研究. *太原理工大学学报*, 2004, 35(4):385~387.
- [26] 高鹏程, 张一平, 张海, 等. 温度对土壤水分性状的影响. *西北林学院学报*, 2003, 18(1):77~79.
- [27] 刘世荣, 温远光著. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996.