

# 大青山南麓阳坡油松生长的适宜土壤水分环境研究

刘永宏<sup>1,2</sup>, 段玉玺<sup>2</sup>, 白育英<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010)

**摘 要:**在大青山南麓浅山地带的阳坡造林地,使用 Li-6400 便携式光合测定仪对不同土壤水分处理下的油松(*Pinus tabulaeformis*)苗木的光合生理参数进行了测定。为了确定适宜油松生长的土壤水分范围,研究了叶片净光合速率(Pn)、羧化效率(Ce)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)对土壤含水量(SWC)的响应过程,并探讨了在不同土壤水分状况下叶片光合作用的变化规律。研究表明:维持油松最佳 Pn 的 SWC 为 17.9%;维持最佳 WUE 的 SWC 为 14.66%;维持最佳 Ce 的 SWC 为 16.43%;油松的土壤水合补偿点为 3.74%,Tr 最大时的 SWC 为 18.7%。根据大青山南麓阳坡造林地的立地条件,选取维持最佳 WUE 的 SWC 临界值和维持最佳 Pn 70%相应的 SWC 作为油松生长的适宜土壤水分环境上下限,这一指标可量化为 10.85%~14.66%。

**关键词:**净光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率; 适宜土壤含水量

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)05-0069-04

## Study on Suitable Soil Moisture Condition for *Pinus tabulaeformis* on the Sunny Slope in Southern Foothill of Daqing Mountains

LIU Yong-hong<sup>1,2</sup>, DUAN Yu-xi<sup>2</sup>, BAI Yu-ying<sup>2</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** A Li-6400 portable photosynthesis system was used to measure a few of photosynthetic physiology parameters of *Pinus tabulaeformis* growing under different soil water contents (SWC) on the sunny slope in southern foothill of Daqing Mountains. In order to determine the range of suitable SWC of the tree species growth, the response processes of net photosynthesis rate (Pn), carboxylation efficiency (Ce), transpiration rate (Tr), water use efficiency (WUE) to different SWC were studied, and the rule of its photosynthesis under different SWC was explored. The results show that the soil water contents keeping optimum Pn and WUE, as well as Ce of *Pinus tabulaeformis* are 17.9% and 14.66%, as well as 16.43%, respectively; that soil water compensation point for hydration of the tree species is 3.74%, and the SWC causing the maximum Tr of that is 18.7%. In the light of site condition of the sunny slope, the SWC maintaining the best WUE of leaf and the SWC corresponding with the Pn which is equivalent to 70% of the best Pn can be chosen as the upper limit and the lower limit for the rang of suitable SWC. The general index can be quantified as 10.85%~14.66%.

**Key words:** net photosynthetic rate; transpiration rate; water use efficiency; suitable soil water content

大青山地处半干旱区,由于降水量小,土壤水分补给严重不足,而强烈的蒸发又使山地阳坡的土壤极度干旱,使林业生态建设和森林的可持续发展受到极大的限制。适宜植物材料的选择是区域生态建设首要考虑的问题,也是生态建设成败的关键;科学分析植物材料在不同土壤水分供应情况下的气体交换特

征,寻找出既能保证植物的生物生产力不受影响,又能使植物保持高水分利用效率的土壤水分,是准确把握适地适树、选树适地的根本途径,对不同地区的林业生态建设具有相当重要的现实意义。国内有关土壤水分与植物光合作用关系的研究已有诸多报道<sup>[1-5]</sup>。本文通过大青山南麓浅山地带阳坡地上主要

造林树种油松的几个光合生理参数对土壤水分响应规律的研究,总结有利于目标树种光合作用和提高水分利用效率的土壤水分供给水平,为大青山南麓阳坡立地的造林绿化和森林抚育管理提供理论依据和实践指导。

## 1 试验地概况

试验地位于大青山南麓,呼和浩特市古路板林场野马图作业区,地理坐标为东经  $111^{\circ}24'52''$ 、北纬  $41^{\circ}18'22''$ ,海拔 1 165 m,属于典型中温带大陆性半干旱季风气候。气候特点为:春季干旱多风;夏季温热、雨量集中、多阵雨天气;秋季气温剧降、雨量骤减;冬季漫长而寒冷、降水稀少。全年日照充足、气候干燥,降水少而集中;年平均降水量 300~400 mm,主要集中于 7—9 月,占年降雨量的 65% 左右;年蒸发量 1 800~2 300 mm,为全年降雨量的 5~6 倍。年均气温  $5.9^{\circ}\text{C}$ ,年极端最高值  $38.1^{\circ}\text{C}$ ,极端最低值  $-37.4^{\circ}\text{C}$ ;年均日照时数为 3 056.3 h,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温  $2\,800^{\circ}\text{C}$ ,无霜期为 120 d 左右。绝对无霜期为 100 d。试验地土层厚度一般为 0~80 cm,土壤以灰褐土为主,其质地紧密、有机质含量低,田间持水量平均为 24.35%;自然植被以草本为主,以石生针茅(*Stipa klemenzi*) + 本氏针茅(*Stipa bungeana*) + 冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.) 群落为主,其次有苔草(*Carex hancockiana* Maxim.)、冰草(*Agropyron cistatum* L. Gaertn.) 和铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料与水分处理

2010 年和 2011 生长季的 7 月下旬到 8 月上旬,在坡度为  $23^{\circ}$ 、造林密度为 1 999 株/hm<sup>2</sup> 的造林地上选取油松(12 a 生,2001 年植苗造林)4 株,以被选林木的树基为中心,在根部周围直径 2 m 的圆面边缘开挖深度为 80 cm 的沟槽,用塑料膜围封整个根部土体后再回填土封闭边缘,使根部形成类似花盆的形式。

用环刀法测定林地 80 cm 土层内(根系分布层)的土壤容重和田间持水量,以该土层内的土壤含水量为水分调控标准,提前 10 d 对根部土体设置不同的土壤水分梯度进行灌水。根据测得的土壤容重和田间持水量确定灌水量,之后用塑料膜覆盖地表,每隔 2 d 设 3 个重复,用烘干法测定一次土壤水分含量,并且用人工灌水的方法适时补水,使供试林木根部土体的水分梯度形成四级:Ⅰ级为充分供水,使土壤含水

量达到田间持水量(24.35%)的 80%~100%,平均 19%~24%;Ⅱ级为轻度水分胁迫,含水量达到田间持水量的 60%~80%,平均 15%~19%;Ⅲ级为中度水分胁迫,含水量达到田间持水量的 40%~60%,平均 10%~15%;Ⅳ级为严重水分胁迫,含水量达到田间持水量的 20%~40%,平均 5%~10%。

### 2.2 观测方法与数据处理

在连续 2 d 天气晴好状况下,测定时间在每天 10:30—11:30,此时段的太阳辐射强度一般为 1 000~1 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,正是一天最适宜光合作用的时间,所以除土壤水分影响之外,可认为其它环境因子对光合生理参数的影响较小。使用 Li-6400 便携式光合仪,测定植物的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度(Stomatal conductance,  $G_s$ )和细胞间  $\text{CO}_2$  浓度(Concentration of intercellular  $\text{CO}_2$ ,  $C_i$ )等光合参数。测定时,在树冠中部选取 3~4 片健康叶做测试材料,每次测定连续读取 6 个稳定数据取平均值,重复测定 3 次。瞬时叶片水分利用效率为净光合速率与蒸腾速率的比值( $P_n/T_r$ )<sup>[6]</sup>;羧化效率采用净光合速率与细胞间  $\text{CO}_2$  浓度的比值( $P_n/C_i$ )<sup>[7]</sup>。通过测定,分析上述光合作用各参数对不同土壤水分胁迫程度的响应规律,分析确定适宜油松生长的土壤水分范围。测试数据的统计计算和回归分析利用 Excel 和 SPSS 13.0 软件进行。

## 3 结果与分析

### 3.1 净光合速率与土壤含水量的关系

从图 1 中可以看出,当 SWC 较低时,油松的  $P_n$  随着 SWC 的增加而增加,并且增加的速率比较快,当 SWC 达到一定值时, $P_n$  的增加趋缓,但维持在较高水平;当 SWC 继续增加时, $P_n$  开始下降,表现为对土壤水分具有明显的阈值反应。数学模拟表明, $P_n$  随土壤水分的变化趋势符合二次三项式的形式, $P_n$  保持较高水平时的 SWC 范围为 14.9%~19.3%, $P_n$  达到最高时的 SWC 为 17.9%。

植物净光合速率为零时的临界土壤水势值或临界土壤含水量,称为水合补偿点<sup>[8]</sup>。一般认为耐旱性强的树种能够在很低的水势条件下进行光合作用,水合补偿点越低,表明植物在干旱条件下避免饥饿能力越强,因而忍耐干旱的能力也就越强<sup>[9]</sup>。根据表 1 中的拟合关系可得,在  $y=0$ ,即  $P_n=0$  时,油松的土壤水合补偿点为 3.74%,表明油松为很好的耐旱树种。根据以上结果,如果以达到最高  $P_n$  70% 以上水平作为林木生物生产力水平的基本要求,根据计算,其相应的土壤含水量最低应在 10.85% 以上。

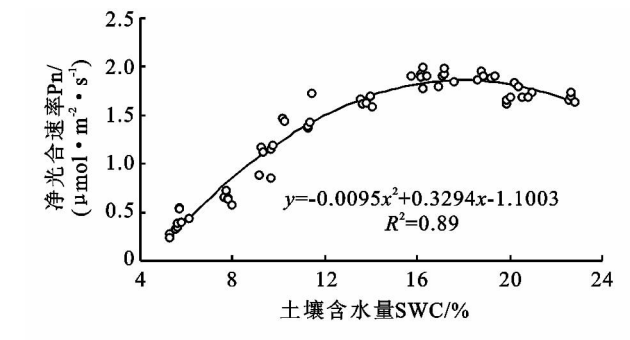


图 1 油松净光合速率与土壤含水量的关系

3.2 羧化效率与土壤含水量的关系

气孔是大气中 CO<sub>2</sub> 进入叶片的门户,由于大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度远低于植物光合作用的 CO<sub>2</sub> 饱和点<sup>[10]</sup>。所以,任何影响气孔导度的因素,必然影响 CO<sub>2</sub> 进入叶片的速率,从而影响 Pn 的高低。另外,CO<sub>2</sub> 的气体扩散与水气扩散阻力不同,除了受到叶面边界层阻力及气孔阻力外,还受到叶肉阻力的限制,即 CO<sub>2</sub> 由气相溶解于细胞的溶液介质中向叶绿体扩散的阻力,其倒数称之为叶肉导度或羧化效率。所以,植物 Pn 的大小除受气孔因素限制外,还受到叶肉光合能力等非气孔因素的限制。Ce 的大小反映了叶肉因素对 Pn 的影响程度,提高叶片的 Ce 有利于在减少水分蒸腾的情况下提高 WUE。从图 2 可以看出,随着 SWC 的增加,油松叶片的 Ce 上升较快,SWC 增加到一定临界值以后,Ce 由上升变为下降,表现为对土壤水分具有明显的阈值反应。Ce 与 SWC 的关系曲线符合二次三项式,由此计算出油松叶片 Ce 最高时的 SWC 临界值为 16.43%。

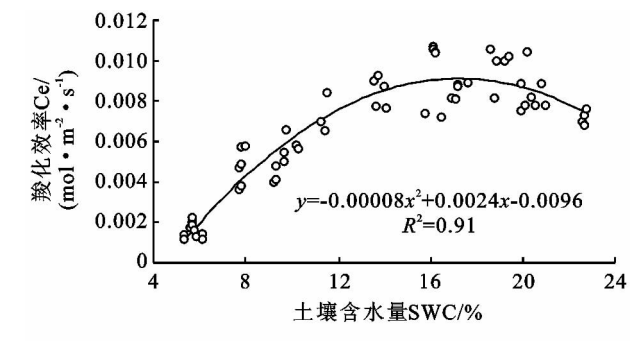


图 2 油松羧化效率与土壤含水量的关系

3.3 蒸腾速率与土壤含水量的关系

树种蒸腾作用的差异是外界环境因子和内在生理遗传因素综合作用的结果,在同一条件下,不同树种蒸腾的差异反映了树种间遗传特性的不同,这种特性为在降水量不同的地区选择适宜耗水量的树种提供了条件<sup>[11]</sup>。由图 3 可以看出,油松的 Tr 随 SWC 的增加近似线形增加,当 SWC 增加到一定临界值以后,Tr 开始下降,表现出对土壤水分具有明显的阈值

反应。经数学拟合,Tr 与 SWC 关系呈三次四项方程的形式,计算得出 SWC 在 18.7%时,油松的 Tr 达到最大值,之后 Tr 随 SWC 的增加呈下降趋势。油松的 Pn 在 SWC 为 17.9%达到最大,从这点看,维持油松最佳净光合速率和蒸腾速率的 SWC,应该在 17%~19%之间。

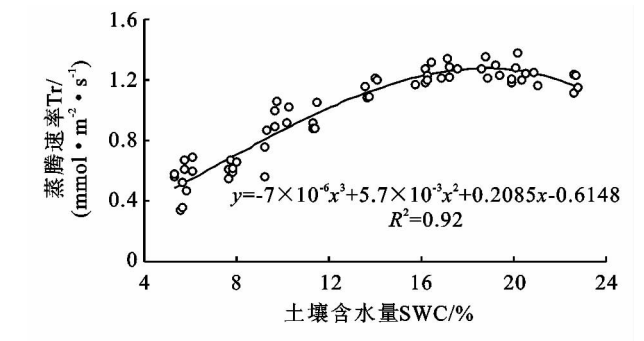


图 3 油松蒸腾速率与土壤含水量的关系

3.4 水分利用效率与土壤含水量的关系

在植物气孔开闭过程中,光合作用吸收 CO<sub>2</sub> 的过程同蒸腾作用水分消耗的过程是相反的。为了保持体内的水分平衡,植物需要通过根系从土壤中吸收大量的水分,而保水最好的途径就是关闭气孔,但是为了进行 CO<sub>2</sub> 气体交换,必须开放气孔。因此,植物为了吸收 CO<sub>2</sub> 就必须以蒸腾作用损失一定量的水分作为代价。很多研究认为,WUE 并非在水分充足时最高,适度的水分胁迫可促进水分利用效率,这是由于 Pn 随气孔导度的适度减小而下降的速度滞后于蒸腾速率 Tr 的下降速度,即由于蒸腾作用对水分胁迫的响应比光合作用敏感,蒸腾作用超前于光合作用下降,使 WUE 有所提高<sup>[12-13]</sup>。油松 WUE 与 SWC 的关系如图 4 所示,WUE 的变化趋势是先逐渐增大而后出现一个低谷,而后又缓慢增加,表现出近似“S”形的变化规律。经数学拟合,WUE 与 SWC 的关系呈三次四项式,计算得出,WUE 在 18.0%~22.0%之间出现一个低谷区;WUE 最高时,SWC 的临界值为 14.66%,对水分利用效率而言,此土壤水分对树木的有效性最高。

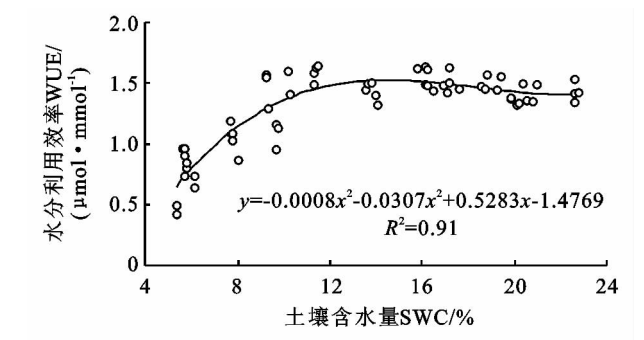


图 4 油松水分利用效率与土壤含水量的关系

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

植物光合作用的生理生态机制研究表明,植物用于光合作用的水仅为植物从土壤吸收或蒸腾失散的1%以下,其受到光照强度、空气中的 $\text{CO}_2$ 浓度、温度和土壤水分因子的综合影响<sup>[14]</sup>;Tr对气孔有较强的依赖性,而Pn除受气孔限制外,非气孔因素也起着相当重要的作用<sup>[15-16]</sup>。在本研究中,光照强度、空气中的 $\text{CO}_2$ 浓度和温度因子可以说是不变的,而在气孔因素同时变化的情况下,SWC是光合作用的唯一限制因子。因此,随着SWC的逐步增大,油松的Pn和Tr也同时增大,当SWC增大到一个临界值时,Pn达到最大,此时,SWC不再是光合作用的限制因子,同时气孔导度也已处于完全能满足光合作用的最佳状态,但并没有达到完全张开的地步;随着SWC继续增大,植物吸水导致气孔进一步张开,气孔导度的进一步提高使Tr还会增大,当SWC增大到高于Pn最大时的又一个临界值后,水分过多导致了土壤透气下降等不良条件的产生,影响了植物根系活性从而导致根系吸水受阻,Tr便开始下降。这便是导致Pn和Tr达到最大时SWC临界值存在差异的原因。

植物的WUE是Pn与Tr的比值,它体现了植物对其吸收水分的利用能力,从理论上讲,提高Pn,减少Tr是提高WUE的途径。在适度水分胁迫条件下,植物WUE的提高是以降低光合作用的同时更大程度地降低蒸腾作用而实现的<sup>[17]</sup>。有研究表明,植物降低生物生长量可以提高水分利用效率,适应干旱环境<sup>[18-19]</sup>。本研究中,WUE最大值出现与Pn和Tr最大值出现时的SWC临界值不一致,原因在于:随着SWC在一定范围内的逐步增大,Pn较Tr增长快一些,虽然这时的光合能力不是太强,Pn也较低,但WUE却较高;当SWC增大到一个临界值时,Pn与Tr的比值达到最大,但这一SWC临界值比Pn最大值出现时的SWC临界值低,只有这时植物才能使其WUE达到最佳,这是植物主动协调碳同化与水分消耗关系的结果,也是适应干旱环境的策略。

### 4.2 结论

油松Pn最高时的SWC临界值为17.9%;Ce最高时的SWC临界值为16.43%;Tr最大时的SWC临界值为18.7%;维持最佳WUE的SWC临界值为14.66%;光合作用的土壤水合补偿点为3.74%。Pn达到最大值的70%以上水平的SWC最低应在10.85%以上。大青山地处半干旱地区,降水量小,蒸发强烈,其南麓阳坡营造的人工林在天然水分补给的

条件下,主要目的不应是为了获得最高生物生产力,况且通常年份下也不可能达到充分供水以获得高产。莎仁图雅等<sup>[20]</sup>研究了大青山阳坡人工油松林地的土壤水分状况,结果表明根系分布层内生长季的土壤含水量一般在10.50%左右,相当于本研究中田间持水量的40%多一点,处于中度水分胁迫梯度范围内。这表明一定的水分胁迫没有显著影响林木的生长。

Pn是植物光合作用干物质积累程度的表征。就大青山油松人工林而言,保证一定水平的林木生物生产力亦是人类所期待的目标,而维持高效蒸腾以获得高产并不现实,提高林木的WUE才是经济而有效的途径。因此,把林木WUE最佳时对应的SWC临界值作为制定水分调控标准的最佳限值,对林木生长来说是最佳选择,对自然条件下造林地所能达到的水分供给水平来说则最具有资源利用的效益价值;考虑到大青山南麓阳坡造林地的立地条件,把油松Pn能够达到最佳Pn的70%作为生物生产力水平的基本要求较为合适,而其对应的土壤含水量临界值可作为制定水分标准的另一个界限值,对林木生长来说是现实条件下可预期的目标。

根据以上分析及油松的Pn, Ce, Tr, WUE与SWC关系的定量研究结果,可基本确定在大青山阳坡造林地油松生长的适宜土壤水分范围:选取维持最佳WUE的SWC临界值和能够达到最高Pn的70%以上所应达到的最低SWC作为油松生长的适宜土壤水分环境的高、低限值,则大青山南麓阳坡适宜油松生长的土壤水分环境条件可概化为10.85%~14.66%。

### 参考文献:

- [1] 张光灿,刘霞,贺康宁,等. 金矮生苹果叶片气体交换参数对土壤水分的响应[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 66-72.
- [2] 许振柱,周广胜,李晖. 羊草叶片气体交换参数对温度和土壤水分的响应[J]. 植物生态学报, 2004, 28(3): 300-304.
- [3] 田晶会,贺康宁,王百田,等. 黄土半干旱区侧柏气体交换和水分利用效率日变化研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(1): 42-46.
- [4] 田晶会,贺康宁,王百田,等. 不同土壤水分下黄土高原侧柏生理生态特点分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 175-178, 183.
- [5] 田晶会,贺康宁,王百田,等. 黄土半干旱区侧柏蒸腾作用及其与环境因子的关系[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(3): 53-56.
- [6] 刘昌明,王会肖. 土壤—作物—大气界面水分过程与节水调控[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

- [5] Porto P, Walling D E, Callegari G, et al. Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion in three small catchments in Southern Italy[J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2006, 6(5/6): 657-667.
- [6] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to sediment[J]. Catena, 1978, 5(1): 1-8.
- [7] Nozaki Y, DeMaster D J, Lewis D M, et al. Atmospheric  $^{210}\text{Pb}$  fluxes determined from soil profiles[J]. Geophys. Res., 1978, 83(8): 4047-4051.
- [8] Turekian K Y, Nozaki Y, Benninger L K. Geochemistry of atmospheric radon and radon products[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 1977, 5: 227-255.
- [9] Peirson D H, Cambray R S, Spicer G S. Lead-210 and polonium-210 in the atmosphere[J]. Tellus, 1966, 18: 427-433.
- [10] Fukuda K, Tsunogai S. Pb-210 in precipitation in Japan and its implication for the transport of continental aerosols across the ocean[J]. Tellus, 1975, 27(5): 514-521.
- [11] Guebuem K, Hussain N, Scudlark J R, et al. Factors influencing the atmospheric depositional fluxes of stable Pb,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^7\text{Be}$  into Chesapeake Bay[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2000, 36(1): 65-79.
- [12] Todd J F, Wong G T F, Olsen C R, et al. Atmospheric depositional characteristics of Beryllium-7 and Lead-210 along the southeastern Virginia Coast[J]. J. Geophys. Res., 1989, 94(D8): 11106-11116.
- [13] Baskaran M, Coleman C H, Santschi P H. Atmospheric depositional fluxes of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  at Galveston and College Station, Texas[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98(D11): 20555-20571.
- [14] 钱江初, 王星福, 徐征宇. 东海附近大气中  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  沉降通量[J]. 东海海洋, 1986, 4(1): 27-33.
- [15] Yang Yu-Hong, Yan Bai-Xing, Zhu Hui. Estimating soil erosion in Northeast China using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  [J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 706-711.
- [16] 王禹.  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  复合示踪研究东北黑土区坡耕地土壤侵蚀速率[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [17] 李俊杰, 李勇, 王仰麟, 等. 三江源区东西样带土壤侵蚀的  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  示踪研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(12): 1452-1459.
- [18] Zheng Jin-Jun, He Xiu-Bin, Walling D E, et al. Assessing soil erosion rates on manually-tilled hillslopes in the Sichuan Hilly Basin using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  measurements[J]. Pedosphere, 2007, 17(3): 273-283.
- [19] Zhang X, Qi Y, Walling D E, et al. A preliminary assessment of the potential for using  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  measurement to estimate soil redistribution rates on cultivated slopes in the Sichuan Hilly Basin of China[J]. Catena, 2006, 68(1): 1-9.
- [20] Zhang X B, Walling D E, Feng M Y, et al.  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  depth distribution in soil and calibration models for assessment of soil erosion rates from  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  measurements[J]. China Sci. Bull., 2003, 48(8): 813-818.

(上接第72页)

- [7] 邹琦. 作物抗旱生理生态研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1994.
- [8] 李吉跃. 太行山主要树种耐旱特性的研究(Ⅳ): 蒸腾作用与气孔调节[J]. 北京林业大学学报 1991, 13(增刊 2): 240-250.
- [9] 汤章城. 名词解释[J]. 植物生理学通讯, 1984(3): 71.
- [10] 王焘. 逆境胁迫过程中作物光合作用下降的气孔与非气孔行为的理论分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [11] 苏建平. 我国树木蒸腾耗水研究进展[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 177-179.
- [12] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70-76.
- [13] 徐世昌. 水分胁迫对玉米光合性能及产量的影响[J]. 作物学报, 1995, 2(3): 353-363.
- [14] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] Sharkey T D. Photosynthesis in intact leaves of  $C_3$  plant: Physiology and rate limitations[J]. Bot. Rev., 1985, 51(1): 51-105.
- [16] Tayler G E, Gunderson J. Physiological site of ethylene effects on carbon dioxide assimilation in *Glycine max* L Merr[J]. Plant Physiol., 1988, 86(1): 85-92.
- [17] 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 等. 水分胁迫下天然次生灌木山桃和山杏光合气体交换特征[J]. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2492-2499.
- [18] Torrecillas A, Galego R, Perez-Paster A, et al. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions[J]. The Journal of Agricultural Science, 1999, 132(4): 445-452.
- [19] 冯燕, 王彦荣, 胡小文. 水分胁迫对两种荒漠灌木幼苗生长与水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 293-298.
- [20] 莎仁图雅, 田有亮, 郭连生. 大青山区油松人工林土壤水分特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(3): 162-165.