

金矮生苹果水分利用效率研究

王克勤¹, 王斌瑞², 王震洪¹

(1. 西南林学院, 昆明 650224; 2. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要 通过对金矮生苹果 (*Malus pumila* CV. goldspur) 在不同土壤水分和光照条件下叶片光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r) 进行测定, 并计算水分利用效率 (WUE)。结果表明, 由于光合有效辐射 (PAR) 和土壤水分 (SWC) 决定了金矮生苹果 P_n 和 T_r , 从而影响到 WUE 。在水分胁迫存在时, 不同 SWC 条件下的 WUE 随 PAR 的变化规律相差较大, SWC 为 10% (田间持水量 FC 的 50% 左右) 时, WUE 最大值在所有土壤水分处理中居于最高 ($230 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$)。在水分供应充足时, 尽管 WUE 在达到最大值之后下降缓慢, 但最大值只有 $160 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$ 左右, 并且各 SWC 水平之间差异不显著, 模拟曲线基本重叠。 WUE 随 SWC 的变化与光照条件有关, 光强范围在 $500 < PAR < 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的 WUE 最高。气孔阻力 (R_s) 和叶水势 (Ψ_l) 分别为 $2.0 \text{ s}/\text{cm}$ 和 -3.0 MPa 时 WUE 最高, 但这时 P_n 较低, 不利于林木的正常生长和结实。从 WUE 、 P_n 和 T_r 综合考虑, 既能保证金矮生苹果有正常的光合作用, 又有利于提高水分利用效率的 R_s 和 Ψ_l 范围分别是 $2 \sim 6 \text{ s}/\text{cm}$ 和 $-2.1 \sim -1.65 \text{ MPa}$, 它们所对应的土壤含水率范围是 11% ~ 15%, 相当于田间持水量的 55% ~ 75%, 这一范围可以作为金矮生苹果田间供水的理论指标。

关键词 水分利用效率; 光合有效辐射; 土壤水分

The Water Use Efficiency of the Goldspur Apple Tree

WANG Ke-Qin¹, WANG Bin-Rui², WANG Zhen-Hong¹ (1. Southwest Forestry College, Kunming, 100083, China; 2. Beijing Forestry University, Beijing 730070, China). *Acta Ecologica Sinica* 2002, 22(5): 723 ~ 728.

Abstract After measuring the photosynthetic rate and transpiration rate of the leaves of seven-year field and two-year potted *Malus pumila* CV. Goldspur under different soil water and illumination conditions, together with the calculation of water use efficiency (WUE), the result showed that because photosynthetically active radiation (PAR) and soil water content (SWC) affected the photosynthetic rate and transpiration rate of Goldspur, they thus influenced WUE . The response of WUE to different illumination conditions had some relation to the soil water. When water stress existed, under different SWC conditions, WUE would change greatly with PAR . When SWC was approximately 10% (50% of field capacity - FC), the maximum WUE was the highest among all the soil water treatment and reached about $230 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$. When the water supply was adequate ($SWC > 15\%$), the maximum was only about $160 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$. The differences among SWC levels were not obvious and the simulated curves almost overlapped although WUE decreased slowly after reaching the maximum. This showed that when severe water stress existed, because photoinhibition occurred earlier and severely influenced photosynthesis, it made the decrease rate of photosynthetic rate faster than that of transpiration rate. The phenomenon of rapid decrease of WUE occurred when PAR was not high and severely influenced the increase of WUE .

With different SWC condition, WUE would change and this change was related to the illumination conditions. Under weak light ($PAR < 500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), the maximum WUE was relatively low and after it

基金项目 国家“九五”科技攻关资助项目(95-007-01-04); 云南省自然科学基金资助项目(1999D0013G)

收稿日期 2001-05-08; 修订日期 2002-04-10

作者简介 王克勤(1964~), 男, 甘肃庄浪人, 博士, 副教授。主要从事退化生态系统植被恢复的理论与技术研究。E-mail: kqwang@public.km.yn.cn

reached the maximum, the decrease rate was comparatively high, together with the increase of SWC. Under strong light ($PAR > 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), due to the photoinhibition, the maximum WUE was also relatively low, and the higher the light intensity was, the higher SWC was when the maximum occurred. WUE was the highest within the scope of $500 < PAR < 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Although WUE reached the maximum when SWC was 8% ~ 10%, trees were in severe water stress at this point and the photosynthetic rate was relatively low. The highest point of WUE couldn't be regarded as the basis of the determination of the optimum SWC. We should combine WUE with P_n and take the value of SWC that corresponded to the turning point of water response curve of P_n as the optimum water supply index. The curvature was the largest when SWC was about 14% and WUE was about $165 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$, which didn't greatly differ from the maximum.

Because the soil water condition determined the values of stomatal resistance (R_s) and leaf water potential (Ψ_1), R_s and Ψ_1 also had an influence on WUE. When R_s and Ψ_1 were $2.0 \text{ s}/\text{cm}$ and -3.0 MPa respectively, WUE was the highest but P_n was relatively low, which was not good for the normal growth and fruitage of trees. From the overall consideration of WUE, P_n and T_r , the scopes of R_s and Ψ_1 should be $2 \sim 6 \text{ s}/\text{cm}$ and $-2.1 \sim -1.65 \text{ MPa}$ respectively in order to guarantee the normal photosynthesis of *Goldspur* and improve WUE. The scope of the corresponding SWC was 11% ~ 15%, which was equal to 55% ~ 75% of FC and this scope could be used as a theoretical index of field water supply of *Goldspur*.

Key words: water use efficiency; photosynthetically active radiation; soil moisture

文章编号: 1000-093X(2002)05-0723-06 中图分类号: Q149, Q145 文献标识码: A

1966 年 Philip 就提出了较完整的土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 的概念^[1], 后来随着研究手段和测定技术的进步, 对 SPAC 有了更深入的研究^[2], 水分利用效率研究也随之步入一个新天地。植物叶片水分利用效率 (WUE) 作为植物体生理活动过程中消耗水形成有机物质的基本效率, 成为确定植物体生长发育所需要的最佳水分供应的重要指标之一^[3], 并且 WUE 理论被应用于农作物生产实践, 取得了一定的效果^[4~9]。然而, 对农作物水分利用效率的研究较多^[10, 11], 对林木的研究仍然较少, 致使大部分果树栽培地区仍普遍采用大水漫灌的用水方式, 影响了果实品质, 并造成水资源的严重浪费, 这尤其对我国西部大开发中改善生态环境、发展经济林木极为不利。本文通过对西部干旱半干旱地区栽植广泛的金矮生苹果 (*Malus pumila* CV. goldspur) 水分利用效率进行研究, 确定其合理的供水范围, 以期为经济林生产中实施节水灌溉提供理论依据。

1 试验地概况 见参考文献 [12]。

2 试验材料和方法

蒸腾速率 (T_r , $\mu\text{gH}_2\text{O}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) 用 LI-1600 型稳态气孔仪与光合速率同步测定。每个盆栽植株的观测样叶数为 3 片, 均为完全展开的成熟叶片。测定时间为 1996-06-22 和 1996-08-17。光合速率 (P_n) 和蒸腾速率 (T_r) 的光响应测定均在 P_n 和 T_r 值较高的时间段 (9:30 ~ 12:00) 进行。

气孔阻力 (R_s , s/cm) 用 LI-1600 型稳态气孔仪与蒸腾速率同步测定。测定时间 1996-08-17。

水分利用效率 (WUE, $\mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$) 即单位水量通过叶片蒸腾散失时光合所产生的有机物质质量, 取决于光合速率与蒸腾速率之比^[13]。

材料及其它方法详见文献^[12]。

3 结果与分析

3.1 环境因子对水分利用效率的影响

3.1.1 光照的影响 田间 7 年生金矮生苹果水分利用效率的计算结果表明 (图 1), 田间水分充足 (观测日 1996-08-19 的 SWC 为 15.01%), $PAR < 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, WUE 随光强的变化曲线符合抛物线, 当 WUE 达到最高点时则线性地缓慢下降, 这种变化趋势与他人在农作物上所做的试验相一致^[14]。

但是当土壤含水量差异大时, WUE 表现出不同的变化趋势 (图 2)。在 $SWC < 15\%$ (田间持水量 FC

的 75% 时,不同 SWC 间的差异较大,随着 SWC 的降低, WUE 最大值出现的 PAR 越小,最大值之后下降速度越快。SWC 为 10%(50% FC)左右时, WUE 最大值在所有土壤水分处理中居于最高,大约达到 $230\mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$; SWC > 15%, 尽管 WUE 在达到最大值之后下降缓慢,但最大值只有 $160\mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$ 左右,并且各 SWC 水平之间差异不显著,模拟曲线基本重叠。这表明,在严重水分胁迫时,由于光胁迫出现较早^[12],严重影响了光合作用,使光合速率的下降速度比蒸腾速率更快,在 PAR 不高时便出现了 WUE 急剧下降的现象,严重影响了 WUE 的提高。

3.1.2 土壤水分的影响 水分能直接影响植物的水分利用效率^[15]。在适宜光照条件下($800 < \text{PAR} <$

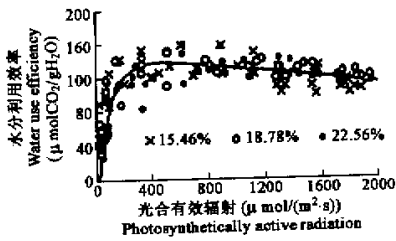


图 1 田间水分利用效率随光照强度的变化
Fig. 1 The variation of water use efficiency with photosynthetically active radiation in field site

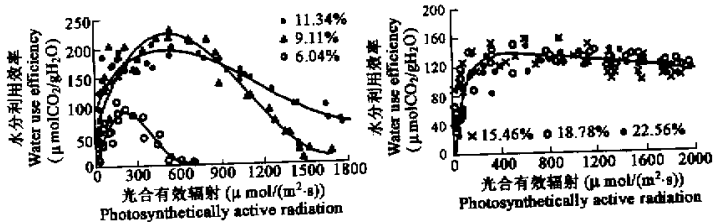


图 2 不同土壤水分条件下水分利用效率随光照强度的变化

Fig. 2 The variation of water use efficiency with photosynthetically active radiation under different soil moisture

$1000\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s}))$ 金矮生苹果 WUE 随 SWC 的变化可以分段拟合(图 3),模拟曲线表明:土壤含水率在 10%左右时 WUE 可达到最大值(约为 $180\mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$)。

尽管 SWC 在 8%~10% 时 WUE 达到了最大,但这时林木处于严重水分胁迫之下,光合速率较低,严重影响植物的物质合成和积累。因此,不能以 WUE 的最高点作为确定最适土壤水分的依据,应将 WUE 和 P_n 两者结合来考虑。经对 P_n 的水分响应曲线的曲率进行计算($K = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}}$)表明,曲线大约在 SWC 为 14% 处曲率最大,该 SWC 处的水分利用效率约为 $165\mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$ 与最大值相差不大,当土壤含水率高于 14% 时,蒸腾速率的上升速度高于光合速率,水分利用效率下降较多,不利于水分利用效率的

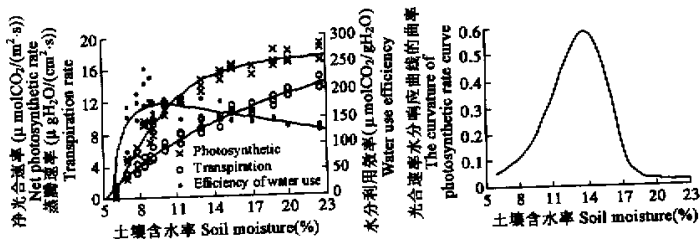


图 3 适宜光照条件下水分利用效率随土壤水分的变化

Fig. 3 The variation of water use efficiency with soil moisture under normal photosynthetically active radiation

提高。

在不同的光照条件下, WUE 随 SWC 的变化规律并不相同(图 4)。在 $PAR < 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, WUE 的最大值出现在 8%~10% 的土壤含水率区域内。不同光强时, 模拟曲线的最高值相差较大, $500 < PAR < 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时 WUE 的最大值最高($225 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$), 并且达到最大值之后随土壤含水率的增大下降较为缓慢, 证明林木要具有较高的水分利用效率必须有足够的光照为条件, 这里称之为“适宜光强”。当 $PAR > 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之后, 水分利用效率降低, 并且在 $PAR > 1400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, SWC 提高到 20% 时水分利用效率才达到最大值。可见, 在土壤水分不成为限制因子时, 有较高水分利用效率的光照范围大约为 $500 < PAR < 1000 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

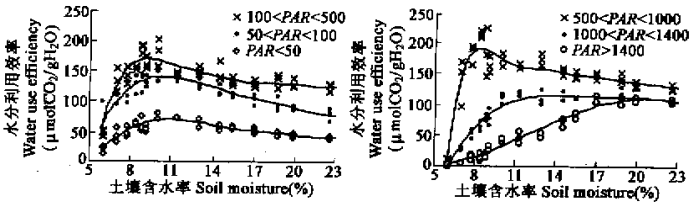


图 4 不同光照条件下水分利用效率随土壤水分的变化

Fig. 4 The variation of water use efficiency with soil moisture under different photosynthetically active radiation

3.2 气孔阻力(RS)与水分利用效率(WUE)

气孔阻力通过限制蒸腾速率而影响水分利用效率^[16,17]。在 $RS < 6.0 \text{ s}/\text{cm}$ 时, 随着 RS 的增大, 蒸腾速率比光合速率下降的速度快, 因而水分利用效率处于直线上升阶段(图 5); 当 $RS > 6.0 \text{ s}/\text{cm}$ (所对应的 SWC 约为 11%) 之后, 蒸腾速率变化很小, 而光合速率的下降速度有加快趋势, 水分利用效率则快速下降。 Tr 随 RS 的变化曲线的曲率在 $RS = 2.0 \text{ s}/\text{cm}$ 处最大, 该点所对应的土壤含水率约为 15%, 如果再增加土壤含水率, 即 $RS < 2.0 \text{ s}/\text{cm}$ 之后, 蒸腾速率急速上升, 所增加水分主要用于无效蒸腾, WUE 下降很快; RS 在 2~6 s/cm 范围内, Tr 受影响较大, 而 P_n 的变化相对较小, WUE 上升到最大值(从 300 上升到 $600 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$), Tr 处于急速下降到趋于平缓的“转折区”, P_n 的下降幅度不大(下降了 $6 \mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 该区域减少了无效蒸腾, 有利于提高水分利用效率和植物生产潜力^[18], 其所对应的 SWC 范围为 11%~15%。之后, 林木处于严重水分胁迫之下, WUE 很快降低到零。

3.3 叶水势(Ψ_l)与水分利用效率(WUE)

叶水势也是通过调节蒸腾速率使水分利用效率产生变化。图 6 表明, Ψ_l 在小于 -3.0 MPa 时, WUE 随着 Ψ_l 的增加而急剧上升, 在 -3.0 MPa 处 WUE 达到最大值, 之后随着 Ψ_l 的增加 WUE 又开始下降。在 Ψ_l 的整个变化过程中, P_n 基本按一定的速率直线上升, 只是在 Ψ_l 为 -1.65 MPa 之后上升速度减缓; 而 Tr 的变化曲线表现出幂函数上升的特点, $\Psi_l = -2.1 \text{ MPa}$ 处曲线的曲率最大, Ψ_l 小于该值, 尽管 WUE 较高, 但由于严重水分胁迫导致 P_n 较小, Ψ_l 大于该值过多, Tr 的增加速率比 P_n 大得多, 影响 WUE 的提高。因此, 为了使金矮生苹果既有较高的 P_n , 保证其正常的物质积累和开花结实, 又有较高的 WUE , 叶水势 Ψ_l 必须大于 -2.1 MPa , 小于 -1.65 MPa (该处 P_n 曲线的曲率开始增大), 决定该 Ψ_l 值的 SWC 范围正好是 11%~15% (田间持水量的 55%~75%)。

4 结论

光照和土壤水分条件决定金矮生苹果光合速率和蒸腾速率的大小, 从而影响水分利用效率的高低。水分利用效率对光照的响应与土壤水分状况有关。 SWC 为 10% (田间持水量 FC 的 50%) 左右时, WUE 最大值在所有土壤水分处理中居于最高, 大约达到 $230 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$ 。在不出现水分胁迫时, 尽管 WUE 在达到最大值之后下降缓慢, 但最大值只有 $160 \mu\text{molCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$ 左右, 并且各 SWC 水平之间差异不

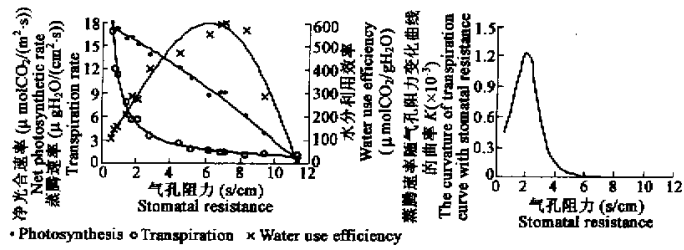


图 5 水分利用效率随气孔阻力的变化

Fig. 5 The variation of water use efficiency with stomatal resistance

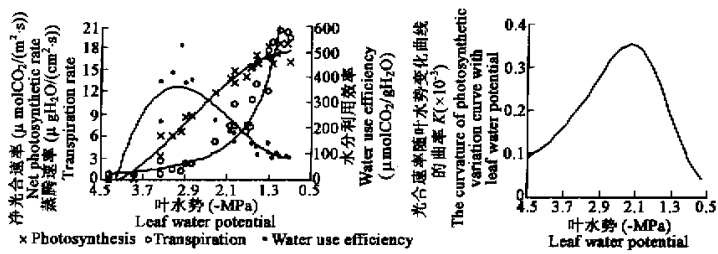


图 6 水分利用效率随叶水势的变化

Fig. 6 The variation of water use efficiency with leaf water potential

显著,模拟曲线基本重叠。

适宜光强下, WUE 随 SWC 的变化规律表明, SWC 在 8%~10% 时 WUE 尽管达到了最大,但这时光合速率较低。 P_n 的水分响应曲线在 $SWC = 14\%$ 处曲率最大,这时 P_n 处于较高水平,对 WUE 也没有显著影响。不同光强水平下 WUE 随 SWC 的变化规律表明:光强范围在 $500 < PAR < 1000 \mu mol/(m^2 \cdot s)$ 时的 WUE 最高。对于林木幼苗或幼树可以针对具体情况采取相应措施对光强进行调节。

由于土壤水分状况决定了气孔开启度和叶水势的大小,因而 RS 和 ψ_l 也影响到 WUE 的变化。 RS 和 ψ_l 分别为 $2.0 s/cm$ 和 $-3.0 MPa$ 时 WUE 最高,但这时 P_n 较低。从 WUE 、 P_n 和 Tr 综合考虑,既能保证金矮生苹果有正常的光合作用,又有利于提高水分利用效率,不产生无效蒸腾的 RS 和 ψ_l 范围分别是 $2 \sim 6 s/cm$ 和 $-2.1 \sim -1.65 MPa$,它们所对应的土壤含水率范围是 $11\% \sim 15\%$,相当于田间持水量的 $55\% \sim 75\%$,这一范围可以作为金矮生苹果田间供水的理论指标。

参考文献

[1] Philip J R. Plant water relations some physical aspects. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 1966, **17**: 245~268.
[2] Zur B and Jones J W. A model for the water relations, photosynthesis, and expensive growth of crop. *Water Resources Research*, 1981. **17**: 311~320.
[3] Tear I D. Crop-Water Relations. A Wiley-Interscience Publication, 1982.
[4] Hergert G W. Cropping systems for soil and water conservation in the great plains. In: *Proceedings of International Conference on Dryland Farming*. Amarillo/Bushland, Texas USA, 1988.
[5] Undersander D J. Management of sorghum under limited irrigation. *Agron. J.*, 1986, **78**: 28~32.
[6] Shan L (山力), Xu M (徐萌). Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chinese Journal of Applied*

- Ecology*(in Chinese 〔应用生态学报〕, 1991, 2(1): 70~76.
- [7] Brevedan E R. Effects of moisture deficits on ^{14}C translocation in corn(*Zes mays* L). *Plant Physiol.* , 1973 , 52 : 436~439.
- [8] Pei B 〔裴步祥〕, An S 〔安顺清〕. The initial experimental results of relationship between field water and yield of wheat. *Science Communication*(in Chinese 〔科学通讯〕, 1985 , 20 : 1599~1600.
- [9] Shan L 〔山仑〕. Studies on plants water and agricultural increase production in dry land in North-West China area. *Plant Physiology Communications*(in Chinese 〔植物生理学通讯〕, 1983 , (5): 7~10.
- [10] Ehleringer J R, Klassen S, Clayton C , *et al.* Carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in common bean. *Crop. Sci.* , 1991 , 31(6): 1611~1615.
- [11] Kirkham M B, He H, Bolger T P , *et al.* Leaf photosynthesis and water use of big bluestem under elevated carbon dioxide. *Crop. Sci.* , 1991 , 31(6): 1589~1594.
- [12] Wang K 〔王克勤〕, Wang B 〔王斌瑞〕. Research on Effect of Soil Moisture Upon Photosynthetic Rate of *Malus pumila* CV. Goldspur. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese 〔生态学报〕, 2002 , 22(2): 69~77.
- [13] Wang T 〔王天铎〕. The second problem of agricultural water resource use on Huang-Huai-Hai Plain——Water Use Efficiency. *Agriculture Modernization Research*(in Chinese 〔农业现代化研究〕, 1991 , (4): 33~37.
- [14] Shi J 〔施建忠〕, Wang T 〔王天铎〕, Li L Y 〔李临颖〕. Experimental Study and Mathematical Simulation of Simulation of Water Use Efficiency in Wheat Leaves Affected by Some Environmental Factors. *Acta Botanica Sinica*(in Chinese 〔植物学报〕, 1994 , 36(12): 940~946.
- [15] Chaves M M, Pereira J S. Water stress , carbon dioxide and climate change. *J. Exp. Bot.* , 1992 , 43(253): 1131~1139.
- [16] Itigoyen J J , Emerich D W , Sanchez D M. Alfalfa leaf senescence induced by drought stress : Photosynthesis , hydrogen peroxide metabolism , lipid peroxidation and ethylene evolution. *Physiol. Plant* , 1992 , 84(1): 67~72.
- [17] Shan L 〔山仑〕. Studies on the physiological property and effect of soil moisture upon grouting of wheat in grouting period. *Plant Physiology Communications*(in Chinese 〔植物生理学通讯〕, 1980 , (3): 41~46.
- [18] Clarke J M, Richards R A, Condon A G. Effect of drought stress on residual transpiration and its relationship with water use of wheat. *Can. J. Plant Sci.* , 1991 , 71(3): 695~702.