

# 阿克苏 5 种果树滞尘量对其水分利用效率的影响

迈迪娜·吐尔逊<sup>1</sup>, 玉米提·哈力克<sup>1,2\*</sup>, 古力比亚·乌买尔<sup>1</sup>,  
凯丽比努尔·努尔买买提<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院/新疆绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;  
2. 德国艾西斯塔特-因戈尔斯塔特大学 数学与地理学院, 德国 艾西斯塔特 85071)

**摘 要:**选择新疆阿克苏市柯柯牙典型的 5 种果树: 红枣(*Ziziphus jujuba*)、核桃(*Juglans regia*)、苹果(*Malus pumila*)、葡萄(*Vitis vinifera*)和香梨(*Pyrus sinkiangensis*), 并对树种叶面滞尘量及其对水分利用效率的影响进行研究。结果表明, 5 种果树滞尘能力为葡萄  $5.37 \text{ mg/cm}^2 >$  香梨  $4.55 \text{ mg/cm}^2 >$  红枣  $3.88 \text{ mg/cm}^2 >$  核桃  $3.03 \text{ mg/cm}^2 >$  苹果  $0.92 \text{ mg/cm}^2$ 。水分利用效率为葡萄( $2.646 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) $>$ 香梨( $1.810 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) $>$ 核桃( $1.698 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) $>$ 红枣( $1.359 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ ) $>$ 苹果( $1.043 \mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )。通过分别比较 5 种果树滞尘量与水分利用效率之间的相关性得出, 5 种果树的滞尘量与净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率之间并无显著相关关系。表明果树在长期适应极端环境的过程中, 形成了自身的调节机制, 滞尘量对果树的水分利用效率的影响不大。

**关键词:**果树叶片; 阿克苏市; 滞尘量; 水分利用效率

**中图分类号:** S731.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-7461(2016)05-0291-06

## The Effect of the Dust-retaining Capability of the Five Typical Fruit Trees Cultivated in Kokyar of Aksu on the Water Use Efficiency

Maidina TUERXUN<sup>1</sup>, Umut HALIK<sup>1,2\*</sup>, Gulibiya WUMAIER<sup>1</sup>, Kailibinuer NUERMAIMAITI<sup>1</sup>

(1. College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University/Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi, Xinjiang 830046, China; 2. Faculty of Geography and Mathematics, Catholic University of Eichstaett-Ingolstadt, Eichstaett 85071, Germany; 3. Turpan District Environmental Monitoring Station, Turpan, Xinjiang 838000, China)

**Abstract:** Five typical fruit trees cultivated in Kokyar of Aksu, Xinjiang were selected to study the dust-retaining capability and water use efficiency. The dust retaining capacity of the five fruit trees was in the order of *Vitis vinifera*  $>$  *Pyrus sinkiangensis*  $>$  *Ziziphus jujuba*  $>$  *Juglans regia*  $>$  *Malus pumila*. The order of water use efficiency was *V. vinifera*  $>$  *P. sinkiangensis*  $>$  *J. regia*  $>$  *Z. jujuba*  $>$  *M. pumila*. No significant correlations were found between dust retaining capacity and photosynthesis, transpiration and water use efficiency, suggesting that fruit trees had formed their own regulatory mechanisms in the long process of adaptation to extreme environments. Dust on fruit tree leaves did not have strong effect on water use efficiency.

**Key words:** fruit trees leaf; Aksu; dust-retaining capability; water use efficiency

水分利用效率 (water use efficiency, 缩写 WUE), 指植物消耗单位水量生产出的同化量, 它是表示作物水分吸收利用过程效率的一个重要指标, 水分利用效率的研究已成为国内外半干旱和半湿润

收稿日期: 2015-10-17    修回日期: 2016-03-07  
基金项目: 国家自然科学基金项目(31270742); 新疆林业厅委托项目(211-62210)。  
作者简介: 迈迪娜·吐尔逊, 女, 硕士研究生, 研究方向: 干旱区生态学。E-mail: 1225216138@qq.com  
\* 通信作者: 玉米提·哈力克, 教授, 博士生导师, 研究方向: 干旱恢复区生态与景观规划。E-mail: halik@xju.edu.cn

地区生物学和农业研究的一个热点。在不同的范畴内对水分利用效率的定义也不相同<sup>[1]</sup>,在叶片水平上,水分利用效率(WUE)用净光合速率( $P_n$ )与蒸腾速率( $T_r$ )之比( $P_n/T_r$ )来表示<sup>[2]</sup>,因此气孔控制的光合作用和蒸腾作用决定了植物叶片水分利用效率的高低。而植物的光合作用、蒸腾作用、气孔导度和水分利用效率和太阳辐射、大气 CO<sub>2</sub> 浓度等环境因子有直接影响,同时它们也对环境变化具有很强的自我调节和适应能力,并做出相应的反应<sup>[3]</sup>。植物在各种恶劣环境下如何确保自身水分利用效率的调节机制一直是研究植物抗旱性的热点问题<sup>[4]</sup>。它可以揭示植物内在耗水机制,为植物提供水分提供合理依据,广泛应用于极度缺水的干旱区植被恢复和保育<sup>[5]</sup>。除此之外,在果木业方面,提高水分利用效率是面对有限水供给时增加果树产量的有效方法。也是实现缺水地区绿化—经济—水资源可持续发展的关键措施之一。

阿克苏作为新疆南部典型的干旱型气候城市,降水量少、气候干燥、全年多伴有浮尘天气<sup>[6]</sup>。近年来阿克苏市柯柯牙工程极大改善了城市自然景观,阻挡了市区东北面沙尘、黄土对城市大气环境的污染,作为以乡土树种为主的人工绿化造林工程,该工程在阿克苏乃至整个南疆地区防风固沙、高效滞尘、改善区域小气候方面发挥着举足轻重的作用。同时作为阿克苏主要的果木经济林基地,自 1989 年果木经济林开始挂果,红枣、香梨、葡萄、核桃、苹果等果树为当地人民带来了经济效益。

目前,很多学者已经对于干旱地区植物水分利用效率的影响因素进行过研究,涉及到的影响因素主要有土壤水分,叶片温度,胞间 CO<sub>2</sub> 浓度以及光合有效辐射等<sup>[7]</sup>。主要集中在单个因素对水分利用效率的影响研究<sup>[8]</sup>。而关于滞尘量对叶片水分利用率的影响研究较少,本研究致力于 5 种阿克苏乡土果树的滞尘能力对比以及其对水分利用效率的影响,为当地果树叶片的滞尘能力以及其对果树光合作用、蒸腾作用、水分利用效率的影响做参考依据,同时在保证果树的经济效益和绿化效益的基础上,为当地选取具有经济和生态效益的优良果树树种提供依据和参考。

## 1 研究区概况

柯柯牙工程北起天山托木尔峰下的温宿县境内,横跨阿克苏市城区,南与塔克拉玛干沙漠边缘的阿拉尔市接壤。地理位置在 80°15′—80°19′E、40°11′—40°20′N,海拔 1 056~1 300 m。具有典型的暖温带大陆性干旱气候特征,降水少、降水量年季变

化大,年平均气温在 7.9~13.7℃。年降水量 53.2~120.6 mm,年平均蒸发量 1 948 mm。由于阿克苏市地处塔克拉玛干沙漠边缘,气候干燥,沙尘天气多发。据统计,阿克苏市降尘量均值为 22.3 t/km<sup>2</sup>·月,远远超过国家标准均值(15 t/km<sup>2</sup>·月)。

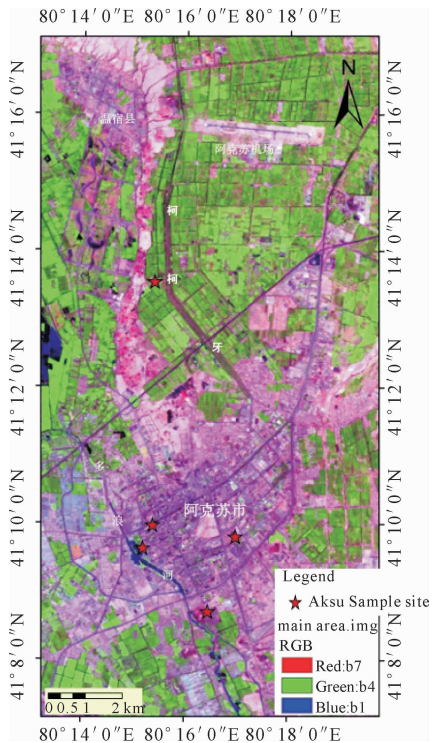


图 1 阿克苏地区样点  
Fig. 2 Sampling spots in Aksu area

## 2 材料与方法

### 2.1 滞尘量的测定

采集的 5 种果树叶片分别是苹果(*Malus pumila*)、香梨(*Pyrus sinkiangensis*)、葡萄(*Vitis vinifera*)、红枣(*Ziziphus jujuba*)、核桃(*Juglans regia*)。采样时间为 2014 年 5 月下旬到 6 月下旬。首先在每种果树 1.0~2.0 m 高度处选取上面粉尘覆盖均匀的叶片进行采集,10 种果树采集的标准均一致,样品采集后尽可能保持原状运回实验室避免带回的途中叶片灰尘脱落。

在实验室采用万分之一天平(德国 61102 Balance)称重 2 次。第 1 次为树叶、叶片尘和包装袋的总重量。称重后采用毛刷轻轻刷掉包装袋和叶子上吸附的尘,然后对干净的包装袋和树叶进行第 2 次称重,以 2 次重量之差作为每种果树叶片吸附的降尘重量。然后采用扫描仪对清洗干净的叶片进行扫描,应用图像处理软件(Image J)计算叶面积。研究中果树叶片的滞尘量采用平均滞尘量表示即单位叶面积滞留的粉尘量(mg/cm<sup>2</sup>)。

2.2 水分利用效率的测定

试验选择典型的晴天进行。用 Li-6400 便携式光合作用系统(LI-COR, USA)自然条件下测定 5 种果树叶片的气体交换参数,每棵果树选取生长健壮、无病斑、叶龄相对一致的成熟叶片进行活体测量,从 8:00—18:00 每 2 h 测定 1 次,每棵树上在不同高度上选择 6 片叶片进行测定,每次设 3 个重复。每次测定记录 20 组数值,主要参数包括净光合速率( $A_{\max}$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )和光合有效辐射( $PAR$ )、气温( $T_a$ )、空气湿度( $RH$ )、空气  $\text{CO}_2$  浓度( $C_a$ )等。其中测量  $A_{\max}$  时,控制叶室光强、 $\text{CO}_2$  浓度和温度分别为  $1\,000\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $380\,\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  和  $25^\circ\text{C}$ 。测量后,光合水分利用效率( $P_{\text{WUE}}$ )根据  $A_{\max}/T_r$  计算<sup>[9]</sup>。各项数据均采用对应时刻数据的平均值,使用 Excel2003 和 SPASS17.0 进行分析处理。(根据水分利用效率<sup>[7]</sup>计算 5 种果树叶片的水分利用效率,其公式为: $WUE=P_n/T_r$ 。)

3 结果与分析

3.1 采样前的气象要素分析

相关研究表明,降雨量、沙尘天气、风速、温度等主要气象因素直接影响树木叶面滞尘量<sup>[10]</sup>。一般认为一次 15 mm 的降雨量就可以冲掉植物叶片的降尘。采样期间研究区气象资料表明,在 2014 年 5 月下旬至 6 月上旬间有 7 次降水,且多为微雨到小阵雨,降水量只有 0.1 mm 左右,因此不考虑其对果树叶面颗粒物吸附能力的影响(图 2)。叶片取样前,较大风速出现在 5 月 22—25 日以及 6 月 1—3 日,此期间出现了 3 次浮尘或扬尘天气。同时采样其他时间一直为无持续风向到微风天气,风速 $<7\text{ m/s}$ ,因此可以认为,取样期间风力状况不会对采样过程中果树叶片吸附的大气颗粒物量产生影响。

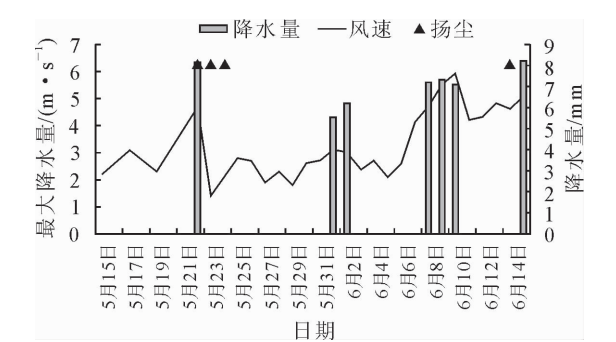


图 2 叶片采集期间气象要素 (2015)

太阳辐射直接影响空气温度、相对湿度等环境因子变化<sup>[11-12]</sup>。从图 3(A)可以看出,光合有效辐射和气温的日变化呈单峰曲线,随着光合有效辐射的

增强,气温升高,光合有效辐射和气温 12:00 达到最高值,分别为  $884.75\,\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $23.91^\circ\text{C}$ 。随后光合有效辐射剧烈下降,而气温缓慢降低。这表明,太阳辐射起主导作用,与气温变化趋势基本一致。

植物光合作用随着空气  $\text{CO}_2$  浓度的变化而变化<sup>[13]</sup>。从图 3(B)可以看出,空气  $\text{CO}_2$  浓度日变化呈“W”型曲线。经过夜间的富集, $\text{CO}_2$  浓度在清晨最高,随着树木光合作用的进行,空气  $\text{CO}_2$  浓度在 10:00 和 14:00 前后分别降至谷值  $403.25\,\mu\text{mol/mol}$  和  $406.19\,\mu\text{mol/mol}$ ,随后逐渐升高。大气蒸发随着气温升高而加快,空气相对湿度从 8:00 开始逐渐下降,14:00 降到最低值,之后随着光合有效辐射和气温的下降逐步上升。

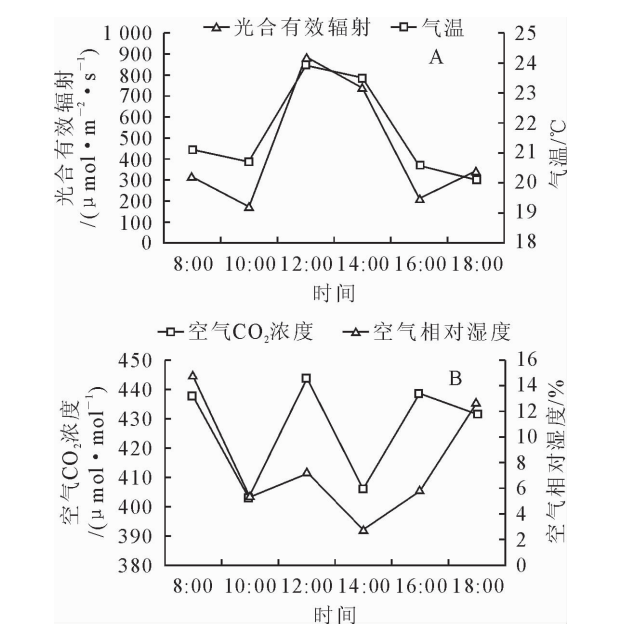


图 3 试验期间环境因子日变化

Fig. 3 Diurnal changes of environmental factors during investigation period

3.2 叶片滞尘量分析

叶片是植物滞留大气颗粒物的重要载体,叶表面特性的差异是植物滞留大气颗粒物能力不同的主要原因。本研究中所测试的 5 种果树叶片滞尘能力平均值大小顺序分别为葡萄 $>$ 香梨 $>$ 红枣 $>$ 核桃 $>$ 苹果。同时不同果树叶面的滞尘量有着明显差异。所调查的 10 种果树中,第 1 类滞尘量较高,均 $>3.00\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,包括葡萄、香梨、红枣和核桃,分别是  $5.37$ 、 $4.55$ 、 $3.88$ 、 $3.03\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。第 2 类的滞尘量较低( $<1.50\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ ),苹果为  $0.92\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。通过对比发现,叶面积大小以及叶面积粗糙程度是决定树叶滞尘强弱的重要因素,红枣的较强滞尘能力也表明树种叶片叶柄短小以及树形,冠幅适中也可增强树木的滞尘能力。苹果的叶面积虽然

较大,但其叶片叶柄较长且细软,导致其滞尘能力较低。因此,在分析果树单株的滞尘量的同时也应该综合考虑果树本身的特征以及周边环境的影响。

3.3 不同果树水分利用效率比较

作为水分利用效率中最重要的影响因素之一,净光合速率反映植物同化 CO<sub>2</sub> 的能力<sup>[14]</sup>。5 种果树除红枣外净光合速率日变化过程均呈现双峰曲线,在 10:00 和 14:00 分别出现峰值,在 12:00 出现低谷,即“光合午休”(图 4(A))。5 种果树叶片同化

CO<sub>2</sub> 的最大值分别为葡萄 3.286 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、香梨 6.256 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、核桃 2.284 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、红枣 5.358 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、苹果 5.124 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。5 种果树平均同化 CO<sub>2</sub> 能力由高到低的顺序为苹果(1.773 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)、红枣(1.171 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)、香梨(2.397 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)、核桃(1.550 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)、葡萄(2.594 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)。可以看出,果树的光合速率排序为葡萄>香梨>苹果>核桃>红枣。

表 1 供试植物基本性状

Table 1 Basic characteristics of the investigated plants

果树种类	表面粗糙程度	叶毛	柄长/cm	树高/m	冠幅/m	单叶面积/cm <sup>2</sup>	单叶滞尘量/(mg·cm <sup>-2</sup> )
葡萄 ( <i>V. vinifera</i> )	粗糙	两面无毛	4	—	—	123.883	5.37a
香梨 ( <i>P. sinkiangensis</i> )	光滑	两面无毛	2	6~7	6.45	46.701	4.55b
红枣 ( <i>Z. jujuba</i> )	很光滑	两面无毛	近无	1~3	4.32	7.031	3.88c
核桃 ( <i>J. regia</i> )	光滑	两面无毛	3~4	2~10	5.10	181.547	3.03c
苹果 ( <i>M. pumila</i> )	光滑	上面无毛,下面被细小绒毛	2~3	3~3.5	2.8	56.987	0.92d

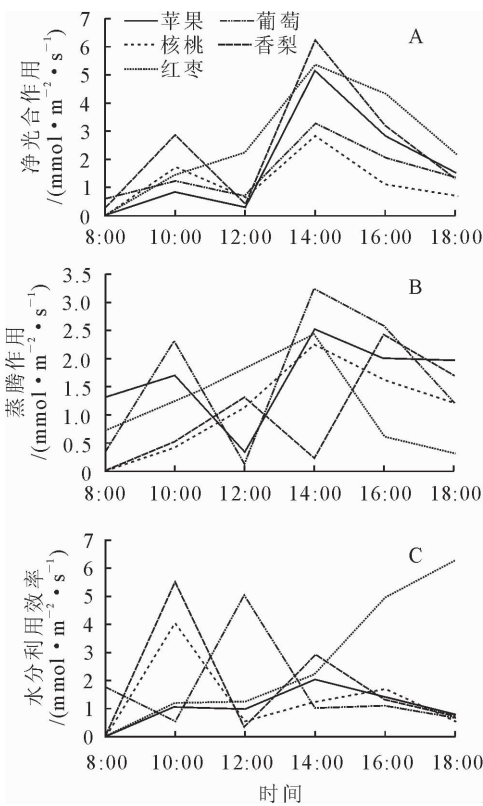


图 4 5 种果树净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率日变化  
Fig. 4 Diurnal variations of photosynthesis,transpiration and water use efficiency of five fruit trees

蒸腾作用是植物水分、矿质盐类吸收和运输的主要动力,但过强的蒸腾作用也会造成植物水分供应不足,从而影响植物的生长<sup>[15-16]</sup>。从图 4(B)可以看出,葡萄、苹果、香梨呈现双峰曲线,红枣和核桃呈现单峰曲线。苹果、香梨、葡萄峰值出现在 10:00 和 14:00,红枣和核桃的峰值出现在 12:00。这表明红

枣和核桃生理调节能力较弱。5 种果树蒸腾速率最大值分别为葡萄 3.241 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、香梨 2.241 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、核桃 2.241 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、红枣 2.424 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>、苹果 2.524 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。5 种果树 H<sub>2</sub>O 蒸腾能力由高到低的顺序为苹果(1.639 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)>核桃(1.510 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)>葡萄(1.185 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)>红枣(1.104 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)>香梨(0.535 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)。其中,果树的蒸腾速率排序为苹果>核桃>葡萄>红枣>香梨。

水分利用效率日变化如图 4(C)所示,5 种果树 WUE 日变化呈现不规则曲线,且 5 种果树水分利用效率在不同的时段出现最大值,5 种果树水分利用效率最大值分别是苹果 2.022 μmol·mmol<sup>-1</sup>、葡萄 5.035 μmol·mmol<sup>-1</sup>、核桃 4.041 μmol·mmol<sup>-1</sup>、香梨 5.492 μmol·mmol<sup>-1</sup>、红枣 6.309 μmol·mmol<sup>-1</sup>。5 种果树日平均水分利用效率大小为葡萄(2.646 μmol·mmol<sup>-1</sup>)>香梨(1.810 μmol·mmol<sup>-1</sup>)>核桃(1.698 μmol·mmol<sup>-1</sup>)>红枣(1.359 μmol·mmol<sup>-1</sup>)>苹果(1.043 μmol·mmol<sup>-1</sup>)。

3.4 不同果树滞尘量与光合作用、蒸腾作用、水分利用效率相关性分析

以上结果仅表现的是 5 种果树在同一天的日变化情况。为继续探究不同果树滞尘量与光合作用、蒸腾作用、水分利用效率之间是否相关、相关是否显著,在 2014 年 5 月下旬至 6 月上旬每天 8:00—18:00 间持续测定 5 种果树的光合作用、蒸腾作用、水



分利用效率(特殊恶劣天气除外),从而获得5种果树相同时间段的日平均光合作用、蒸腾作用、水分利用效率。最后,通过SPASS17.0软件,得到5种果树的滞尘量与净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率之间的相关性结果。

单因素方差分析表明(表2),5种果树的滞尘量与净光合速率之间无显著相关关系;5种果树的滞尘量与蒸腾速率之间差异无显著相关关系;5种果树的滞尘量与水分利用效率之间差异无显著相关关系。这说明尽管单个环境因子例如太阳辐射和大气CO<sub>2</sub>浓度等对植物光合作用、蒸腾作用、水分利用效率产生影响,但在长期与极端环境适应过程中,滞尘量对于果树水分利用效率影响不大,通过观察也可得出,尘土一般集中在叶表面主脉两侧,而不是均匀覆盖在叶表面,这是否也可以解释为滞尘量对于果树水分利用效率影响不大的主要原因,或者果树在保证其产量的过程中是否自身形成了对极端气候尤其是尘土的内部调节机制,这将为进一步研究果树可保持较高水分利用效率的外在以及内在因素以及果树如何同时保证自身绿化效益与经济效益提供一些思路。

表2 5种果树叶片水分利用效率参数的相关分析

Table 2 Correlation analysis of water use efficiency parameters of five fruit trees

滞尘量	$P_n$	$T_r$	WUE
苹果	0.249	0.167	0.824
葡萄	0.073	0.149	0.107
香梨	0.129	0.029	0.084
红枣	0.510	0.375	0.124
核桃	0.064	0.401	0.058

注: \* 显著( $P<0.05$ ); \* \* 极显著( $P<0.01$ )。

表3 5种果树滞尘量、光合能力( $A_{max}$ )、蒸腾速率( $T_r$ )和水分利用效率(WUE)比较

Table 3 Dust-retaining capability, photosynthetic capacity( $A_{max}$ ), transpiration rate( $T_r$ ) and photosynthetic water use efficiency of five fruit trees

树种	滞尘量 /( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$A_{max}$ /( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$T_r$ /( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	WUE /( $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
葡萄	5.37	2.594	1.185	2.646
红枣	3.88	1.171	1.104	1.359
核桃	3.03	1.550	1.150	1.698
香梨	4.55	2.397	0.535	1.810
苹果	0.92	1.773	1.639	1.043

4 结论与讨论

不同果树叶面的滞尘量有着明显差异,调查的5种果树树种中葡萄、香梨、红枣、核桃和苹果的滞尘量较高,分别是5.37、4.55、3.88、3.03、0.92 mg

$\cdot \text{cm}^{-2}$ ,表明葡萄、香梨在当地乡土树种当中的滞尘能力较强,对阿克苏地区柯柯牙的空气净化与改善起到积极的改良作用。

水分利用效率是提高果树产量的关键因子。研究表明,5种果树的光合速率排序为葡萄>香梨>苹果>核桃>红枣。蒸腾速率排序为苹果>核桃>葡萄>红枣>香梨。日平均水分利用效率(WUE)排序为葡萄>香梨>核桃>红枣>苹果。这表明葡萄、香梨在当地乡土树种当中的水分利用效率较高,这2种果树树叶不仅滞尘能力强,而且还能更好地利用有限水分,葡萄和香梨可称为优良的绿化树种和经济树种。总体来说,5种果树受滞尘影响不大,在干旱多尘的极端环境下能充分利用水资源,保证产量。

在果树的选择方面考虑树种产生的经济效益很重要,水分利用效率可作为保证果树产量的关键因素。而在南疆地区,面对干旱、少雨、多风沙的恶劣气候,针对既能吸附较多尘土又能保持较高的水分利用效率的果树的研究很有意义,因为果树长期处在极端环境下能形成自身的调节机制,又在抗旱、抗尘基础上确保自身产量,兼具较好的绿化效益和经济效益。研究5种果树在1 d内的滞尘量和光合特性的变化,以及同一时间段内不同果树滞尘量与光合作用、蒸腾作用、水分利用效率的相关性,如能对果树和绿化树种在同一时间下的滞尘量以及对其水分利用效率的影响进行对比研究,可能对揭示果树为保证自身产量在极端环境下表现出的自我调节和适应机制有帮助。除此之外,本研究只针对5种果树,如果能涉及更多的乡土果树,能筛选出更多的既能绿化产量又高的果树,这将为阿克苏当地的果木业发展以及城市绿化提供参考依据。

参考文献:

[1] 王建林,于贵瑞,房全孝,等.不同植物叶片水分利用效率对光和CO<sub>2</sub>的响应与模拟[J].生态学报,2008,28(2):525-533.  
WANG J L,YU G R,FANG Q X. Responses of water use efficiency of nine plant species to light and CO<sub>2</sub> and it's modeling [J]. Acta Ecologica Sinica,2008,28(1):527-533. (in Chinese)

[2] 常宗强,冯起,张秀凤,等.CO<sub>2</sub>浓度升高对极端干旱区多枝怪柳叶片水分利用效率的影响[J].干旱区地理,2011,34(3):499-504.  
CHANG Z Q,FENG Q,ZHANG X F,et al. Responses of water use efficiency of *Tamarix ramosissima* Ledeb leaf to elevated CO<sub>2</sub> concentration[J]. Arid Land Geography,2011,34(3):499-504. (in Chinese)

[3] 刘文兆.作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系[J].自然资源学报,1998,13(1):23-27.  
LIU W Z. Dynamic interrelations of crop production, water

consumption and water use efficiency[J]. Journal of Natural Resources,1998,13(1):23-27. (in Chinese)

[4] 徐连三,杨霄翼,刘延峰. 南疆地区棉花叶片水分利用效率的影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):113-117.  
XU L S,YANG X Y,LIU Y F. Influence factors to water use efficiency of cotton leaf in Southern Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2012,30(1):113-117. (in Chinese)

[5] 张正斌,山仑. 作物水分利用效率和蒸发蒸腾估算模型的研究进展[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1):73-78.  
ZHANG Z B,SHAN L. Research development in estimation models of crop water use efficiency and transpiration and evaporation[J]. Agricultural Reseach in The Arid Areas,1997,15(1):73-78. (in Chinese)

[6] 曹生奎,冯起,司建华,等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报,2009,29(7):3882-3892.  
CAO S K,FENG Q,SI J H,*et al.* Summary on the plant water use efficiency at leaf level[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(7):3882-3892. (in Chinese)

[7] 阿衣古丽·艾力亚斯,玉米提·哈力克,阿丽亚·拜都热拉,等. 阿克苏市常见园林树种叶片重金属含量分布特征[J]. 西北林学院学报,2004,29(1):192-196.  
AYIGULI A,UMUT H,ALIYA B,*et al.* Distributions of heavy met *al* contents of common urban tree leaves in Aksu [J]. Journal of Northwest Forestry University,2004,29(1):192-196. (in Chinese)

[8] 蒲光兰,袁大刚,胡学华,等. 杏树抗旱性研究[J]. 西北林学院学报,2005,20(3):42-48.  
PU G L,YUAN D G,HU X H,*et al.* Characteristics of *Prunus armeniaca* against drought [J]. Journal of Northwest Forestry University,2005,20(3):42-48. (in Chinese)

[9] 李荣生,许煌灿,尹光天. 植物水分利用效率的研究进展[J]. 林业科学研究,2003,16(3):366-371.  
LI R S,XU H C,YIN G T. Advances in the water use efficiency of plant[J]. Forest Research,2003,16(3):366-371. (in Chinese)

[10] 廖建雄,史红文,鲍大川,等. 武汉市 51 种园林植物的气体交换特性[J]. 植物生态学报,2010,34(9):1058-1065.  
LIAO J X,SHI H W,BAO D C,*et al.* Gas exchange characteristics of 51 garden species in Wuhan city,China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2010,34(9):1058-1065. (in Chinese)

[11] 巴特尔·巴克,茹鲜·木沙,沙依甫加玛力·阿布都鲁甫,等. 新疆南疆 6 种果树叶片滞尘能力分析[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(2):125-128.  
BATUR B,RUXIAN M,SAYIFUJAMAI A ,*et al.* Dust retaining capability of six fruit tree leaves in southern Xinjiang, China[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University,2010,33(2):125-128. (in Chinese)

[12] 董波,万福绪,蒋丹丹,等. 徐州石灰岩山地 4 种乔木树种光合特性研究[J]. 林业科技开发,2014,10(4):13-19.  
DONG B,WAN F X,JIANG D D,*et al.* Photosynthetic characteristics of four arbor species in the limestone mountains at Xuzhou[J]. China Forestry Science and Technology,2014,10(4):13-19. (in Chinese)

[13] 赵天宏,王美玉,张巍巍,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 生态环境,2006,15(5):1096-1100.  
ZHAO T H,WANG M Y,ZHANG W W,*et al.* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on plant photosynthesis[J]. Ecology and Environment,2006,15(5):1096-1100. (in Chinese)

[14] 陈慧新,余新晓,杨新兵,等. 北京山区 6 种乔木树种的光合特性研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(36):20953-20955.  
CHEN H X,YU X X,YANG X B,*et al.* Photosynthetic characteristics of six arbor species in Beijing mountainous area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2010,38(36):20953-20955. (in Chinese)

[15] 齐书香,李清芳,马成仓,等. 6 种常见绿化树种气体交换特征比较研究[J]. 天津师范大学学报:自然科学版,2010,30(4):50-55.  
QI S X,LI Q F,MA C C,*et al.* Comparative study of leaf gas exchanges in six greening tree species[J]. Journal of Tianjin Normal University: Nat. Sci. Edi. ,2010,30(4):50-55. (in Chinese)

[16] 徐飞,郭卫华,王玉芳,等. 济南市校园 6 个绿化树种光合荧光特征比较初探[J]. 山东大学学报:理学版,2007,42(5):86-94.  
XU F,GUO W H ,WANG Y F,*et al.* Photosynthetic fluorescence characteristics of six greening tree species on university campuses in the city of Jinan [J]. Journal of Shandong University,2007,42(5):86-94. (in Chinese)