

文章编号:1000-694X(2005)05-0744-06

干旱、盐胁迫下的植物水势研究与进展

付爱红^{1,2}, 陈亚宁^{1*}, 李卫红¹, 张宏锋^{1,2}

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 近几十年来, 国内外许多学者潜心研究植物水势, 在植物水势概念的提出与发展、不同植物水势的日、年变化特征及其与环境因子的关系、植物叶、茎等不同部位水势对于干旱胁迫的变化以及对不同土壤盐分或自身不同含盐量的反映等方面, 已经取得了非常显著的成果, 积累了许多宝贵的经验。然而, 该研究领域仍存在许多的漏洞与不足。笔者从研究对象、目标及内容等方面针对性地提出了今后应加强研究的方向。主要体现在, 基于西部干旱区干旱缺水、风沙大、土壤盐碱度高的环境特点, 可以借助于研究干旱区植物水势的特点, 来揭示植物的抗旱和抗盐特性, 创新之余也弥补了以往研究的不足。

关键词: 植物水势; 研究进展; 研究方向

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A

水势是植物水分亏缺或表示水分状况的一个直接指标, 它与土壤-植物-大气循环系统(简称SPAC)中的水分运动规律密切相关。对于生长活跃的植物来说, 有必要保持一个连续的“液相”, 这个“液相”从土壤水经过植物维管系统及所有途径到达叶肉细胞, 叶肉细胞壁将“液相”水变成水蒸汽进入“气相”水, 然后通过胞间隙、气孔内室、气孔扩散到大气中。这个系统被称为土壤-植物-大气连续体系^[1]。在植物的SPAC系统中, 水分在植物体内的运输决定于水分的自由能, 表现为水势的高低, 同时植物组织的水势愈低, 则吸水能力愈强, 反之水势愈高, 则吸水能力愈弱, 将水分输送到其他较缺水细胞的能力就愈强, 这可用以确定植物的受旱程度和抗旱能力, 也可作为合理灌溉的生理指标。因此, 在作物水分生理的研究中常有测定的必要^[2]。

在植物各部位的水势中, 叶水势代表植物水分运动的能量水平, 是组织水分状况的直接表现, 反映植物在生长季节各种生理活动受环境水分条件的制约程度。气温、空气相对湿度、可见光强度、光合有效辐射、植物叶片的蒸腾速率等均影响植物水势的变化。而通过对茎水势或木质部水势与叶水势的比较, 可以获知植物是否已经处于干旱胁迫状态, 当茎水势或木质部水势低于叶水势时, 可以确定植物已经受到干旱胁迫, 只有当土壤供水充足时, 茎水势

才能高于叶水势, 茎才能不断地将水分输送到叶片来弥补叶片的蒸腾耗水^[3]。因此, 研究植物水势尤其是叶、茎水势与气孔导度、蒸腾速率以及其他环境因子的关系, 不仅对指导农作物合理灌溉, 进行农田水量平衡计算有着重要的生产指导意义, 而且对进行土壤-植物-大气循环系统中的水分运动规律及其相互关系研究等方面还具有重要的学术意义。

1 植物水势概念的提出

在植物生理学史上, 最初用热力学原理去考察植物细胞水分关系的学者是我国著名植物生理学家汤佩松教授和著名热力学学家王竹溪教授。汤佩松与王竹溪提出, 用水的化学势标志细胞的水分状态, 用细胞与其环境之间水的化学势差标志细胞吸水或失水, 用水的蒸汽压差测定细胞与其环境之间水的化学势差^[1]。1947年Boyer建议, 植物的水分移动也用同一方法解释^[1], 但是植物学家当时对于根据热力学来解释尚不易接受, 直到1960年Slatyer和Taylor的论文出现后水势这一概念才开始被人采用^[1]。1966年Kramer进一步讨论了水势这一热力学概念后^[4], 植物生理学家才普遍承认并广泛采用植物水势的概念。

水势是从化学势(Chemical Potential)概念引伸出来的。化学势是用来描述体系(System)中各

收稿日期:2004-04-19; 改回日期:2004-05-17

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2004CB720201); 中国科学院知识创新项目资助

作者简介:付爱红(1979—), 女(汉族), 山西孝义人, 硕士研究生, 主要从事生态环境与恢复等方面的科学研究工作。

E-mail: xiaohong7918@yahoo.com.cn

* 通讯作者:陈亚宁(E-mail:chenyn@ns.xjb.ac.cn)

组分发生化学反应的本领及转移的潜在趋势的物理量。所谓化学势,即在一定条件下,一摩尔物质(不论是纯的,或存在于溶液中的,或任何体系中的)所含的自由能。而何为自由能呢?当我们把某种染料或有色固体水溶性物质放入水中时,它们就会自然地扩散开来,最终形成均匀的有色溶液,这种现象就是溶质的扩散现象。溶质的分子或离子之所以能在水中扩散,能够自发地从高浓度区域向低浓度区域运动,是因为溶质颗粒含有运动的潜能,即可以用来做功的能量,就叫自由能(Free Energy)。物质所含自由能的多少一般用化学势表示。

由于水的化学势代表的是能量,而植物生理学在涉及到细胞的水分关系时常用压力单位水势(ψ)表示能量,所以存在一个单位换算问题。

由于:能量单位是焦耳(J), $1\text{ J}=1\text{ N}\cdot\text{m}$ (牛顿 \times 米),压力单位是帕(Pa), $1\text{ Pa}=1\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ (牛顿 \times 米 $^{-2}$),

所以:能量/压力= $1(\text{N}\cdot\text{m})/1(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})=\text{m}^2(\text{米}^2)$ (体积)

因此,压力=能量/体积

这样,可以将压力看作是单位体积中的能量,由于我们讨论的是水的化学势,上式中的体积便是指水的体积,是溶液中水的偏摩尔体积。我们把每偏摩尔体积的水与纯水的化学势差就叫做水势(ψ)^[5]。

$$\psi = \Phi/\bar{V}_w = (\mu_w - \mu_w^0)/\bar{V}_w = \Delta\mu_w/\bar{V}_w$$

由于纯水的化学势规定为零($\mu_w^0=0$),所以,纯水的水势

$$\psi_w = (0-0)/\bar{V}_w = 0$$

2 植物水势研究进展

按照土壤-植物-大气连续体系理论,植物在这个连续体系的中部,它既受土壤水相也受大气气相的影响。因此,国内外许多学者在研究植物水势时,都主要从土壤和大气两方面着手,分析在不同的土壤供水条件或不同的土壤盐分下各种植物水势日变化特征,比较不同植物所具有的抗盐、抗旱特性,以图有助于制定有效的灌溉与施肥方案;此外,通过探讨光照、气温、相对湿度及可见光强度等气候因子对植物水势的影响,可以了解植物适应环境的生理变化特征。

在对植物干旱、盐胁迫环境下的水势变化研究方面,国外学者主要集中于研究植物在经过不同处理后其叶、茎水势对于干旱胁迫的变化状况,还着重于探讨当土壤供水条件良好时,植物自身不同含盐量

对其叶、茎水势的影响,以及植物在施肥前后叶、茎水势的变化状况。此外,许多学者还特别重视不同时段茎、叶水势对土壤水势的反映情况,特别是对黎明前叶水势能否有效地反映土壤水分状况研究居多。

在植物的叶、茎水势对于干旱胁迫的变化研究方面,Morte等认为将沙漠菌引进干旱环境可能会成为开发荒地的一条有利途径^[6]。1999年他们为了分析比较与沙漠菌共生的灌木和未与沙漠菌共生的灌木,在灌溉充足与干旱胁迫条件下的生长状况,设计并实施了一个实验:将一种与真菌 *Terfezia clavertyi* 嫁接后的灌木小苗和未经嫁接的同种灌木小苗同时移植在温室内,4个月后,选择8棵与真菌嫁接的灌木和8棵未与真菌嫁接的灌木进行水分胁迫实验,其中,每组中4棵给予充足的水分供应,另外4棵在3周内通过减少灌溉次数及灌溉量,使其处于水分胁迫状态。随后测量了叶片的气孔导度、光合速率以及叶绿素含量等,并在干旱胁迫的末期,利用美国土壤水分器材公司生产的压力室对10cm长的灌木叶片进行了水势测定,测定时间选在中午12:00到下午15:00这段水分胁迫程度最大的时期。然后,对测定所得的数据进行了均值比较与方差分析以及 *t* 检验分析。经研究发现,在供水充足的情况下,与 *Terfezia clavertyi* 这种沙漠菌共生的某些灌木其叶水势可以保持较低的水平;在干旱胁迫情况下,这些植物的叶水势不会强烈地下降。土壤供水条件良好时,有沙漠菌共生的灌木其叶水势比没有沙漠菌共生时要高14%,而土壤水分不足时,前者比后者高26%。干旱胁迫的末期,与沙漠菌共生的植物的存活率比未与沙漠菌共生植物的存活率高50%。这是因为灌木与这种沙漠菌共生时其蒸腾强度、气孔导度以及光合作用均比未共生灌木高,当叶水势下降时前者的蒸发强度等均比后者下降的快,叶水势达到很低时前者能及时地关闭气孔;而且,前者每片叶子的叶绿素含量普遍比后者高,在干旱胁迫的情况下其差异更加明显,较高的叶绿素含量可以提高灌木进行光合作用的概率。

2003年Zhu等人对经过 Paclobotrazol 一种植物生长抑制剂处理的苹果幼树和未接受处理的苹果幼树在受到干旱胁迫时,叶水势的变化情况进行了比较分析。结果发现在受到干旱胁迫时,叶水势均下降,但经 Paclobotrazol 处理后叶水势会有所回升^[7]。

在植物叶、茎水势对不同土壤盐分或植物自身

不同含盐量的响应研究方面, Donovan 等人^[8]于1999年在乔治大学的温室中, 将叶片含盐量分别为0与100 mM的耐盐灌木 *Sarcobatus* 和叶片含盐量分别为0 mM、100 mM、300 mM以及600 mM的非耐盐灌木 *Chrysothamnus* 随机地移植在温室里, 并给予充足地灌溉, 待灌木成活后, 分别使用标准室热电藕和压力室对黎明前的叶、茎水势、土壤水势和午间茎水势进行了测定与分析, 通过研究叶片含盐量不同的耐盐和非耐盐灌木茎、叶水势变化状况, 发现不论是耐盐还是非耐盐灌木, 其茎、叶水势均随着叶片盐分含量的增大而减小, 这是因为叶片盐分增大时, 植物的叶部及基部的非原质体内溶解了一些 Na^+ 、 K^+ 离子, 使溶液浓度增大, 水势下降所致。

1996年 Mrema 和 Granhall 研究了水分胁迫对施肥的植物与未施肥的植物叶水势以及植物生长的影响^[9]。研究中不仅得出水分胁迫会导致叶水势下降的结论, 而且, 发现施肥的植物对水分胁迫更加敏感, 未施肥的植物拥有较高的叶水势。植物的固氮作用会在水分胁迫和使用肥料的相互影响下趋于停止, 在受到水分胁迫20 d后施肥植物的固氮作用会完全停止。于是, 得出叶水势可以作为预测豆类植物、灌木以及一些树木的固氮作用发生变化的指示剂。

在植物叶水势能否有效地反映土壤水分亏缺状况的讨论方面, Donovan 等人^[8]于1999年不仅研究了叶片含盐量分别为0 mM与100 mM的耐盐灌木 *Sarcobatus* 和叶片含盐量分别为0 mM、100 mM、300 mM以及600 mM的非耐盐灌木 *Chrysothamnus* 在不同土壤水势下茎、叶水势变化状况, 还探讨了这些叶片含盐量不同的灌木黎明前茎、叶水势与土壤水势的不平衡机理, 发现在不同叶片含盐量下, 黎明前的叶、茎水势与土壤水势均表现出了一定的不平衡状况, 当叶片含盐量为0 mM时, 茎水势与土壤水势差距较大, 当叶片含盐量为600 mM时, 叶水势与茎水势之间的差距非常大。他们认为造成这种不平衡的主要原因是夜间温室未盖大棚, 植物大量的蒸发。但是, 他们还发现当夜间温室被大棚覆盖, 植物不发生蒸发时, 仍然会出现相同的结论, 即黎明前茎水势与叶水势相差较大, 对此, 他们给予了另外的解释, 即不论叶片的含盐量有多高, 叶片的非原质体内溶解的 Na^+ 、 K^+ 离子均比茎部多, 叶片内溶液浓度较茎部大, 叶水势较茎部低, 然而, 有关茎与土壤之间水势差较大的原因, 除了解释为根部积累了某些溶解物离子, 根部水势减小, 致使根输送水分到茎部的能力减弱, 茎部水势也减小以外, 详细的解释

还不很确切。于是他们得出黎明前叶、茎水势不能很好的反映土壤水分状况。

然而, 最近研究发现与叶水势相比气孔导度能更好地反映土壤水分状况^[10], 他们认为气孔对木质部 ABA(脱落酸)变化的敏感程度大于叶水势^[11,12], 而有些人认为午间茎水势比叶水势更能很好地反映土壤水分的大小^[13], 可是, 许多学者在仔细研究后发现, 叶水势的减小与叶片气孔导度的下降是相联系的^[14], 这表明叶水势和土壤水分状况之间存在非常紧密的联系。同时, Zhu 等人在研究苹果在受到干旱胁迫时, 也发现反映最迅速的是叶水势的下降, 因此, 他们认为在干旱环境胁迫下, 植物叶水势是最敏感指标^[7]。

与国外学者研究水势的状况相比, 国内学者更侧重于植物水势的基础性研究, 大量的文章都着重于反映植物的抗旱机理以及植物不同部位水势尤其是叶水势的日变化特征及其与环境因子的关系。然而, 有关植物抗盐机理的研究却寥寥无几。

根据土壤含水量的不同, 可以将土壤分为土壤充分湿润、中度水分亏缺及严重水分亏缺三类。大量研究发现, 在土壤水饱和的情况下, 植物水势的日变化与不同土壤含水量都无显著相关关系, 而当土壤供水不足时, 植物水势会随着土壤含水量的下降而降低。当土壤严重缺水植物受到干旱胁迫时, 根部能合成大量的 ABA, 并随蒸腾流运到地上部, 为叶片提供水分亏缺信号, 调节植物的生长发育和气孔导度。20世纪90年代初, 郭连生和田有亮研究了9种阔叶幼树耐旱性生理指标和叶水势与土壤含水量的关系^[15], 发现在田间栽培, 土壤充分供水条件下, 这些树种的蒸腾速率仍然受自身叶片水分状况的调节。水势和蒸腾的相关直线斜率最大的树种其抗旱力最弱, 其叶水势随其蒸腾速率的增强而迅速下降, 很快会降到临界值以下而使其正常生理活动受到抑制。这种方法可以作为比较不同树种的叶水势对蒸腾调节控制能力的度量。当土壤水分胁迫时, 其蒸腾速率与土壤含水量和叶水势的关系最为密切。研究证明, 幼树的清晨叶水势与其土壤含水量之间有互为指数的关系式, 可利用其关系式中“临界值”的大小来比较不同树种抗旱性的强弱, 即临界值越小, 其抗旱性越强^[15]。另外, 油菜叶水势也随土水势的降低而降低, 但降低的比值随土水势的降低而逐渐降低, 即叶水势的降低有滞后性^[14]。

对于结果实的植物来说, 无论土壤湿润或干旱, 摘果后6 h, 去果处理的叶水势都低于留果处理的叶

水势。这是因为果实存在时,叶片会从附近的果实抽取水分来弥补自身因蒸腾损失的水分。此外,在光照弱、湿度大、气温不高的阴雨天,土壤水分充足时,留果与去果午间叶水势均无明显下降,且去果与留果两者的叶水势差异不明显;至傍晚时叶水势明显回升。土壤严重干旱时,午间叶水势明显下降,傍晚与夜间叶水势回升甚微,留果与去果处理间差异不明显。尽管去果处理的午间叶水势下降幅度大于留果,但其傍晚叶水势回升幅度却明显超过留果处理^[17]。

目前,国内有关植物水势对不同土壤含盐量的响应研究尚属空白,仅有少量的文章也只是反映不同土壤盐分对土壤水势的影响。2000年李小刚^[18]在研究土壤含盐量对土壤水汽吸附及土壤水能量状态影响的过程中,发现盐分对土壤水汽吸附具有显著影响,其影响在水汽饱和度大于65%时最大,而且,含盐量对土壤水汽吸附量的影响随含盐量的增加而增大,在饱和度小于65%时相对较小;盐分能非常显著地降低土壤水势,低水势段以及在相当大的含水量范围内渗透势的绝对值远大于基质势的绝对值,说明含盐量的增加所导致的渗透胁迫是盐化土壤中作物生长非常严重的限制因素。

植物叶水势的变化规律是对外界环境条件变化的综合反映,除了受土壤水分和盐分等因子影响外,气候因子也极大地影响着植物叶水势或其他部位水势的变化。事实上许多学者在研究植物水势的过程中,总是将这些环境因子结合起来,探讨不同土壤水分或盐分状况下,光照、空气相对湿度等气候因子给植物水势造成的影响^[19,20]。因此,在研究外界环境因子主要是气候因子对植物水势的影响变化,测量并分析植物不同部位包括根、茎和叶水势的日变化特征时,总是先提出其前提条件,即植物所在地的土壤水分或盐分状况。

在不同植物水势的日变化特征研究方面,发现大多数植物叶水势拥有大致相同的日变化趋势^[20-22],即清晨植物叶片水势较高,越到中午随着气温的升高,蒸腾强度的加大,叶水势呈下降趋势,到午后3:00时左右达到最低点,这以后随着光照强度的减弱,蒸腾速率减小,叶片水分损失减少,叶水势又开始回升,到夜间达到最大,如桑树叶水势的日变化趋势就符合这样的变化特征^[23]。对茎水势来说,目前研究较少,从少量的研究中获知,茎水势的日变化趋势与叶水势正好相反,即早晨茎水势较低,中午随着叶片大量蒸腾失水,叶片需要从邻近的组织茎吸收水分来弥补自身水分的亏缺,茎又从根部

吸收水分,在土壤充分湿润时,根系可以源源不断地从土壤吸收水分,在这个动态平衡过程中,茎、叶水势梯度较大,茎水势较高;而后蒸腾减弱,茎需要提供给叶片的水分大大减少,蒸腾拉力减小,茎水势开始下降^[23]。相对于茎水势来说,对植物根部水势的研究较多。而且,主要侧重于研究植物根系的吸水机理^[24,25]。这些都是土壤不受水分胁迫的情况下得出的结论,当土壤水分严重亏缺时,叶水势虽然也反映出大致相同的日变化趋势,但叶水势普遍比土壤湿润情况下的叶水势低,像干旱区的胡杨叶水势比油菜、苹果等湿润区植物的叶水势要低的多;而茎水势日变化不明显,中午茎叶水势差异缩小为0;在水分极度亏缺时,茎水势会低于叶水势^[3],这与气孔关闭导致叶水势短时间回升有关,新疆塔里木河流域的胡杨茎水势普遍低于其叶水势,就是土壤严重缺水造成的。

在影响植物水势的气候因子中,最受关注的因子有气温、光照、相对湿度及可见光强度等。通过分析与比较这些气候因子与植物叶水势的相关性大小,可以说明哪些环境因子对植物叶水势的变化起主导作用,哪些起次要作用。李卫国等人^[23]于2002年发现影响桑树水势的主要因子有光照、可见光强度,其次为气温、空气相对湿度等,并且还发现低温、高湿的环境有利于某些桑树的高速生长。于是,他们提出采取有效地管理措施,既可以提高桑树的产量,也可以节约水量,避免水的浪费。如,在夏季对桑园进行适时灌溉(用喷灌最好)可以降低桑园的温度,增加空气的湿度,减少水分的蒸腾,从而,可以满足桑树对水分的需要,同时,对提高桑树的水分利用率、光合性能及克服“午休”也有一定的积极作用。若水源充足,可在5~8月份充分利用气孔导度、蒸腾速度高的优势,加大对水分和肥料的投入,促使桑树迅速生长,增加树势。

植物不同生育期叶水势的日变化规律、植物不同部位叶水势的比较及其与环境因子的关系也有所研究。马瑞昆和贾秀领等^[26]发现在灌水措施上应较好地保证开花期前后的土壤供水,因为植株在强烈蒸腾情况下,会过多地消耗根际周围的土壤水分,使土壤—植株水分状况在一夜内难以恢复平衡,这将不同程度地影响光合功能和物质代谢,所以,维持开花期较高叶水势有利于提高作物的产量。另外,还发现叶片在植株上的着生部位不同,蒸腾强度不同,叶水势也不同。上层叶片的蒸腾强度最高,叶水势最低;下层叶片的蒸腾强度最低,叶水势最高,但它们的

日变化趋势是相似的。各部位叶片的蒸腾强度均在12:00左右增至最大,其后逐渐降低,变化趋势相似。对叶水势来说,白天(08:00~20:00)下部叶片的叶水势高于中上部叶片,叶片的着生部位愈高,叶水势愈低;而夜间各部位叶片的叶水势相差不大。

在对天然植物生存的地下水位埋深研究方面,Chen等通过对塔里木河下游不同地下水位条件下天然植物生理响应的研究,提出了胡杨生存的临界地下水位为9 m这一科学问题,引起了众多学者的关注^[27]。

3 植物水势研究展望

近年来,国内外学者在植物水势的研究中已经取得了非常显著的成果,积累了许多宝贵的研究经验,纵观国内外有关植物水势的研究现状,发现应从研究对象、研究目标以及研究内容等方面分别提出植物水势的研究方向,这样便于针对性的开展学术研究与讨论。

首先,从研究对象——植物的角度来看,当前有关湿润环境中生长的各种蔬菜、果树各部位水势的研究已经很多,而在干旱区天然植物,如胡杨、柽柳、罗布麻、骆驼刺等的根、茎、叶水势的研究尚不多见。在我国西部的干旱区,沙漠化虽有一定程度的制止,但仍然很严重,环境退化现象还很频繁,已引起学术界的广泛关注^[28-30]。从植物生理学的角度出发,基于这些植物防风固沙等功效,探讨不同环境条件下的植物水势变化特点,揭示干旱、盐胁迫环境下植物的抗旱与抗盐机理,对于我国西部地区荒漠生态保育和人工加速植被恢复,具有重要的指导意义。

其次,从研究目标来看,过去的研究多集中于了解植物的抗旱特性,掌握植物不同生育期以及不同季节对水分的需求,提出适宜的灌溉策略。而有关植物抗盐特性的研究甚少,在我国西部干旱区土壤盐碱化问题日益严重,了解植物的抗盐机理,对制定合理的施肥方案非常重要。

再次,从研究内容来看,应加强植物不同部位(包括根、茎、叶以及果实)水势特别是植物根以及果实部位水势的研究,以便全面详细地掌握水分或盐分在植物不同部位之间的运输与存储机理。此外,国内外学者已撰写了大量关于植物水势日变化特征及其与环境因子关系的文章,而有关植物抗旱特性的探讨也已不乏其人,相比较之下,植物在盐胁迫情况下不同部位水势的变化以及其盐胁迫机理的研究还很匮乏。因此,进一步加深植物水势研究的内涵,加强植物水势对盐胁迫环境的响应研究势在必行。

有些地区如新疆的塔里木河下游,由于长期的河道断流,地下水位很低,加之降水稀少,河道两岸的植被覆盖率大大减少,自从2000年对塔里木河下游实施生态输水以来,地下水位明显回升,土壤含水率有所增加,但土壤水分还很亏缺^[31],这时研究植物水势与土壤水分之间的关系就显得困难重重,于是,有必要重视植物水势与地下水位之间的相互联系。通过研究不同干旱、盐胁迫环境下的植物水势变化,揭示植物受干旱、盐胁迫的过程和程度,进而探讨不同荒漠植物生存的合理生态水位、胁迫水位和临界地下水位问题,为确立干旱荒漠区维系天然植被生存的生态需水量提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] 廖光瑞. SPAC的水势热力学系统[J]. 四川林业科技, 1999, 12(1): 47-52.
- [2] 山东农学院, 西北农学院. 植物生理学实验指导[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1982. 121-128.
- [3] 杨朝选, 王高峰. 干旱过程中桃树茎和叶水势的变化[J]. 果树科学, 1999, 16(4): 267-271.
- [4] Kramer P J. Plant and soil water relationships; a modern synthesis[M]. New York: McGraw Hill Book Co, 1965.
- [5] 戈家英. 水势概念的引入[J]. 高等函授学报(自然科学版), 2000, 13(5): 53-54.
- [6] Morre A, Lovslo C, Schubert A. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum aemense Terfezia clavaryi* [J]. *Mycorrhiza*, 2000, 10: 115-119.
- [7] Zhu L H, Peppel A V D, Li X Y, et al. Changes of leaf water potential and endogenous cytokinins in young apple trees treated with or without paclobutrazol under drought conditions [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 99(2): 133-141.
- [8] Donovan L A, Grise D J, West J B, et al. Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold desert shrubs[J]. *Oecologia*, 1999, 120: 209-217.
- [9] Mrema A F, Granhall U, Senerby Forsse plant growth, leaf water potential, nitrogenase activity and nodule anatomy in *Leucaena leucocephala* as affected by water stress and nitrogen availability [J]. *Trees Structure and Function*, 1997, 12(1): 42-48.
- [10] Davies W J, Zhang J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil [J]. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 1991, 42: 55-C76.
- [11] Tardieu F, Davies W J. Stomatal response to abscisic acid is a function of current plant water status [J]. *Plant Physiol.*, 1992, 98: 540-C545.
- [12] Tardieu F, Davies W J. Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants [J]. *Plant Cell Environ.*, 1993, 16: 341-C349.

- [13] Cutchan M, Schackel H K A. Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L.) [J]. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 1992, 117: 607-651.
- [14] Atkinson C J, Policarpo, Webster M, et al. Drought tolerance of clonal *Malus* determined from measurements of stomatal conductance and leaf water potential [J]. *Tree Physiol.*, 2000, 20: 557-563.
- [15] 郭连生, 田有亮. 9种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究 [J]. *生态学报*, 1992, 12(1): 47-52.
- [16] 张明炆, 石秀兰. 不同土水势对油菜的影响及适宜灌水势值研究 [J]. *农田水利*, 1992, 5: 8-11.
- [17] 叶其崑, 黄辉白, 高飞飞. 柑桔叶与果之间的水分转移, 水势测定与氡水示踪的新证据 [J]. *园艺学报*, 1989, 16(1): 5-10.
- [18] 李小刚. 含盐量对土壤的水汽吸附及土壤水能状态的影响 [J]. *土壤通报*, 2001, 32(6): 245-249.
- [19] 阮成江, 李代琼. 半干旱黄土丘陵地区沙棘叶水势及其影响因素 [J]. *陕西林业科技*, 2000, (1): 1-4.
- [20] 刘玉燕, 王艳荣, 杨迎春. 半干旱地区草坪草和主要杂草水势日变化特征分析 [J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2003, 34(3): 308-311.
- [21] 白瑞琴, 孙丽华, 吕占江, 等. 不同砧木苹果树水势日变化的研究 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 2000, 21(1): 63-68.
- [22] 杨丽诗, 陈超军, 李杨瑞, 等. 甘蔗叶片气体交换及对光的响应和水势的日变化 [J]. *甘蔗*, 2002, 9(2): 1-9.
- [23] 李卫国, 杨吉华, 冀宪领, 等. 不同桑树品种水分生理特性的研究 [J]. *蚕业科学*, 2003, 29(1): 24-27.
- [24] 康绍忠, 张建华, 梁建生. 土壤水分与温度共同作用对植物根系水分传导的效应 [J]. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 211-219.
- [25] 凌祖铭, 李自超, 余华, 等. 水、陆稻根部性状的研究 [J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(3): 7-11.
- [26] 马瑞昆, 贾秀领. 高产冬小麦节水栽培的叶水势特征 [J]. *作物学报*, 1995, 21(4): 451-457.
- [27] Chen Y N, Chen Y P, Li W H, et al. Response of the accumulation of Prolin in the bodies of *Populus euphratica* to the change of groundwater level at the lower reaches of Tarim River [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2003, 48(18): 1995-1999.
- [28] 王涛, 吕薇, 薛辉, 等. 中国北方沙漠化土地时空演变分析 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 230-235.
- [29] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题——2. 沙漠化的研究内容 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(5): 477-482.
- [30] 周欢水, 申建军. 中国西部沙漠化的分布、动态及其对生态环境建设的影响 [J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 112-117.
- [31] 徐海量, 陈亚宁, 杨戈. 塔里木河下游生态输水对植被和地下水位的影响 [J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 18-22.

Research Advances on Plant Water Potential under Drought and Salt Stress

FU Ai-hong^{1,2}, CHEN Ya-ning¹, LI Wei-hong¹, ZHANG Hong-feng^{1,2}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Water potential is one of the most direct indexes in denoting plant moisture condition. In the recent several decades, many domestic and overseas scholars are having researched plant water potential with great concentration. Thereinto, overseas scholars mostly fastened on studying the change of water potential in leaves and stems under drought stress after accepting different treatments, and on discussing the impact of the different amount of salt content in plant or fertilization to the water potential of leaves and stems. In addition, many scholars also especially attached importance to whether the predawn leaf water potential could effectively reflect the soil moisture condition or not. Comparing with overseas scholars, domestic scholars even more emphasized particularly on the basic research about plant water potential. A lot of articles all expatiated on the character of the daily variation of plant leaf water potential and the relation with environment genes. Nevertheless, it is lack of research on the character of plant water potential under salt stress. After understanding the research actuality on plant water potential, we pertinently put forward the existent problems at present and research prospect: based on the environmental characters of arid climate, lacking water, severe sand blowing and high soil salt-alkalinity in the arid zone of West China, we may open out the plants speciality in fighting drought and salt in virtue of studying the plant water potential in arid zone.

Key words: plant water potential; research advance; research prospect