

保水剂与基质水分对侧柏水分利用特征的影响

刘潇阳¹, 王进鑫²

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究基质含水量和保水剂浓度对侧柏水势、水分利用效率和蒸腾速率的影响, 为不同降雨地区铅锌尾矿库植被重建与生态恢复中保水剂的科学施用提供理论依据和技术支撑。[方法] 以一年生侧柏为研究对象, 采用二次通用旋转组合设计, 测定侧柏水势、净光合速率、蒸腾速率, 计算水分利用效率, 建立侧柏水势(ψ)、水分利用效率(WUE)、蒸腾速率(T_r)与保水剂浓度和基质含水量之间的回归模型, 分析基质含水量和保水剂浓度对侧柏水势、水分利用效率、蒸腾速率的影响。[结果] ①水势和蒸腾速率的回归模型主效应顺序为: 基质含水量 > 保水剂浓度; 水分利用效率的回归模型中保水剂浓度 > 基质含水量; ②水势最高时保水剂浓度为 0.1%, 基质含水量为 19.73%; 水分利用效率最大时保水剂浓度为 0.1%, 基质含水量为 7.89%, 蒸腾速率最小时保水剂浓度为 1%, 基质含水量为 7.89%。[结论] 使用 0.1%~0.23% 低保水剂浓度, 有利于侧柏从改良铅锌尾矿基质中获取水分, 起到促进叶片二氧化碳固定, 提高水分利用效率的作用。

关键词: 铅锌尾矿; 改良尾矿砂基质; 侧柏; 水势; 蒸腾速率; 水分利用效率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0205-06

中图分类号: S152.7, S728

文献参数: 刘潇阳, 王进鑫. 保水剂与基质水分对侧柏水分利用特征的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 205-210. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.030; Liu Xiaoyang, Wang Jinxin. Effects of super absorbent polymer and substrate water content on water use characteristics of *Platycladus orientalis* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 205-210.

Effects of Super Absorbent Polymer and Substrate Water Content on Water Use Characteristics of *Platycladus Orientalis*

Liu Xiaoyang¹, Wang Jinxin²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The effects of substrate water content and super absorbent polymer on the water potential, water use efficiency and transpiration rate of *Platycladus orientalis* were studied, in order to provide theoretical basis and technical support for the application of super absorbent polymer in vegetation reconstruction and ecological restoration of lead-zinc tailings ponds in areas with different rainfall. [Methods] The test used a quadratic general rotation combination design. The measured indicators included the water potential, net photosynthetic rate, transpiration rate, and water use efficiency of the annual *Platycladus orientalis*. A regression model between the water potential(ψ) of the leaf, the water use efficiency (WUE), transpiration rate (T_r) and the concentration of super absorbent polymer and substrate water content was fitted. [Results] ① The main effect sequence of the regression model of water potential and transpiration rate was: substrate water content > concentration of super absorbent polymer; the main effect sequence for the regression model of water use efficiency was: concentration of super absorbent polymer > substrate water content. ② When the water potential reached the highest point, the concentration of super absorbent polymer applied was

收稿日期: 2019-09-09

修回日期: 2019-11-03

资助项目: 陕西省科技统筹计划项目“铅锌矿区尾矿库生态修复关键技术研究及示范”(2016KTCL03-18)

第一作者: 刘潇阳(1995—), 女(汉族), 陕西省延安市人, 硕士研究生, 研究方向为林草生态工程。Email: liuxiaoyang_hazel@outlook.com。

通讯作者: 王进鑫(1962—), 男(汉族), 甘肃省镇原县人, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区人工植被生态恢复与环境生态学理论研究。Email: jwang118@126.com。

0.1%, the substrate water content was 19.73%; when the water use efficiency was highest, the concentration of super absorbent polymer applied was 0.1%, the substrate water content is 7.89%; when the transpiration rate was the minimum optimal, the concentration of super absorbent polymer applied was 1%, and the substrate water content was 7.89%. [Conclusion] Low super absorbent polymer application amount (0.1%~0.23%) is beneficial to the extraction of water from the modified lead-zinc tailings matrix, which also promotes the fixation of carbon dioxide in the leaves and improves the water use efficiency.

Keywords: lead-zinc tailings; improved tailings sand matrix; *Platycladus orientalis*; water potential; water use efficiency; transpiration rate

我国西部地区快速发展的铅锌矿产业对工业生产发展和地区经济改善发挥了重要的作用,但开采、运输、冶炼等矿业活动不可避免的扰动原地貌、破坏原有植被,生产过程产生的废石、矿渣、尾矿砂等堆积占用土地,造成了矿业迹地及其周边土壤、水源甚至大气的污染。为了尽可能减少矿区生态破坏和环境污染,开展植被恢复与生态修复乃当务之急^[1]。传统尾矿库植被恢复采用客土法,存在客土来源十分困难、运输成本高以及进一步破坏植被、损毁原地貌,引起水土流失等问题。因此,开展稳定固化尾矿砂中的重金属,减小其生物学毒性、增加基质肥力等基质修复改良措施已成为目前研究的重要方向,并取得了可喜进展^[2,3]。然而改良基质颗粒大、大孔隙多、保水能力差,同时,由于地理位置及气候因素造成的干旱缺水也严重地影响了区域植被的种类、分布及生产力,对困难立地植被重建与生态恢复增添了难度。因此开展改良基质保水技术研究就成为当前铅锌尾矿库植被恢复的关键^[4],对充分利用干旱半干旱区有限水资源,恢复铅锌尾矿库植被,保护矿业迹地生态安全,无疑具有十分重要的理论与现实意义。保水剂在我国农、林业生产中的研究与应用已有几十年的历史,效果显著。保水剂对铅(Pb)有钝化固化效应且可有效减少水分深层渗漏^[5-7],但在矿区生态修复特别是尾矿砂基质中的保水研究与应用甚少,颗粒基质所含水分状况与保水剂施用量对基质上恢复植被水分状况的影响及两者之间的动态耦合关系尚未见报道。侧柏是西北地区常见的常绿造林树种,具有耐旱、耐盐碱的特点,杨楠^[8]、王瑜鑫^[9]等研究结果显示侧柏还具有抗铅性和转移系数小的特点,可以避免矿业迹地植被修复过程中植物落叶带来的二次污染。本研究以侧柏为研究对象,以添加了蘑菇渣重金属铅固化改良剂(前期试验筛选)的铅锌尾矿砂为栽培基质,研究基质含水量和保水剂浓度对侧柏水势和水分利用效率的影响,为不同降水条件地区铅锌尾矿库植被重建与生态恢复中保水剂的科学施用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

1.1.1 供试植物 侧柏选用长势一致的 1 a 生侧柏容器苗。苗木定植前,除去容器,用清水冲洗根系表面所附栽培基质。定植后,缓苗期进行正常水分管理。

1.1.2 供试基质 尾矿砂取自陕西省凤县留凤关镇铅锌尾矿,尾矿砂铅含量背景值为 5 555.40 mg/kg, 锌含量为 24 108.00 mg/kg, 铜含量为 472.10 mg/kg, 镉含量为 61.3 mg/kg, 铬含量为 405.5 mg/kg。将粉碎的蘑菇渣、尾矿砂过筛,除去较大结核及其他杂质。二者按比例(蘑菇渣:尾矿砂=1:18)^[10]充分搅拌、混匀。将风干的混合基质根据试验设计要求加保水剂,充分混匀后将混合基质装入容器中(高 27 cm、口径 29 cm),基质填装容重为 1.37 g/cm³。试验期间栽培基质保持自然肥力,不施肥。试验所采用尾矿砂基质为人工改良基质,不具有土壤自然发育形成的孔隙结构。田间持水量是土壤毛管悬着水达到最大时的土壤含水量,试验采用环刀法测得填装容重下改良基质最大悬着水持水量为 19.73%,等效这一数值为田间持水量。

1.1.3 供试保水剂 沃特牌林业专用保水剂,产自胜利油田长安控股集团有限公司,是我国“863”计划项目产品。属聚丙烯酰胺无机矿物型复合保水剂^[11],具有保水能力好、反复吸水能力强、耐盐碱性好等特点,试验采用颗粒大小为 0.841~0.425 mm。

1.2 试验方法

试验在陕西省杨凌区西北农林科技大学南校区人工旱棚内进行。试验采用二因素五水平二次通用旋转组合设计,共 13 个处理,每处理 4 重复。试验设定保水剂浓度变化范围为 0.1%~1%(保水剂浓度为质量百分浓度,即施用保水剂质量与基质干质量之比),基质含水量变化范围为 7.89%~19.73%。参考产品使用说明及杨浩^[12]、王瑜鑫等^[9]研究结果确定试验范围。查表得 $r=1.414$,因素水平编码详见表 1,设计结构矩阵详见表 2。土壤基质含水量采用称重法控制,为及时保持基质含水量在试验期间相对

平稳,基质表面铺设厚度 1~1.5 cm,粒径约 7 mm 的石子 2 kg,以减少基质表面水分蒸发,每两天称量一次并补充灌水。

表 1 试验因素和水平编码值

编码水平 x	保水剂浓度 $z_1/\%$	基质含水量 $z_2/\%$
1.414	1	19.73
1	0.87	17.95
0	0.55	13.81
-1	0.23	9.67
-1.414	0.1	7.89
Δ_j	0.32	4.04

注:编码值与实际值转换公式: $z_1=0.55\%+0.32\%x_1$; $z_2=13.81\%+4.04\%x_2$ 。

表 2 试验设计结构矩阵

处理	保水剂浓度 x_1	基质含水量 x_2	处理	保水剂浓度 x_1	基质含水量 x_2
T ₁	1	1	T ₈	0	1.414
T ₂	1	-1	T ₉	0	0
T ₃	-1	1	T ₁₀	0	0
T ₄	-1	-1	T ₁₁	0	0
T ₅	-1.414	0	T ₁₂	0	0
T ₆	1.414	0	T ₁₃	0	0
T ₇	0	-1.414			

1.3 测定指标与方法

(1) 叶片水势(ψ)。于 2018 年 9 月中旬选择晴朗天气,用 PMS Model 1 000 型植物水势测定仪测定幼苗水势。测定时间为早上 6:00—8:00,由于侧柏为鳞叶,故选取幼树中上部充分发育的小枝进行测定。

(2) 叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、水分利用效率(WUE)。与水势测定同一日,使用 CIRAS-3 便携式光合作用测定系统(PP-SYSTEMS, USA)进行净光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r)测定,水分利用效率

$$y_\psi = -0.544 - 0.031x_1 + 0.065x_2 + 0.060x_1^2 + 0.038x_2^2 + 0.032x_1x_2 \quad (4)$$

$$y_{WUE} = 1.442 - 0.077x_1 - 0.105x_2 + 0.114x_1^2 + 0.009x_2^2 - 0.005x_1x_2 \quad (5)$$

$$y_{Tr} = 2.791 - 0.061x_1 - 0.013x_2 - 0.343x_1^2 - 0.505x_2^2 + 0.065x_1x_2 \quad (6)$$

经检验,各回归模型的失拟项 $F_1 < F_{0.05}(3,4)$,回归项 $F_2 > F_{0.05}(5,7)$,可知拟合不足是不显著的、回归是显著的,所以建立的二次回归方程可用于保水剂浓度和基质含水量对侧柏水分利用特征的影响分析。

2.2 主效应分析

由表 3 可知基质含水量对侧柏水势有极显著影响($p < 0.01$),对水分利用效率有显著影响($p < 0.05$),对蒸腾速率无显著影响($p > 0.05$);保水剂浓度对侧柏水势、水分利用效率有显著影响($p < 0.05$),对蒸腾速率无显著影响($p > 0.05$)。在一个或几个因子的

(WUE)=净光合速率(P_n)/蒸腾速率(T_r)。测定过程中使用自然光源,测定时间 9:00—11:00 am,选择侧柏南侧中上部发育成熟、不受遮挡的小枝进行测定。叶面积校正采用李吉跃^[13]提出的经验公式进行计算:侧柏叶面积(cm^2)=161×叶干质量(g)。

1.4 数据处理与分析

响应变量叶片水势、蒸腾速率、水分利用效率与保水剂浓度、基质含水量的回归分析采用如下模型:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2 \quad (1)$$

式中: y 为响应变量; x_1, x_2 为保水剂浓度、基质含水量的水平编码值; b 为回归系数。

显著性检验采用 F 分布进行显著性检验。

指标贡献率计算用回归模型的各项回归系数的方差比 F_j, F_{jj}, F_{ij} 计算对应 δ ,求第 j 个因素的贡献率 Δ_j :

$$\delta = \begin{cases} 0 & (F \leq 1) \\ 1 - \frac{1}{F} & (F > 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta_j = \delta_j + \delta_{jj} + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j}^p \delta_{ij} \quad (3)$$

利用单因素效应分析(降维法)^[14]将建立的回归模型中两个因素中的一个固定在某一设计水平(零水平、 $\pm 1, \pm r$)得到单因素模型。

数据整理采用 Excel 软件,对数据进行算术平均值和方差计算,绘图使用 Origin 软件完成。

2 结果与分析

2.1 回归方程的建立和检验

按照二次通用旋转组合设计原理,建立保水剂浓度编码值(x_1)和基质含水量编码值(x_2)与侧柏水势(y_ψ)、水分利用效率(y_{WUE})、蒸腾速率(y_{Tr})之间的回归模型:

$$y_\psi = -0.544 - 0.031x_1 + 0.065x_2 + 0.060x_1^2 + 0.038x_2^2 + 0.032x_1x_2 \quad (4)$$

$$y_{WUE} = 1.442 - 0.077x_1 - 0.105x_2 + 0.114x_1^2 + 0.009x_2^2 - 0.005x_1x_2 \quad (5)$$

$$y_{Tr} = 2.791 - 0.061x_1 - 0.013x_2 - 0.343x_1^2 - 0.505x_2^2 + 0.065x_1x_2 \quad (6)$$

多水平试验中,描述一个因子在各水平上对响应变量影响大小的度量称为主效应。对于非线性模型,由于需要综合考虑各因素一次项、二次项,主效应分析不能孤立考虑系数大小,故采用贡献率分析法进行两因素对响应变量的影响比较。通过公式(2)–(3)计算得到表 3 中 Δ 值,水势和蒸腾速率的回归模型中 $\Delta_1 < \Delta_2$,则主效应顺序为:基质含水量 > 保水剂浓度;水分利用效率的回归模型中 $\Delta_1 > \Delta_2$,保水剂浓度 > 基质含水量。保水剂浓度×基质含水量对侧柏水势、水分利用效率和蒸腾速率均无显著耦合效应。

表 3 侧柏各水分水分利用特征回归模型及系数的显著性检验

模型	F_1	F_2	变量	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$
水势(ψ)	6.37	4.00	F 值	2.00	8.89*	6.46*	2.68	1.03
			δ 值	0.499	0.888	0.845	0.627	0.033
			Δ 值	1.361	1.531			
水分利用率(WUE)	4.52	8.73	F 值	9.25*	16.67**	16.76**	0.11	0.02
			δ 值	0.892	0.94	0.94	0	0
			Δ 值	1.832	0.94			
蒸腾速率(T_r)	0.63	5.81	F 值	0.363	0.016	10.06*	21.79**	0.208
			δ 值	0	0	0.901	0.954	0
			Δ 值	0.901	0.954			

注: **表示 $F > F_{0.01}$, *表示 $F > F_{0.05}$ 。

2.2.1 单因素效应分析 为获得干旱情况下保水剂浓度对响应变量的影响规律,将基质含水量固定在最低水平(-r 基质含水量 7.89%)代入公式(4)~(6)得到响应变量 y_ψ , y_{WUE} 和 y_{T_r} 以保水剂浓度为决定变量的一元回归模型(图 1)。在基质含水量为 7.89% 重度干旱情况下,随着保水剂浓度的增加侧柏水势先降低后升高,保水剂浓度较低时植物水分亏缺更小;瞬时水分利用效率随着保水剂浓度增大呈单调递减趋势;蒸腾速率呈开口向下的抛物线,在保水剂浓度为 0.48% 处取得最小值。当保水剂浓度为 0.1% 时,植物水分亏缺最小、水分利用效率最大、蒸腾速率处于中等水平。根据上述结论,将保水剂浓度固定在最低水平(-r),获得以基质含水量为决定变量的一元回归模型。由图 1 可知保水剂浓度最低时,侧柏水势在不同水分含量情况下变化较小;水分利用效率在低水分条件下更高;在最低保水剂浓度下各基质含水量水平植物蒸腾速率均处于较低水平。

2.2.2 因素水平优化组合 为寻求保水剂浓度与基质含水量最佳组合方式,根据多元函数极值理论分别对所建立的回归方程(4)~(6)求 y 对 x 的一阶偏导数,分别令 $\partial y / \partial x_1 = 0$, $\partial y / \partial x_2 = 0$,解联立方程组得到编码值 x_1, x_2 ,用表一中公式换算为实际值进行分析。
①水势。计算得到当保水剂浓度为 0.1%、基质含水量 19.73% (最大悬着水持水量) 时侧柏水势达到理论最大值 -0.330 MPa,水分状况最好;当保水剂浓度为 1%、基质含水量为 7.89% 时,侧柏水势最小为 -0.548 MPa。试验设计保水剂浓度均能不同程度提高侧柏水势,有效保障植物对水分的需求。
②水分利用效率。计算结果显示在 0.1% 保水剂浓度和 7.89% 基质含水量处取得叶片水分利用效率理论最大值为 1.94 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。结合图 2 可知,同时选取较低保水剂浓度和低基质含水量有利于提高植物水分利用效率。
③蒸腾速率。由于图 2 蒸腾速率对保水剂浓度 \times 基质含水量耦合效应响应面为开口向下得凸曲面,故极值计算

仅可得到蒸腾速率在保水剂浓度 0.52%、基质含水量为 13.81% 处取得最大值。结合响应面可以确定最优组合为保水剂浓度为 1%,基质含水量 7.89%,此时蒸腾速率为 0.922 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。保水剂对水分的缓释作用使侧柏呈现出高基质含水量时蒸腾作用受到抑制、低基质含水量蒸腾速率提高的趋势。

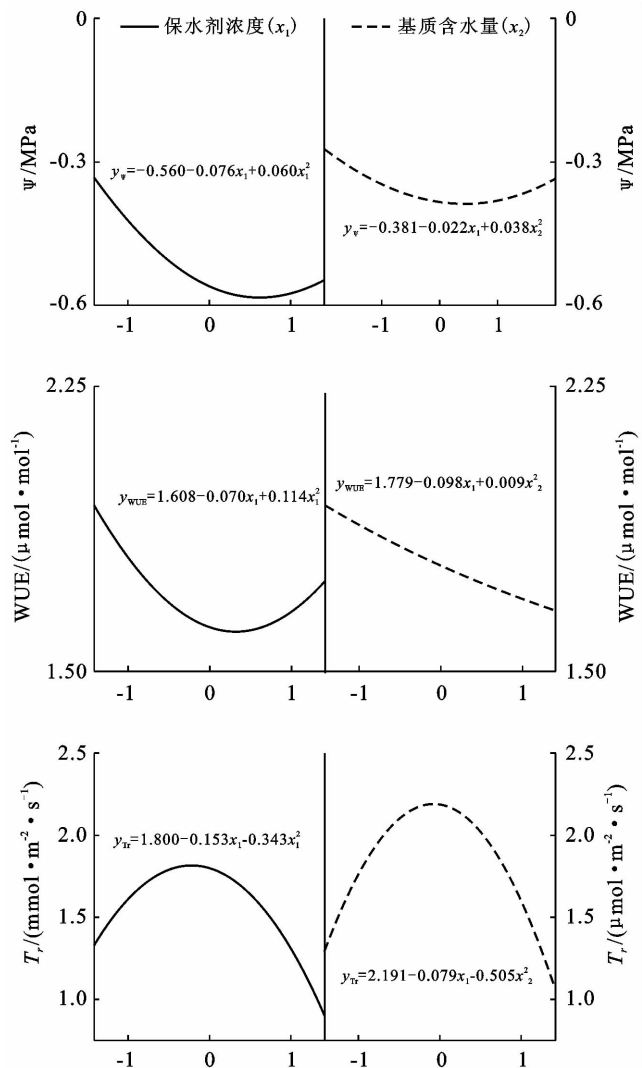


图 1 叶片水势(ψ)、水分利用效率(WUE)、蒸腾速率(T_r)的一元回归模型

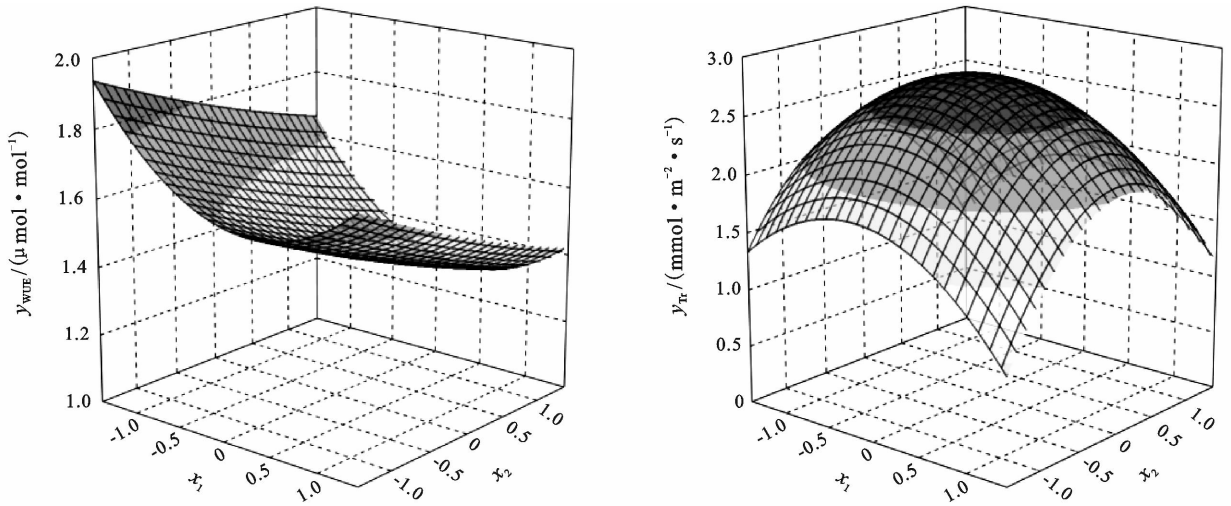


图 2 保水剂浓度×基质含水量耦合对水分利用效率和蒸腾速率的影响

3 讨论

3.1 水势

植物保持水分平衡是维持正常生长的重要条件,叶水势是通常用以反映植物水分饱和和亏缺的敏感指标之一。李吉跃^[15]研究认为侧柏在叶水势约 -6.44 MPa 时开始变色并永久萎蔫,张福计观测结果显示侧柏叶片在水势为 -1.7 MPa 时叶开始变色^[16],本试验中侧柏水势变化范围在 $-0.330\sim-0.548$ MPa 之间,远高于侧柏变色及凋萎时水势。铅背景值、干旱胁迫情况基本一致的情况下,侧柏水势比较结果显示:保水剂能有效降低铅锌尾矿基质中栽培的植物水分亏缺,提高基质中水分含量。侧柏在保水剂浓度 0.1% 处水分亏缺最小,低保水剂浓度可以满足耐旱植物侧柏对于基质水分环境的需求;在基质含水量最高水平处水分亏缺最小,在最低水平处水分亏缺最大。侧柏水势随基质含水量降低而降低,与刘俊峰^[17]试验结果一致。侧柏须根系发达对基质水分变化反应敏感^[18],在重度干旱胁迫时侧柏表现出亚低水势忍耐脱水树种特点,通过保持较大的膨压来获得较大的水势梯度从土壤中积极获取更多的水分以供利用。

3.2 水分利用效率

水分利用效率反映植物耗水与干物质生产之间的关系,是评价植物生长适宜的综合生理生态指标,瞬时水分利用效率值越大表明固定单位 CO_2 所需水分越少,植物节水耐旱生产力越高。由图 2 可知保水剂浓度一定时,基质含水量愈低侧柏水分利用效率愈高,与刘自强^[19]研究结果一致。侧柏水分利用过程中,当基质中水分严重匮乏时,侧柏可以通过降低气孔导度、维持较高膨压以适应干旱环境。韩博^[20]在西南石漠化地区进行的重度干旱胁迫试验结果显示

侧柏水分利用效率为负值,图 1 显示在不同保水剂浓度下侧柏水分利用效率均为正值。基质含水量一定时,保水剂浓度较低($0.1\%\sim 0.23\%$)的叶片水分利用效率更高,与党秀丽^[21]通过建立保水剂粒径、保水剂用量和土壤质地之间回归方程计算得出结论一致、与史兰波^[22]在大豆中研究结果有相似性。保水剂粒径一定的情况下栽培基质质地越粗、保水剂浓度越大,基质有效水含量越少,保水剂浓度过大会与植物产生争水矛盾或使基质中气相过少,进而降低植物活力和水分利用效率。水分利用效率与水势两者增长具有协同作用,随着保水剂浓度的降低,单位体积内保水剂对水分的约束能力减弱,基质中水分移动能力增强,有助于促进周围水分向根系移动,加强了根系周围水分补充速度,植物叶水势升高,水分利用效率也增大。

3.3 蒸腾速率

在紫穗槐、刺槐研究中表明^[23-24]植物叶片蒸腾速率与土壤含水量有密切关系,干旱胁迫的加强会使植物通过关闭气孔来减少水分散失。试验结果显示当基质含水量一定时随着保水剂浓度的增大,蒸腾速率逐渐增大,并在保水剂浓度为 0.52% 处达到峰值之后逐渐下降,即基质中有效水分含量在保水剂浓度 0.52% 时最低。当保水剂浓度一定时,侧柏的蒸腾速率随着水分胁迫的加剧先增大后减小(基质含水量 13.81% 为转折点),与刘俊峰^[25]对侧柏幼苗进行水、铅交互胁迫研究得到水分蒸发生理规律一致,在相同基质含水量范围内与郭江红^[26]在黄土半干旱区对 10 a 生侧柏进行干旱胁迫试验(无保水剂)规律一致。在试验区间内保水剂浓度和基质含水量对蒸腾速率影响均不显著($p>0.05$),与岳征文^[27]以双色胡枝子为研究对象得到结论一致。

4 结论

(1) 在以改良铅锌尾矿砂为基质条件下, 基质含水量变化对侧柏水势和蒸腾速率的影响大于保水剂浓度; 保水剂浓度变化对水分利用效率的影响大于基质含水量。

(2) 在保水剂浓度 0.1%~1% 之间, 基质含水量为 7.89% 的重度干旱胁迫时, 保水剂浓度愈低, 水势越高, 水分亏缺愈小, 水分利用效率愈高, 蒸腾速率愈低。因此生产中建议使用 0.1%~0.23% 保水剂浓度, 有利于侧柏从土壤中获取水分, 促进叶片二氧化碳固定, 提高水分利用效率和光合效率。

[参 考 文 献]

- [1] 梁雅雅, 易筱筠, 党志, 等. 铅锌尾矿库对周围环境重金属污染风险评价指标的建立及方法[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1772-1780.
- [2] 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 460-467.
- [3] 陈丹, 吕春娟, 郭星星, 等. 容重对铁尾矿水分运移特征的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 78-84.
- [4] 张凯, 李军, 魏忠义, 等. 污泥有机肥改良铅锌尾矿对 4 种草本植物生长和重金属积累的影[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 167-172.
- [5] 冉艳玲, 王益权, 张润霞, 等. 保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 101-107.
- [6] 黄占斌, 孙朋成, 钟建, 等. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 125-131.
- [7] 张宸. 聚谷氨酸生物的合成及其在修复和改良土壤中的应用[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 323-328.
- [8] 杨楠. 干旱及铅胁迫对主要造林树种种子萌发与幼苗生长的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [9] 王榆鑫. 干旱和铅对 4 种林木种子播种苗的胁迫阈值研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [10] Jordan S N, Mullen G J, Courtney R G. Utilization of spent mushroom compost for the revegetation of lead-zinc tailings: Effects on physico-chemical properties of tailings and growth of *Lolium perenne* [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17): 8125-8129.
- [11] 刘亚琦, 黄占斌, 林杉, 等. 10 种农用保水剂基本性能的比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 147-151.
- [12] 杨浩. 保水剂对黄绵土、褐土及沙土物理特性影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [13] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 1990.
- [14] 刘振学. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [15] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究(I): 叶解剖构造及叶子运动与脱落[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(S2): 1-9, 146.
- [16] 张福计, 李林英, 龚怀勋, 等. 4 个造林树种抗旱特性的初步研究[J]. 山西林业科技, 1990(3): 42-46.
- [17] 刘俊峰, 王进鑫, 邹朋, 等. 水分和铅交互胁迫对侧柏幼苗叶片生理指标的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 32-36.
- [18] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土沟壑区不同树龄侧柏林地土壤水分动态特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 92-100.
- [19] 刘自强, 余新晓, 娄源海, 等. 北京山区侧柏水分利用策略[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3697-3705.
- [20] 韩博, 李志勇, 郭浩, 等. 干旱胁迫下 5 种幼苗光合特性的研究[J]. 林业科学研究, 2014, 27(1): 92-98.
- [21] 党秀丽, 张玉龙, 黄毅. 保水剂对土壤持水性能影响的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(4): 191-192.
- [22] 李云荫, 史兰波. 保水剂在节水农业中的应用[J]. 生态农业研究, 1993, 1(2): 89-93.
- [23] 颜淑云, 周志宇, 邹丽娜, 等. 干旱胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 139-145.
- [24] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 等. 刺槐幼苗形态、生物量分配和光合特性对水分胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(1): 24-30.
- [25] 刘俊峰, 王进鑫, 邹朋, 等. 水分和铅交互胁迫对侧柏幼苗叶片生理指标的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 32-36.
- [26] 郭江红, 王百田, 田晶会. 黄土半干旱区土壤水分对侧柏叶片水汽交换影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 157-160, 165.
- [27] 岳征文. 农林用保水剂遴选及复合应用技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.