

不同隔盐措施对滨海盐碱地白蜡光合作用日变化的影响

刘玉涛¹, 董智¹, 李红丽¹, 赵名彦², 丁国栋²

(1. 山东农业大学 林学院, 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 山东 泰安 271018;

2. 北京林业大学 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了探索不同隔盐措施对滨海盐碱地白蜡光合作用日变化的影响, 为盐碱地造林树种及改良措施的选择提供理论依据, 通过田间试验, 以不设隔盐层为对照, 研究了在栽植穴底部铺设炉渣和沙子作为隔盐层处理下白蜡光合作用的日变化。结果表明: 铺设隔盐层可以显著降低土壤电导率; 炉渣隔盐处理显著提高白蜡的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度; 沙子隔盐处理可显著提高净光合速率, 而对蒸腾速率、气孔导度的提高效果不及炉渣隔盐处理; 两种隔盐处理均可降低非气孔因素对光合的限制。由于两种隔盐物质的物理性质不同, 炉渣隔盐处理比沙子隔盐处理更能降低土壤电导率、促进光合作用。

关键词: 光合作用; 净光合速率; 隔盐层; 滨海盐碱地; 白蜡

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)03-0126-05

Effect of Different Salt-isolation Treatments on Diurnal Variation of Photosynthesis of *Fraxinus chinensis* in Coastal Saline-Alkaline Land

LIU Yu-tao¹, DONG Zhi¹, LI Hong-li¹, ZHAO Ming-yan², DING Guo-dong²

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Shandong Province Key Laboratory of Soil

Erosion and Ecological Rehabilitation, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water

Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to quest the effect of different salt-isolation treatments on diurnal variation of photosynthesis of *Fraxinus chinensis* in coastal saline-alkaline land, supply the theoretical basis for selecting suitable tree species and improvement measures, photosynthetic diurnal variations of *Fraxinus chinensis* were measured under the treatments with slag and sand set at the bottom of tree pits as the salt-isolated layer in the field. The results showed that, salt-isolation treatment could significantly reduce the soil electrical conductivity. Slag treatment significantly increased net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance. Sand treatment also significantly increased photosynthetic rate. Slag treatment was better than sand treatment in terms of increasing transpiration rate and stomatal conductance. Both of the two measures reduced the limitation of photosynthesis by non stomatal factors. As the physical properties of slag and sand are different, slag treatment was better than sand treatment with regard to reducing the soil electrical conductivity and promoting the photosynthesis.

Key words: photosynthesis; net photosynthetic rate; salt-isolation layer; coastal saline-alkaline land; *Fraxinus chinensis*

土壤盐渍化是影响生态环境的严重问题。根据FAO统计, 全世界存在盐渍土面积9.5亿 hm^2 ^[1], 我国盐渍土面积约 $9.913 \times 10^7 \text{hm}^2$, 其中约 $1.0 \times 10^6 \text{hm}^2$ 滨海盐碱土分布在漫长的滨海地带^[2]。若能充分利用盐碱地资源, 营造大面积耐盐林分, 对提高森林覆盖率, 保障人民生产及改善脆弱生态环境会产生

巨大作用。耐盐植物的生理特性及耐盐性评价一直受到众多学者的关注^[3-7]。植物耐盐性生理生化指标是研究植物耐盐机理和耐盐能力的基础, 可以用来评价植物的耐盐性以及筛选优良的耐盐碱植物种质资源。光合作用是植物生长发育的基础, 其日变化是分析环境因素影响植物生长和代谢的重要手段^[8]。

收稿日期: 2010-10-19

修回日期: 2010-11-22

资助项目: 国家“十一五”科技支撑项目“林业生态建设关键技术研究及示范”(2006BAD03A03)

作者简介: 刘玉涛(1985-), 男, 山东临朐人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: liuyutaoaaa@163.com

通信作者: 李红丽(1972-), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事荒漠化防治与植被恢复研究。E-mail: lhl@sdau.edu.cn

白蜡(*Fraxinus chinensis*)是营造用材林、城市绿化和防护林的优良树种,并具有一定的耐盐能力^[8],在盐碱地改良中已被较广泛的应用。对于白蜡的耐盐抗盐性研究大多集中于盆栽试验及单一盐胁迫^[9-12],而对盐碱地自然状态下大田实验进行研究的较少。近几年各地利用沙子作为隔层进行盐碱地绿化的做法已被采用,而且效果不错^[13]。笔者通过测定大田中两种隔盐措施下白蜡的光合日变化,分析其特征规律,以期对盐碱地改良措施及造林树种的选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地选取在河北沧州中捷友谊农场一队盐碱地内。中捷友谊农场地处河北沧州东部,渤海湾西岸,位于东经 $117^{\circ}23'-17^{\circ}39'$,北纬 $38^{\circ}19'-38^{\circ}29'$ 。全区气候属温带大陆性季风气候,年平均降水量 624.2 mm ,降水分布不均,降水量集中在6-8月,三个月的降水量占全年降水量的75%,多年平均蒸发量 $1\,247.7\text{ mm}$ 。年均气温 12.1°C ,无霜期为206 d,昼夜温差大。试验地属滨海冲积平原,土壤类型为潮土,土层深厚,耕作性差,地下水位 1.5 m 。0-40 cm深度土壤平均电导率 $1\,260\text{ mS/m}$,40-80 cm深度土壤平均电导率 750 mS/m 。实验地自然植物种主要有怪柳(*Tamarix chinensis* Lour.)、罗布麻(*Chrysochares aeneocupreus* Chen.)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)、芦苇(*Phragmites communis* Trin.)、狗尾草(*Setaria viridis* Beauv.)、盐蒿(*Artemisia halodendron* Turcz. ex Bess.)、碱蓬(*Suaeda glauca* Bge.)等。

1.2 实验材料及方法

2007年4月,在盐碱水平一致的同一块实验地栽植白蜡(*Fraxinus chinensis* Roxb)3年生带根苗,株行距 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$,植穴规格 $1\text{ m}\times 1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 。栽植时分别在树穴底部进行铺设隔盐层处理,并以不做任何处理为对照,隔盐层分别为20 cm厚的炉渣和20 cm厚的沙子。实验炉渣从当地工厂购置,颗粒较粗,粒径 $2\sim 25\text{ mm}$;实验沙购自当地市场,统一过筛,粒径集中于 $0.5\sim 2\text{ mm}$ 。各处理分别表示为:白蜡炉渣隔盐处理(BL),白蜡沙子隔盐处理(BS)和白蜡对照(BCK)。以上各处理面积均为 0.1 hm^2 。

2009年6月利用WET土壤水分温度电导率仪测定各处理及对照根系附近的土壤电导率、土壤体积含水量,测定深度为100 cm,其中0-80 cm层内每10 cm为一层,80 cm以下为一层。每层重复测定3次,取平均值做为该层的土壤电导率与土壤体积含水量。在晴朗无云的天气状况下,每处理选择3株树

木,每株选取树冠中部3片生长健壮向阳的成熟叶片,应用英国PPS公司生产的CIRAS-2便携式光合作用测定系统定时测定白蜡的光合指标及环境因子的日变化。观测时间为6:00-18:00,每2 h测定一次。在光合速率趋于稳定时,每个叶片连续记录3次,取平均值。仪器自动记录净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、大气 CO_2 浓度(C_a)、气温(T_a)、叶温(T_l)、空气相对湿度(RH)、光量子通量密度(PAR)等生理生态参数。叶片瞬时水分利用效率(WUE)、气孔限制值(L_s)分别用公式计算,即:

$$\text{WUE} = P_n/T_r; L_s = 1 - C_i/C_a$$

利用统计分析软件SPSS 13.0对实验数据进行方差分析、多重比较及差异性分析等。

2 结果与分析

2.1 不同处理下土壤电导率及体积含水量变化

采取不同的隔盐措施可以有效控制土壤电导率,在炉渣隔盐处理的土壤平均电导率为 429.56 mS/m ,沙子隔盐处理的土壤平均电导率为 506.33 mS/m ,而对照土壤平均电导率为 777.67 mS/m ,炉渣隔盐处理和沙子隔盐处理土层电导率比对照平均降低44.76%和34.89%。两种隔盐措施各层的电导率均与对照的电导率差异显著,表明隔盐措施可显著降低土壤电导率;炉渣隔盐处理与沙子隔盐处理除80-100 cm和50-60 cm层电导率差异不明显外,其余各层差异显著(表1)。特别是使用隔盐处理后,80 cm土层内的土壤电导率下降明显,有的层次可下降一半以上。采取隔盐措施对土壤体积含水量均值的影响不显著,但炉渣隔盐措施对60-80 cm土壤的体积含水量影响显著(表1)。

2.2 净光合速率的日变化

炉渣隔盐处理和沙子隔盐处理白蜡的净光合速率(P_n)日变化曲线呈双峰型,第一个峰值均出现在8:00,第二个峰值均出现在12:00,且第二个峰值比第一峰值低(图1)。对照白蜡的 P_n 曲线呈波动型,第一个峰值出现在8:00,第二、三个峰值分别出现在12:00与16:00,且从第一峰值开始, P_n 值就处于下降趋势(图1)。不同处理的日均净光合速率由大到小依次为:炉渣隔盐处理>沙子隔盐处理>对照,炉渣隔盐处理、沙子隔盐处理比对照的净光合速率分别提高了43.04%和5.66%。经方差分析,炉渣隔盐处理、沙子隔盐处理 P_n 值均与对照 P_n 值差异显著($P=0.005<0.05$, $P=0.020<0.05$),且炉渣隔盐处理 P_n 值与沙子隔盐处理 P_n 值之间差异显著($P=0.011<0.05$)。

表 1 不同处理措施土壤电导率及体积含水量

土层深度/cm	电导率/($\text{mS} \cdot \text{m}^{-1}$)			体积含水量/%		
	BL	BS	BCK	BL	BS	BCK
0- 10	601A	721B	1191C	22.7A	23.1AB	24.9B
10- 20	581A	643B	876C	25.3A	27.0A	25.4A
20- 30	462A	512B	850C	27.1AB	28.3A	25.6B
30- 40	352A	593B	712C	28.5A	28.7A	26.7A
40- 50	432A	531B	740C	28.7A	30.6B	29.4AB
50- 60	359A	365A	681B	30.0A	31.2A	30.0A
60- 70	356A	419B	648C	29.4A	31.7B	32.3B
70- 80	376A	445B	719C	28.1A	29.8AB	30.9B
80- 100	347A	328A	582B	28.2A	30.4B	31.8B
均值	429.56A	506.33B	777.67C	27.56A	28.98A	28.56A

注: 电导率与体积含水量同行数据后标不同字母者表示差异显著($P < 0.05$), 有一个字母相同即为差异不显著。

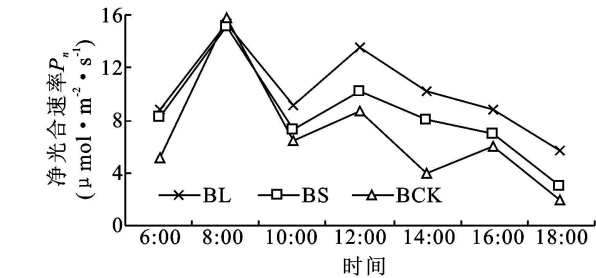


图 1 白蜡净光合速率日变化

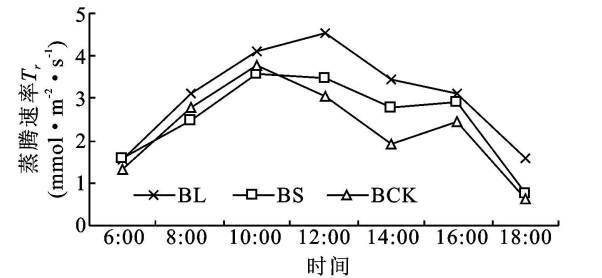


图 2 白蜡蒸腾速率日变化

2.3 蒸腾速率的日变化

炉渣隔盐、沙子隔盐处理白蜡的蒸腾速率(T_r)均高于对照 T_r 值。炉渣隔盐处理 T_r 值变化曲线呈单峰型, 峰值出现在 12: 00, 沙子隔盐处理及对照 T_r 值变化曲线呈双峰型, 峰值出现于 10: 00 与 16: 00, 且各时间炉渣隔盐处理 T_r 值均高于沙子隔盐处理及对照, 沙子隔盐处理 T_r 值在 6: 00- 10: 00、12: 00-

16: 00 高于对照(图 2)。方差分析表明, 炉渣隔盐处理 T_r 值与对照差异显著($P = 0.008 < 0.05$), 炉渣隔盐处理 T_r 值与沙子隔盐处理 T_r 值差异显著($P = 0.010 < 0.05$), 沙子隔盐处理 T_r 值与对照差异不显著。日均蒸腾速率由大到小依次为: 炉渣隔盐处理> 沙子隔盐处理> 对照。

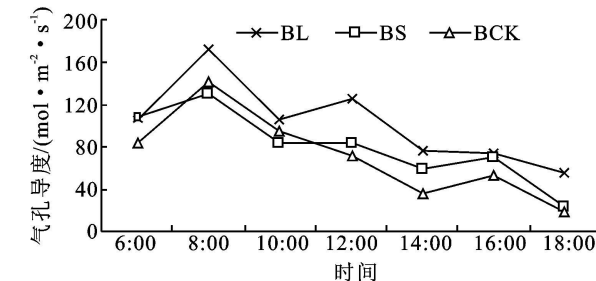


图 3 白蜡气孔导度的日变化

2.4 气孔导度的日变化

白蜡气孔导度(G_s)的日变化趋势与净光合速率相近。3 种处理下白蜡的 G_s 值变化曲线呈双峰型, G_s 第一个峰值均出现在 8: 00, 且均为日最大值。炉渣隔盐处理 G_s 第二峰值出现在 12: 00, 沙子隔盐处理及对照的 G_s 第二峰值出现在 16: 00(图 3)。 G_s 日均值比较, 炉渣隔盐处理> 沙子隔盐处理> 对照。经方差分析, 炉渣隔盐处理 G_s 值与对照差异显著($P = 0.001 < 0.05$); 沙子隔盐处理 G_s 值与对照间差异不

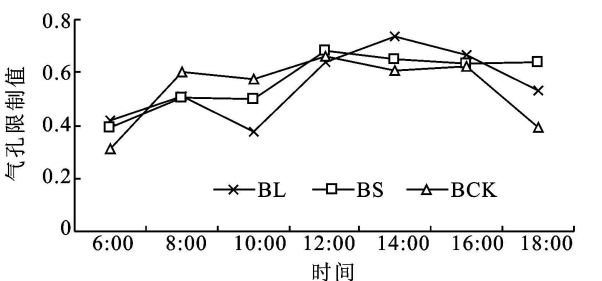


图 4 白蜡气孔限制值日变化

显著($P = 0.194 > 0.05$); 炉渣隔盐处理 G_s 值与沙子隔盐处理 G_s 值差异显著($P = 0.014 < 0.05$)。

2.5 气孔限制的日变化

炉渣隔盐与沙子隔盐处理的白蜡气孔限制值(L_s)变化趋势均呈双峰型, 第一次峰值出现在 8: 00, 炉渣隔盐与沙子隔盐处理的最高峰值分别出现在 12: 00 和 14: 00。对照白蜡 L_s 变化趋势先上升后下降, 6: 00 与 18: 00 L_s 值低, 8: 00- 16: 00 间 L_s 值高, 呈波动型。在 8: 00- 12: 00 对照白蜡的 L_s 值要高于

隔盐处理白蜡 L_s 值,而中午以后隔盐处理白蜡 L_s 值均高于对照白蜡(图 4)。炉渣隔盐、沙子隔盐处理白蜡与对照的 L_s 均值之分别为 0.55, 0.57, 0.54。经方差分析,炉渣隔盐处理、沙子隔盐处理与对照之间的 L_s 值无显著差异。

2.6 胞间 CO_2 浓度的日变化

3 种处理白蜡胞间 CO_2 浓度(C_i)变化趋势一致,整体呈现“U”字型(图 5)。3 种处理下 C_i 值在 6:00 最高,随着 CO_2 的固定, C_i 值波动下降,沙子隔盐处理与对照的 C_i 值最低点出现在 12:00,炉渣隔盐处理 C_i 值最低点出现在 14:00,到达最低点后炉渣隔盐处理与沙子隔盐处理 C_i 值持续上升,对照 C_i 值波动上

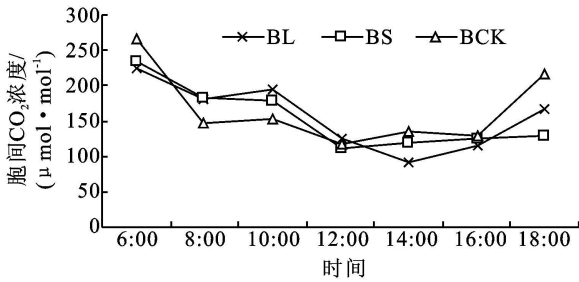


图 5 白蜡胞间 CO_2 浓度的日变化

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤盐分转移与水分运动密切相关,Starr J L 提出距地表 50–100 cm 层位的夹砂层,不仅能抑制毛管的潜水上升,同时又有利于下行重力水的渗透,脱盐系数大,所需冲洗定额小^[13]。有研究表明,在高蒸发季节,设置隔盐层后,由于沙子隔层毛管孔隙度比土壤大,毛管力弱,沙层阻断了上下土层间的水力联系,使得土壤水分运行到沙层下界面时发生停滞,从而隔盐层上层土壤的积累减少,一定程度上能够减缓盐分积聚^[14]。炉渣、沙子两种材料的粒径较大,毛管孔隙大,毛管力弱,可抑制下层水分的上升,减少盐分的向上移动,在长时间作用下,炉渣隔盐处理与沙子隔盐处理均可显著降低隔层以上土壤的盐分积聚,显著降低土壤电导率($P < 0.05$)(表 1),改善植物生长的土壤环境。但炉渣与沙子两种材料的粒径不同,其形成的土壤隔层的孔隙度不同,因而其对土壤水盐运动的影响也不同。由于炉渣的粒径更大,其对潜水上升的阻断能力和对下行重力水的渗透能力比沙子更强,因而对土壤电导率的降低作用更显著(炉渣与沙子化学性质的差别是否对土壤产生影响,需要进一步探讨)。在隔盐层以上 20 cm 土壤中,因炉渣隔盐处理孔隙大,水分下渗快,对土壤体积含水量的影响显著,其效果比沙子明显;其他层次土壤由于受蒸发等

升。比较 3 种处理,炉渣隔盐处理和沙子隔盐处理 C_i 值低于对照,变化幅度低于对照,但方差分析显示三者间的 C_i 值无显著差异。

2.7 叶片瞬时水分利用效率的日变化

3 种处理白蜡叶片瞬时水分利用效率日变化趋势一致,均呈现由 6:00 较高值上升到 8:00 全天峰值,后下降到 10:00 全天最低值,然后缓慢回升的趋势(图 6)。采取隔盐措施后,除 10:00 对照的水分利用效率略高于炉渣隔盐和沙子隔盐处理外,其他时段炉渣隔盐和沙子隔盐处理的水分利用效率均高于对照。这表明隔盐处理有利于提高水分利用效率,但方差分析表明,三者间差异不显著。

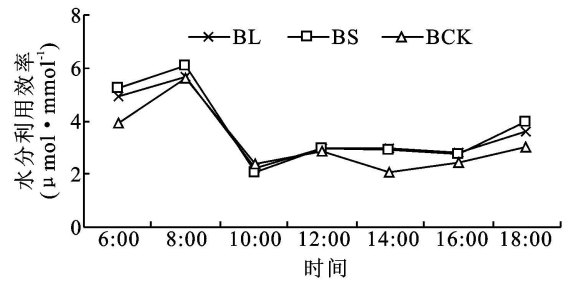


图 6 白蜡叶片瞬时水分利用效率的日变化

其他因素影响,隔盐层对土壤含水量影响不明显(表 1)。两种隔盐措施对 0–80 cm 土壤体积含水量均值的影响不显著($P > 0.05$)。

净光合速率(P_n)日变化的研究结果可作为分析植物生长限制因素的依据之一^[15]。一般条件下,植物的光合作用日变化曲线呈单峰型、双峰型、波动型、平缓型,这是由于受环境的变动及植物自身影响造成的,双峰型是在环境因子在一段时间内对植物光合产生的抑制作用或植物耐受能力达到峰值而产生的自我调节造成的,波动型是环境因子的多变或植物生理调节适应能力受到限制而表现出的不稳定^[16]。本研究各处理的树种、土壤及所处的气候条件相同,但在植穴底部的隔盐处理不同。结合上述的盐分与水分的差异性变化,可以认为隔盐处理引起的土壤盐分变化是引起 P_n 日变化曲线差异的主要原因。两种隔盐措施下 P_n 日变化曲线均为双峰型,对照 P_n 曲线为波动型,这表明隔盐措施降低了土壤电导率,使土壤盐分对白蜡光合作用的影响减小,其内部生理对环境适应调节能力增强;而对照则因盐分含量高而使得白蜡生理调节适应能力受到限制而表现出极大的不稳定性,造成了 P_n 日变化曲线的波动。

土壤水分亏缺会造成气孔关闭,而使蒸腾速率大幅度下降,植物通过改变气孔的开度等方式来控制与外界 CO_2 和水汽的交换,从而调节光合速率和蒸腾速率,以适应不同环境条件,特别是土壤供水状

况^[17]。3 种处理下的土壤体积含水量没有显著差异,但由于土壤含盐量不同而导致土壤溶液的渗透压增大,造成根系暂时性的吸水困难,吸水速率小于蒸腾速率,引起蒸腾速率日变化曲线的差异。炉渣隔盐处理气孔导度高,从土壤中的吸水速度能供应正常的蒸腾,其一直可保持较旺盛的蒸腾速率,呈现单峰型;沙子隔盐处理、对照均因土壤盐分含量高而造成气孔导度低于炉渣隔盐处理,导致白蜡暂时性的供水速率不及蒸腾速率,蒸腾速率表现出双峰型变化。

胞间 CO_2 是光合作用的主要原料之一,与光合速率关系密切,同时还受大气 CO_2 浓度和气孔导度等变化的影响。Farquhar G. D. 和 Sharkey T. D. 认为,当 P_n 和 C_i 变化的方向相同,且气孔限制值 L_s 增大,可认为 P_n 的下降主要是气孔限制引起;如果 P_n 和 C_i 的变化方向相反,气孔限制值减小,则 P_n 下降归因于叶肉细胞同化能力的降低^[18]。由此理论,对照图 1、图 4 和图 5 中 P_n 、 C_i 和 L_s 值变化趋势:导致炉渣隔盐措施下白蜡 P_n 值下降的因素 12:00–14:00 为气孔因素,其他时间均为非气孔因素;导致沙子隔盐处理下的白蜡 P_n 值下降的因素 8:00–10:00 为气孔因素,其他时间为非气孔因素;导致对照白蜡 P_n 值下降的因素均为非气孔因素。隔盐措施通过降低土壤电导率,使土壤盐碱对叶片细胞同化能力的限制降低,使非气孔因素对光合的限制较小。

植物的水分利用效率大小取决于 CO_2 净同化效率与蒸腾效率,受植物根、茎、叶组织生物结构特征的影响,也与光强、大气温度、叶温、湿度、气压、气孔导度以及土壤水分等环境因子密切相关^[19]。隔盐处理虽然提高了水分利用效率,但三者间的差异并不显著,这说明水分利用效率除了受到盐分含量的影响外,还有其他因素的作用,其内在原因需要进一步探讨。

3.2 结论

(1) 在树穴底部铺设隔盐层的处理措施可以显著降低土壤电导率,炉渣隔盐处理和沙子隔盐处理土层含盐量整体较对照处理平均降低 44.76% 和 34.89%。炉渣隔盐层对潜水上升的抑制和重力水分的下渗作用高于沙子隔盐层,其降低土壤电导率的效果大于沙子隔盐处理。

(2) 采取隔盐措施的白蜡净光合速率曲线表现为双峰型,对照净光合速率曲线呈波动型。炉渣隔盐处理的白蜡蒸腾速率日变化曲线为单峰型,沙子隔盐处理与对照白蜡均为双峰型。3 种处理下净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度的大小顺序均表现为炉渣隔盐处理 > 沙子隔盐处理 > 对照。与对照相比,采取隔盐措施可提高白蜡净光合速率、蒸腾速率、气孔导

度及水分利用效率。炉渣隔盐处理和沙子隔盐处理对 P_n 、 T_r 和 G_s 的影响程度不同,前者对 3 个参数均有显著提高作用,而后者仅对净光合速率有显著影响。

(3) 隔盐措施通过降低土壤盐碱而使非气孔因素对光合作用的限制减弱。

参考文献:

- [1] Malcolm E, Sumner R N. Sodic soils-distribution, properties, management, and environmental consequences [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [2] 徐恒刚. 中国盐生植被及盐渍化生态治理 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [3] 张川红, 沈应柏, 尹伟伦. 盐胁迫对几种苗木生长及光合作用的影响 [J]. 林业科学, 2000, 38(2): 27-31.
- [4] 张华新, 宋丹, 刘正祥. 盐胁迫下 11 个树种生理特性及其耐盐性研究 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(2): 168-175.
- [5] 朱振贤. 几种主要造林树种盐胁迫响应及耐盐机理研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [6] 支欢欢, 杨敏生, 张华新, 等. 3 种园林植物耐盐性对比分析 [J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(3): 74-80.
- [7] 王玉祥, 刘静, 乔来秋, 等. 41 个引种树种的耐盐性评定与选择 [J]. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 55-58.
- [8] 邵玺文, 韩梅, 韩忠明. 黄芩光合作用日变化及其与环境因子关系的研究 [J]. 吉林农业大学学报, 2006, 28(16): 634-638.
- [9] 吴永波, 薛建辉. 盐胁迫对 3 种白蜡树幼苗生长与光合作用的影响 [J]. 南京林业大学学报, 2002, 26(3): 19-22.
- [10] 张川红. 北方几个造林树种抗盐能力与抗盐机理研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 1999.
- [11] 王改萍, 朱振贤, 彭方仁. 盐胁迫对 7 种造林树种生长量及生理特性的影响 [J]. 江西农业大学学报, 2008, 30(6): 1066-1072.
- [12] 张川红, 沈应柏, 尹伟伦. 盐胁迫对国槐和核桃幼苗光合作用的影响 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(1): 41-46.
- [13] 张莉, 丁国栋, 王翔宇, 等. 隔沙层对盐碱地土壤水盐运动的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 28(2): 197-200.
- [14] Starr J L, DeRoo H C, Frink C R, et al. Leaching characteristics of alayered field soil [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1978, 42(5): 376-391.
- [15] 杨全一, 王文全, 张卉. 8 个种源黄芩光合特性的比较研究 [J]. 吉林农业大学学报, 2006, 5(28): 530-541.
- [16] 邹琦. 作物抗旱生理生态研究 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1994: 155-242.
- [17] 阎秀峰, 孙国荣, 李敬兰, 等. 羊草和星星草光合蒸腾日变化的比较研究 [J]. 植物研究, 1994, 14(3): 287-291.
- [18] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Ann. Rev. Plant, 1982, 33: 317-345.
- [19] 谢田玲, 沈禹颖. 黄土高原 4 种豆科牧草的净光合速率和蒸腾速率日动态及水分利用效率 [J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1679-1686.