

DOI: 10.5846/stxb201403090402

王琳琳, 李素艳, 孙向阳, 张涛, 付颖, 张红蕾. 不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响. 生态学报, 2015, 35(5): 1388-1398.

Wang L L, Li S Y, Sun X Y, Zhang T, Fu Y, Zhang H L. Application of salt-isolation materials to a coastal region: effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia*. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1388-1398.

不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤水盐运移及刺槐光合特性的影响

王琳琳¹, 李素艳^{1,*}, 孙向阳¹, 张 涛¹, 付 颖¹, 张红蕾²

¹ 北京林业大学林学院, 北京 100083

² 呼伦贝尔市林业科学研究所, 呼伦贝尔 021008

摘要: 土地盐碱化是限制土地资源利用的一个主要障碍, 在耕地面积逐渐减少的今天, 改良利用盐碱地早已提上了科学日程。在天津滨海盐碱地区, 通过田间完全随机区组实验设计, 对比分析了 4 种土壤盐分隔离措施 (对照-不设隔盐处理, CK; 沸石隔盐处理, FS; 陶粒隔盐处理, TL; 河沙隔盐处理, HS) 对 0—80 cm 土层水盐运移及刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 光合特性的影响, 目的是通过评估不同隔盐材料的控盐改土效果, 为滨海地区盐渍土改良和沿海防护林营造等林业生态工程建设提供理论依据。研究结果表明: (1) FS 和 TL 可以显著提高土壤相对水分含量, 为刺槐生长创造更加适宜的水分环境。FS 导致 0—80 cm 土体内盐分含量和土壤盐溶质浓度显著降低, 控盐效果显著。TL 仅在 40 cm 以下土层有显著降盐效果, 控盐效果仅次于 FS。与对照相比, HS 对 0—80 cm 土体内盐分含量和土壤盐溶质浓度无显著影响, 降盐效果最差。(2) FS 处理能显著提高刺槐的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 及叶片水分利用效率 (LWUE), 降低胞间 CO_2 浓度 (C_i)。TL 可显著提高刺槐叶片的 P_n 、 T_r , 但改善效果不及 FS, 并且其对 G_s 、 C_i 和 LWUE 没有显著影响。与对照相比, HS 虽然能显著增加刺槐叶片 P_n 和 T_r , 但却导致 LWUE 显著降低。综上所述, 在滨海地区采用沸石作为隔盐材料比采用传统材料河沙更能有效保水降盐, 促进植物光合及生长, 可以作为滨海盐碱地区隔盐材料的优先选择。

关键词: 隔盐层; 沸石; 陶粒; 河沙; 光合特性; 滨海盐碱土; 刺槐

Application of salt-isolation materials to a coastal region: effects on soil water and salt movement and photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia*

WANG Linlin¹, LI Suyan^{1,*}, SUN Xiangyang¹, ZHANG Tao¹, FU Ying¹, ZHANG Honglei²

¹ College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Forestry Research Institute of Hulun Buir, Hulun Buir 021008, China

Abstract: Soil salinization is a major obstacle to the optimal utilization of land resources. Salt-affected soils are widely distributed throughout the world. The present extent of salt-affected soils substantially restricts plant growth in these areas. It has been demonstrated that leaching with water, chemical amendment, surface mulching with straw and phytoremediation are the most often used approaches to ameliorate saline soils. Engineering measures are also an effective solution to control salt movement in the saline soil. Establishing salt-isolation interlayers beneath the surface of saline soil is one of the most widely used engineering measures. Even though there are many studies dealing with salt-isolation interlayers establishment, very little is known about their effects on saline soil. Here, we used three salt-isolation materials to restrict the water and

基金项目: 北京市自然科学基金 (2122044); 国家“十一五”科技支撑计划课题 (2009BADB2B0504)

收稿日期: 2013-03-09; **网络出版日期:** 2014-07-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lisuyan@bjfu.edu.cn

salt movements in saline soil; zeolite, ceramsite and river sand. The aim of this study was to assess the effects of salt-isolation interlayers application on soil water and salt movements in saline soil and on the photosynthetic characteristics of *Robinia pseudoacacia* in the coastal regions of Tianjin city. We also anticipate that the outcome of the study could form part of the basis for selection of salt-isolation materials in improving coastal saline soil with consideration of their costs. The research was conducted from April 2010 to August 2013 at the Coastal Salt-tolerant Plant Science and Technology Park, Dagang, Tianjin, China. An experiment was conducted with four treatments: (1) No addition of salt-isolation interlayer (CK); (2) Addition of zeolite (FS) at the bottom and side walls of the planting sites; (3) Addition of ceramsite (TL) at the bottom and side walls of the planting sites; (4) Addition of river sand (HS) at the bottom and side walls of the planting sites. All treatments were arranged in a randomized complete block design with four blocks. Each block was again divided into four plots. The four treatments were randomly assigned to each plot within the individual blocks with a separate randomization for each block. The salt-isolation materials were added to nine planting sites in each plot. The nine sites were evenly distributed based on a planting spacing of 3 m × 3 m. Each planting site was 1 m × 1 m × 1 m. The results indicated: (1) Salt-isolation interlayers could significantly increase soil water content of tree planting site. FS treatment performed best and had the lowest salt content and salt solute concentration, followed by TL. Relative to the CK, HS had no significant effects on salt content and salt solute concentration. (2) FS treatment significantly increased the leaf photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (Tr), stomata conductance (G_s) and leaf water use efficiency (LWUE), and reduced intercellular CO_2 concentration (C_i). TL treatment can also significantly enhance P_n 、 Tr , but it had no significant effects on G_s 、 C_i and LWUE. HS treatment had significantly increased P_n and Tr , and reduced LWUE. We concluded that the zeolite was an optimal salt-isolation material in controlling salt movement in saline soil and improving tree growth in the coastal regions.

Key Words: salt-isolation interlayer; zeolite; ceramsite; river sand; photosynthetic characteristics; coastal saline-alkaline land; *Robinia pseudoacacia*

我国盐渍土面积大且分布广,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^[1]。滨海盐碱地区的生态系统非常脆弱,由于气候干旱、降雨集中、海水侵袭、河流改道泛滥等原因,土壤盐碱化程度不断扩大,使农林业可持续发展面临严峻挑战。

长期以来,盐碱土改良主要采用灌溉排水、添加覆盖物、施加化学改良剂,以及客土转移和耐盐植物种植等措施^[2-3]。在盐渍土利用过程中,土壤水分无效蒸发,潜水上升是造成地表返盐的主要原因^[4]。因此,只要能有效阻断潜水上升路径,促进下行重力水对土壤的淋洗,就能减轻盐分表聚现象,降低水分和盐分对植物的胁迫。基于此,通过工程措施建立盐分隔离层作为一种改良盐碱地的有效方法,被广泛采用。国内外研究结果表明^[5-7],在土表下 35 cm 或 80—100 cm 处铺设沙子隔盐层,或在土表下 20 cm 处或 30 cm 处铺设秸秆层,都可以显著降低土壤电导率,促进植物生长和代谢。总体看来,有关土表下铺设隔层的研究大多采用室内一维土柱模拟,试验条件也限定为单一的降雨或蒸发^[8-9]。而在野外,土壤要受到蒸发、降水、地形起伏、地下水埋深等多种自然因素的影响,其水盐运动规律相较于室内试验要复杂的多。当前通过铺设隔盐层进行盐碱地改良的研究中,多选择河沙作为隔盐材料^[10],且多数只在树穴底部铺设隔盐层,较少考虑侧壁隔盐层对盐分的阻碍作用。沸石是一种具有很强的吸附能力和离子交换能力的土壤改良材料,有肥保肥改良土壤物理性质的作用;另外,沸石来源广泛,成本低廉,且无毒无害,是一种便于推广和利用的土壤改良剂^[11]。陶粒是一种轻质多孔的硅酸盐产品,具有较强的吸附能力和稳定的物理特性,常用于土壤的修复和改良^[12]。虽然这些材料特点突出,但将其作为隔盐材料进行盐碱改良的研究罕有报道,其对盐分抑制能力的强弱仍不明确,因此本文将对这 3 种材料的隔盐效果进行评估。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)作为造林树种 1897 年引入我国山东青岛,现在我国华北、西北等全国的 27 个

省、市区有栽培,以黄河中下游、淮河流域为主要栽培区,特别是在黄河三角洲地区,占造林总面积的 90% 以上^[13]。刺槐具有较强的耐盐抗旱能力,能在中性土、酸性土和含盐量 0.3% 以下的轻、中度盐渍土上正常生长^[14],因此是用于盐碱地植物改良和干旱地区的防护林建设的重要树种^[15]。营建人工刺槐林可以为天津滨海地区盐碱地改良和发挥生态屏障作用提供帮助。对刺槐光合特性的研究,是分析环境因素影响其生长和代谢的重要手段。但目前对于刺槐生长特性的研究多集中于干旱地区的水分胁迫、盆栽试验及单一盐胁迫试验等^[16-17],而对工程改良后盐碱地自然状态下刺槐生长特性的对比研究较少。由于天津滨海盐碱地具有典型的生态地域代表性^[18],因此本文以该地区盐碱土为研究对象,采用沸石、陶粒和河沙作为隔盐材料,在树穴底部和侧壁铺设隔盐层并种植刺槐,研究大田中不同隔盐措施对滨海地区重度盐渍土 0—80 cm 土层水盐运移及刺槐光合特性的影响,从而评估不同隔盐材料的控盐改土效果,以期为滨海地区盐渍土改良和沿海防护林营造等林业生态工程建设提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

试验区位于天津市大港区滨海耐盐碱植物科技园区(北纬 38°46′,东经 117°13′,海拔高度约 1.3 m),该区属于北半球暖温带半湿润大陆性季风气候,由于濒临渤海,受季风环流影响大,冬夏季风更替明显,四季分明,温差较大。全年平均气温为 12.3 ℃,气温最高月份出现在 7 月(26 ℃),气温最低月份出现在 1 月(−4 ℃)。该区地处中纬度,日照时间长,年平均日照时数为 2618 h,累计年太阳总辐射量 121.1×4.184kJ/cm²,生理辐射总量 61.544×4.184kJ/cm²,无霜期约 211d。年平均降水量 593.6 mm,雨水集中在 6—9 月份,占全年降水总量的 84%。年平均蒸发量 1979 mm,是降水量的 3 倍多。

所选试验地造林前为弃耕裸荒地,裸荒前曾种植过中华金叶榆(*Ulmus pumila cv. jinye*)、玫瑰(*Rosa rugosa*)和美国白蜡(*Fraxinus americana*)。试验区 0—100 cm 层土壤为粗粉质轻壤土,砂粒占 22.4%,粉粒占 68%,粘粒占 9.6%。试验地其他土壤物理性质指标见表 1。地下水埋深变幅为 1.10—1.50 m。试验区地势低平,盐分表聚性明显,地表有盐霜或结皮,表层(0—20 cm)土壤全盐量为 8.74 g/kg,其中阳离子主要是 Na⁺ 离子,占全盐量的 27.5%;阴离子主要是 Cl[−] 和 SO₄^{2−},分别占全盐量的 32.2% 和 27.2%;pH 值为 7.75,电导率为 3.69 dS/m,按盐土分类为氯化物-硫酸盐土。

表 1 试验地土壤物理性质

Table 1 Physical properties of the experimental field

土层 /cm Soil layer	土壤容重/(g/cm ³) Soil bulk density	毛管孔隙度/% Capillary porosity	非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity	田间持水量/% Field moisture capacity
0—10	1.50±0.02	41.31±0.27	2.15±0.05	43.45±0.32	26.8±0.01
10—20	1.53±0.02	42.23±0.39	2.00±0.10	44.23±0.39	28.3±0.02
20—40	1.49±0.04	43.80±1.01	2.00±0.10	45.80±1.11	29.5±0.02
40—60	1.51±0.07	43.49±1.47	2.10±0.05	45.59±1.51	29.1±0.03
60—80	1.53±0.03	33.35±0.18	2.92±1.15	36.27±1.32	32.1±0.03

1.2 试验材料与方法

试验共设置 4 个处理:(1)对照-不设置隔盐处理(CK),(2)沸石隔盐处理(FS),(3)陶粒隔盐处理(TL)和(4)河沙隔盐处理(HS)。将盐碱水平一致的同一块试验地划分为 4 个区组(57 m×12 m),每个区组划分为 4 个小区(12 m×12 m),两个相邻区组和小小区的距离分别为 6 m 和 3 m。按照完全随机区组试验设计,将所有处理完全随机的分配到各个区组中去,每个小区为 1 个处理,每个处理重复 4 次。2010 年 4 月,在每个小区内栽植 9 株 2 年生刺槐带根苗,株行距 3 m×3 m,植穴规格 1 m×1 m×1 m。刺槐栽植时先将树穴中 0—100 cm 的土壤按 5 个层次(0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm)取出,然后分别在树穴底部和

侧壁铺设沸石、陶粒和河沙作为隔盐层,底部和侧壁隔盐层厚度分别为 20 cm 和 10 cm,同时在隔盐层和原土之间铺设厚度为 5 cm 的草帘,防止土壤颗粒进入隔盐层影响试验效果,最后将土壤按原层次回填并植树。对照处理中不铺设隔盐层,但以同样的方式铺设草帘,以排除草帘对盐分运移的影响。试验布置完毕,立即对每个树穴进行灌溉,并于 2010 年 4 月到 2010 年 6 月每两周灌溉 1 次,灌溉定额均为 5 L 水。不同隔盐措施下所栽植刺槐苗木均为 2 年生带根苗,栽植方法为截干栽植,地径和留干高度分别在 3.2—4.1 cm 和 2.66—2.93 m 之间。栽培管理措施一致。试验沸石和陶粒均从当地矿产品加工厂购置,粒径分别集中在 2—3 mm 和 10—25 mm;河沙购自当地市场,统一过筛,粒径集中于 1—2 mm。

1.3 土壤取样与指标测定

土壤样品采集时间为 2013 年 8 月 20 日,为试验区降雨后的第 3 天,降雨量为 24.6 mm。在每个小区内随机选择 3 株刺槐,测定其树高和地径,同时用内径为 5 cm 的不锈钢土钻在每个树穴内分 5 个土层(0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm)进行土样采集,每层取样 1 次并进行环刀样品采集,然后带回实验室进行相关指标的测定。土壤容重、总孔隙度、田间持水量采用环刀法测定。土壤含水量采用烘干法测定,并将其转化为土壤相对含水量^[19]。土壤烘干后磨碎,过 1 mm 孔径筛,以 1:5 的土水比提取土壤溶液上清液,用电导率仪 MP-521 测定土壤电导率,根据 Pang 等^[20]计算土壤盐分含量:

$$\text{土壤盐分含量(g/kg)} = \text{电导率} \times 0.064 \times 5 \times 10 / 1000$$

计算相应的土壤盐溶质浓度:

$$\text{土壤盐溶质浓度(g/L)} = \text{盐分含量} / \text{水分含量} \times 10$$

将采集的土样烘干后磨碎,过 1 mm 筛,以 1:5 的土水比浸提,测定浸提液中的 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量。 Na^+ 采用火焰光度计测定, Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法测定, SO_4^{2-} 采用 EDTA 间接滴定法测定^[19]。

1.4 叶片光合特性测定

2013 年 8 月 24—26 日,在这晴朗无云的 3 d 中,对刺槐叶片光合特性进行测定。利用 LI-6400 便携式光合作用分析仪(Li-cor, USA)测定刺槐叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(Tr , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、气孔导度(G_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)和胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol/mol}$)。同时记录光合有效辐射(PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、空气相对湿度(RH, %)、气温(T_a , $^{\circ}\text{C}$)、环境 CO_2 浓度(C_a , $\mu\text{molCO}_2/\text{mol}$)等环境参数。每处理选择 3 株树木,每株选取树冠中部 3 片生长健壮的成熟叶片进行活体测定,观测时间为每天的 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。所得指标数值均为 3 d 的平均值。叶片瞬时水分利用效率(LWUE, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$)的计算公式为:

$$\text{LWUE} = P_n / Tr。$$

1.5 统计分析

采用单因素方差分析方法(one-way ANOVA)比较不同隔盐措施处理之间土壤水盐和叶片光合特征之间的差异;多重比较采用最小显著极差法(LSD)检验在方差分析中有差异的变量间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同隔盐措施对土壤相对含水量、盐分及盐溶质浓度的影响

2.1.1 土壤相对水分含量变化

不同隔盐措施处理下,0—80 cm 土体内土壤相对水分含量均较对照(CK)显著增加(表 2)。在不同土层中,HS 处理的土壤相对含水量均显著高于其他处理,CK 的土壤相对含水量均显著低于其他处理;FS 和 TL 处理土壤相对含水量除了在 0—10 cm 土层内差异显著外,其他土层内两者均无显著差异($P>0.05$)。将各处理 0—80 cm 土壤相对水分含量进行平均,其大小顺序为 HS>FS>TL>CK。其中,HS、FS 和 TL 的土壤相对含水量与 CK 之间差异显著($P<0.05$),FS 和 TL 的土壤相对含水量无显著差异。

2.1.2 土壤盐分含量变化

与对照相比,3 种隔盐措施均可降低土壤各层盐分含量(表 3)。其中,FS 能显著降低 0—80 cm 内各土层

盐分含量 ($P<0.05$), 平均比 CK 低 45.42%—71.42%。TL 处理也能降低整个土体的盐分含量, 但只在 40 cm 以下土层效果显著, 控盐效果仅次于 FS。HS 导致土体 (0—80 cm) 盐分含量略有下降, 但各土层盐分含量与 CK 之间均无显著差异 ($P>0.05$), 控盐效果最差。

表 2 不同隔盐措施下土壤相对含水量

Table 2 Effects of different salt-isolation materials on the relative water content of soil

土层/cm Soil layer	土壤相对含水量 Soil relative moisture/%			
	CK	FS	TL	HS
0—10	40.14±1.00 d	72.91±1.05 c	68.54±0.63 b	76.63±0.91 a
10—20	43.99±1.12 c	73.63±0.49 b	70.33±0.56 b	78.12±0.43 a
20—40	49.28±0.40 c	72.46±0.53 b	71.88±0.71 b	77.19±0.36 a
40—60	38.94±0.25 c	68.53±1.11 b	70.35±0.42 b	81.46±0.33 a
60—80	42.44±0.13 c	71.24±0.45 b	69.76±0.33 b	80.34±1.21 a
均值 Mean value	42.96±0.35 c	71.75±0.33 b	70.17±0.21 b	78.75±0.54 a

CK: 对照; FS: 沸石隔盐处理; TL: 陶粒隔盐处理; HS: 河沙隔盐处理; 同行具有不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

表 3 不同隔盐措施下土壤盐分含量

Table 3 Effects of different salt-isolation materials on the salt content of soil

土层/cm Soil layer	盐分含量 Salt content/(g/kg)			
	CK	FS	TL	HS
0—10	7.8±0.1 a	4.2±0.3 b	6.7±0.3 a	7.2±0.3 a
10—20	6.0±0.4 a	1.5±0.4 b	5.4±0.4 a	5.5±0.3 a
20—40	5.4±0.4 a	1.5±0.2 b	4.8±0.1 a	5.0±0.4 a
40—60	6.9±0.3 a	3.3±0.2 b	4.3±0.3 b	5.3±0.4 ab
60—80	6.3±0.2 a	2.1±0.2 b	4.0±0.2 c	6.1±0.3 a
均值 Mean value	6.5±0.2 a	2.5±0.1 b	5.1±0.3 a	5.8±0.2 a

同行具有不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.1.3 土壤盐溶质浓度变化

土壤盐溶质浓度与土壤盐分变化规律相似, 采用隔盐措施的土壤盐溶液浓度均低于对照 (表 4)。在 0—40 cm 土层内, TL、HS 和 CK 三者的盐溶质浓度均逐渐降低, 且无显著性差异。40—80 cm 土层内, TL 的盐溶质浓度显著低于 CK ($P<0.05$), 平均值比 CK 低 40.77%; 而 HS 在各土层深度内均与 CK 无明显差异 ($P>0.05$)。FS 对各土层内盐溶质浓度的降低效果最为显著 ($P<0.05$), 平均比 CK 低 56.14%—75.10%, 同时也低于其他两种处理。

表 4 不同隔盐措施下土壤盐溶质浓度

Table 4 Effects of different salt-isolation materials on soil salt solute concentration

土层/cm Soil layer	盐溶质浓度 Salt solute concentration/(g/L)			
	CK	FS	TL	HS
0—10	3.61±0.13 a	1.58±0.20 b	2.56±0.21 ab	2.67±0.23 ab
10—20	2.46±0.21 a	0.56±0.17 b	1.89±0.15 ab	1.95±0.14 ab
20—40	2.18±0.21 a	0.54±0.08 b	1.63±0.20 a	1.71±0.22 a
40—60	2.62±0.25 a	1.07±0.12 b	1.49±0.12 b	1.88±0.32 ab
60—80	2.28±0.05 a	0.73±0.02 b	1.42±0.14 c	2.23±0.22 a
均值 Mean value	2.63±0.22 a	0.90±0.13 b	1.80±0.10 c	2.09±0.15 ac

同行具有不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.2 隔盐措施实验区田间微气象因子变化

从图 1 可知, 光合测定期间, 不同隔盐措施下盐碱地种植刺槐的光合有效辐射 PAR 于 12:00 达到最大

值,其值为 $1447 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,随后逐渐降低,于 18:00 达到最低值;田间空气相对湿度在 8:00 达到最大值,其值为 70.0%,随后开始呈下降趋势,于 10:00 降至最低,其后开始有所上升,日均值为 52.5%;空气温度于 14:00 达到最高,其值为 32.6°C ;环境 CO_2 浓度的变化总体上呈先下降后上升趋势,其日均值为 $419.60 \mu\text{mol/mol}$ (图 1)。

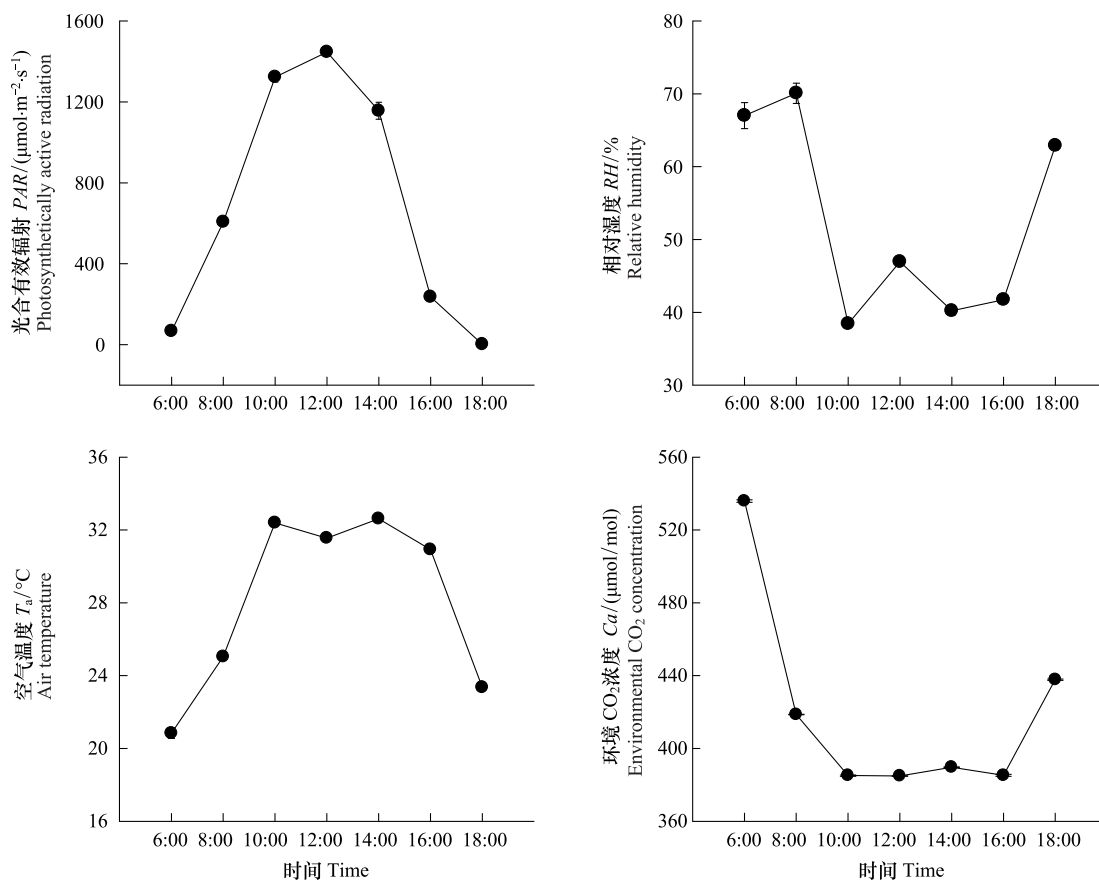


图 1 隔盐措施处理试验地环境因子日变化

Fig.1 Diurnal variation of environment factors in the experimental site

2.3 不同隔盐措施对刺槐叶片气体交换特征的影响

2.3.1 净光合速率日变化

由于不同隔盐层材料对其上部土层水盐运移调控程度不同,刺槐净光合速率(P_n)也随之发生变化(图 2)。FS、TL 和 HS 3 种隔盐处理刺槐叶片的 P_n 日变化趋势与 PAR(图 1)的变化趋势相同,均呈单峰形,峰值均出现在中午 12:00,其值分别为 15.65、14.45 和 $13.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。CK 处理 P_n 曲线呈双峰形,第 1 个峰值出现在 8:00,第 2 个峰值出现在 12:00。不同处理刺槐叶片日均净光合速率由大到小依次为:FS>TL>HS>CK;FS、TL 和 HS 比 CK 的净光合速率分别提高了 74.33%、34.56%和 13.03%。方差分析表明,FS、TL 和 HS 的 P_n 值均与 CK 之间存在显著差异($P<0.05$),且 3 种隔盐处理之间差异也显著(表 5)。

2.3.2 蒸腾速率日变化

图 2 表明,FS、TL、HS 和 CK 处理下刺槐叶片蒸腾速率均呈单峰形变化,最大值分别出现在 8:00、12:00、14:00 和 12:00,其值分别为 6.16、3.97、3.64 和 $3.73 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。除 6:00 和 18:00 外,FS 处理的 T_r 值均高于其他处理。各处理日均蒸腾速率由大到小依次为:FS>TL>HS>CK。方差分析表明,FS、TL 和 HS 与 CK 之间 T_r 值差异显著($P<0.05$),而 TL 与 HS 之间无显著差异($P>0.05$)。

2.3.3 气孔导度日变化

4 种处理的刺槐叶片气孔导度(G_s)日变化曲线呈单峰形,在 8:00 时达到最大,8:00—10:00 均呈下降趋

势,10:00 以后各处理气孔导度趋于平稳(图 3)。Gs 日平均值大小顺序为:FS>TL>HS>CK。FS 与 CK 之间叶片 Gs 日均值差异显著($P<0.05$);TL 和 HS 与 CK 之间叶片 Gs 日均值差异不显著($P>0.05$)。

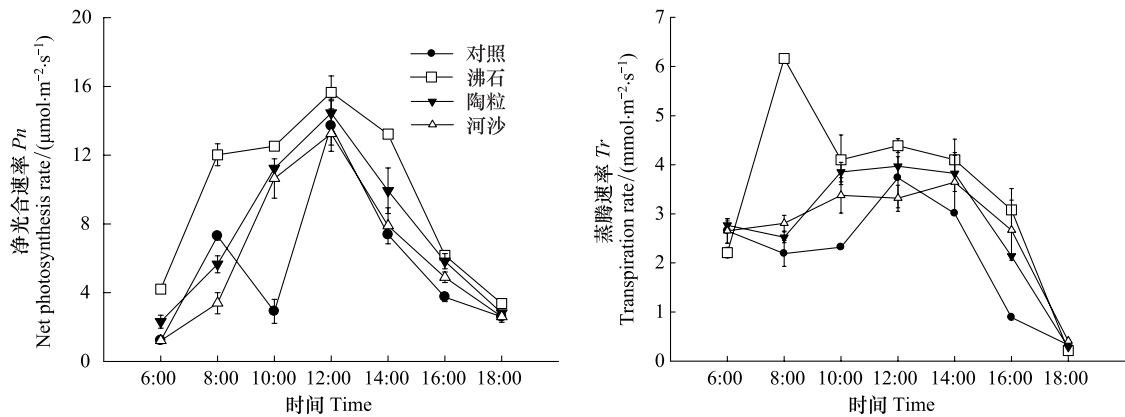


图 2 不同隔盐措施(对照;沸石;陶粒;河沙)刺槐叶片净光合速率与蒸腾速率日变化

Fig.2 Effects of different salt-isolation treatments (control; zeolite;ceramsite; river sand) on leaf photosynthetic rate and transpiration rate of *Robinia pseudoacacia*

表 5 不同隔盐措施下刺槐叶片气体交换特征参数日均值

Table 5 Effects of different salt-isolation materials on photosynthetic parameters of *Robinia pseudoacacia*

处理 Treatment	净光合速率 Photosynthetic rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate/ ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomata conductance/ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/ ($\mu\text{mol/mol}$)	叶片水分利用效率 Leaf water use efficiency/ ($\mu\text{mol/mmole}$)
CK	5.55±0.39 a	2.16 ±0.02 b	0.19 ±0.04 bc	309.21 ±1.21 a	3.35 ±0.18 b
FS	9.67±0.15 b	3.17 ±0.22 a	0.32 ±0.02 a	263.79 ±13.11 b	4.69 ±0.21 a
TL	7.46±0.01 c	2.72 ±0.07 c	0.25 ±0.01 b	287.71 ±5.09 a	3.53 ±0.00 b
HS	6.27 ±0.08 d	2.70 ±0.00 c	0.20 ±0.05 c	290.50 ±5.33 a	2.87 ±0.07 c

同列具有不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)

2.3.4 胞间 CO₂浓度日变化

4 个处理的刺槐叶片 Ci 日变化趋势与 Pn 相反,但与环境 CO₂浓度的变化趋势相同(图 3)。4 种处理的 Ci 日变化趋势基本一致,整体呈现“U”字型,在 6:00 最高,随着 CO₂的固定,Ci 呈下降趋势。12:00—18:00,4 种处理 Ci 值均呈上升趋势。Ci 日平均值大小顺序为:CK>HS>TL>FS。方差分析显示,FS 与 CK 间 Ci 日均值差异显著($P<0.05$),其他处理与 CK 间无显著差异($P>0.05$)。

2.3.5 叶片水分利用效率日变化

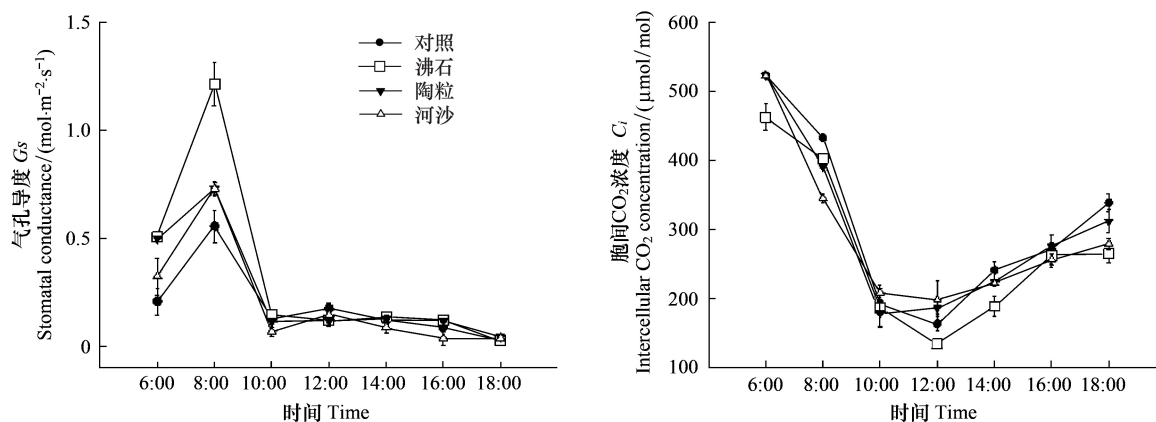
4 种处理刺槐叶片水分利用效率日变化总体上呈现先上升后下降再上升的趋势,均在 18:00 时达到全天最高值(图 4)。CK、FS、TL 和 HS 处理 LWUE 日均值分别为(3.35±0.18)、(4.69±0.21)、(3.53±0.00)和(2.87±0.07)μmol/mmole。与 CK 相比,FS 和 TL 处理的 LWUE 分别提高了 40.3%和 5.6%,而 HS 处理则下降 14.2%。方差分析表明,FS 处理的 LWUE 显著高于其他处理,而 HS 处理的 LWUE 则较其他处理显著降低($P<0.05$)。

2.4 不同隔盐措施对刺槐树高和地径的影响

隔盐处理 40 个月后,3 个处理中,刺槐树高、地径增长量均大于对照植株(图 5)。其中,FS 和 TL 处理树高增长量与地径增长量均与 CK 差异显著($P<0.05$)。HS 处理的树高增长量和地径增长量均与 CK 无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

隔盐层对土壤水盐运移有显著影响。根据王文焰和张建丰^[21]的研究,水在层状结构的土体中入渗时,无

图3 不同隔盐措施下刺槐叶片气孔导度和胞间 CO₂ 浓度的日变化Fig.3 Effects of different salt-isolation treatments on leaf stomata conductance and intercellular CO₂ concentration of *Robinia pseudoacacia*

论夹层土壤质地较表层土壤粗或细,土壤夹层均会对下渗水流起阻挡作用。根据土壤水动力学的原理,土壤水吸力能够反映非饱和土壤中土壤水的运动规律,是非饱和和土壤水运动的驱动力。土壤孔隙度越大,土壤水吸力越小。当水分下渗到土壤和隔盐层交界面时,由于沸石、陶粒和河沙作为隔盐层材料的孔隙度均大于壤土的孔隙度,使隔盐层的水吸力小于上层土壤水吸力,水分渗入隔盐层的过程发生延迟,使更多的水分保持在隔层的上方土壤中。设置隔盐层处理的相对含水量较对照高(表2),原因是土壤样品采集时间为试验区降雨过后的第3天。而对照(CK)是没有设置隔盐层的均质土壤,水分下渗较快。因此隔盐层的设置使隔层上方土壤相对含水量较同层次对照高。

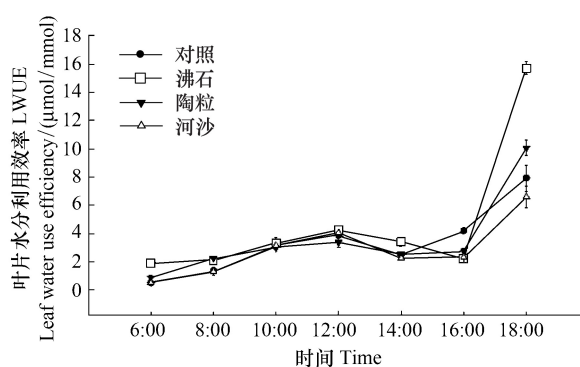


图4 不同隔盐措施下刺槐叶片水分利用效率日变化

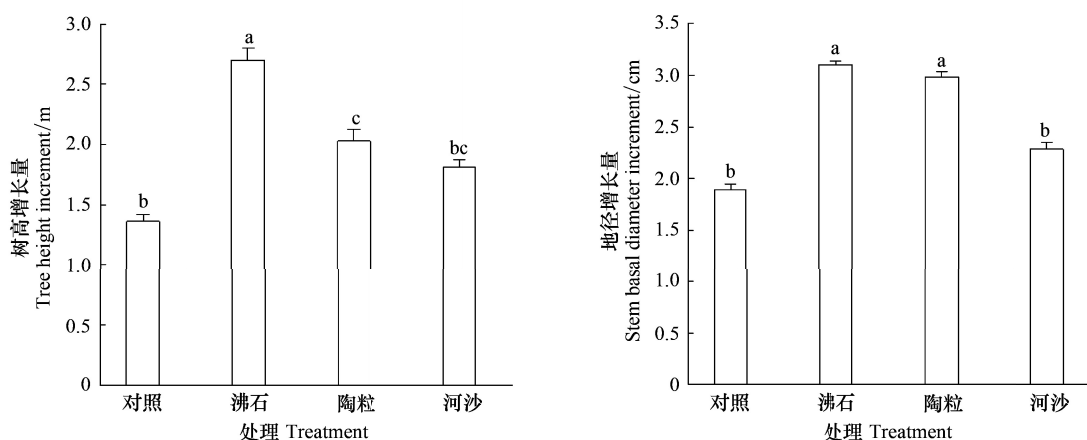
Fig.4 Effects of different salt-isolation treatments on water use efficiency of *Robinia pseudoacacia*

图5 不同隔盐措施对刺槐树高和地径增长量的影响

Fig.5 Effects of salt-isolation treatment on tree height and basal diameter increment

在蒸发强烈的季节,深层土壤水分通过土壤毛细管孔隙向地表运移,使得盐分表聚现象强烈。当在树穴底部设置隔盐层后,破坏了土壤毛细管的连续性;又由于隔盐材料的孔隙度和土壤毛细管孔隙度不同,阻断了上下

土层间的水力联系,使得土壤水分运行到隔盐层下界面时发生停滞,从而导致溶于水的盐分离子在隔盐层下界面累积,一定程度上能够减缓隔盐层上部土体的盐分积聚^[22]。而设置在树穴侧壁的隔盐层,又能同时抑制盐分在土体内随水分的水平运移。加之隔盐层延缓了降雨下渗过程,使水分在下渗过程中能够溶解更多盐分,从而增强了有限降雨的淋洗效果,进一步减少植物生长环境中的盐分含量。本试验中所选用的沸石、陶粒和传统隔盐材料河沙,粒径均大于土壤颗粒,将其用做隔盐层时,可使盐碱土土体毛管孔隙度突然由小变大再减小,能有效减弱毛管力作用,抑制下层水分的上升,减少盐分向上移动,同时隔盐层又能有效增强降雨对盐分的淋洗作用。也就是说,不管土壤水分是源自潜水上升还是降雨入渗滞留,在长时间作用下,FS、TL 和 HS 均可降低土壤盐分含量和盐溶质浓度(表 3 和表 4),从而改善植物生长环境。

本试验发现 FS 处理的隔盐保水效果最佳,这与翟鹏辉等^[23]的研究结果一致。这是由于在树穴底部和侧壁以沸石作为隔盐材料,除了能够有效抑制隔盐层以上土壤积盐和促进洗盐外,沸石本身独特的空间结构也起到了极大的作用,沸石内部晶格架构中具有大量的孔穴和通道,可吸附直径小于孔道的离子或分子,滨海盐土中富含的 Na^+ 、 Cl^- 和 Ca^{2+} 等都可以通过此孔道进入沸石内部被沸石吸附。另外,沸石可以将其内部的水分子自由的排出或重新释放,有利于蓄水保墒^[24]。因此,采用沸石作为隔盐材料能够显著降低隔盐层上部土层的盐分含量和盐溶质浓度,并能调节根区土壤的水分含量。而陶粒的粒径较大,其对潜水上升的阻断能力和对下行重力水的渗透能力大于河沙,因而对土壤盐分及盐溶质浓度的降低作用也较为显著。

光合作用是植物体内极为重要的代谢过程,是作物生产力高低的决定因素和对环境胁迫程度的反应指标^[25]。由于一天中环境因子的周期性变化,引起了光合作用过程中一系列相关因子的变化,而光合日变化的峰值正是外界各种环境因子与植物内部生理调节达到最优的结果^[26]。 P_n 的日变化可作为分析植物生长限制因素的依据之一,土壤水分过低、过高或盐分过高都会降低植物的 P_n ^[27]。刺槐具有较高光合作用和水分利用效率的土壤相对含水量范围为 48%—64%^[28],也就是说当土壤相对含水量小于 48% 时,就会对刺槐生长产生水分胁迫。刺槐属于高耗水性树种,其适宜含水量为 70% 左右,而土壤相对含水量达到 75%—80% 时又会抑制刺槐的光合作用^[15]。

本文各处理的树种、土壤类型及所处微气象环境均相同,结合上述土壤相对含水量、盐分及盐溶质浓度的差异性变化,可以认为隔盐层材料的差异是引起 P_n 日变化差异的主要原因。这是由于 FS 处理和 TL 处理的土壤相对含水量均在刺槐生长的适宜含水量范围内,对 P_n 不存在水分抑制作用;且这两种隔盐材料处理下土壤盐分和盐溶质浓度均较低,因此刺槐叶片 P_n 值均较高。HS 处理土壤相对含水量大于 75%,导致刺槐根系呼吸作用减弱、根系活力降低,使其吸收水分和养分的能力下降,产生一定程度的土壤渍水胁迫,其同时也受到盐分胁迫,最终导致其 P_n 值低于 FS 处理和 TL 处理。CK 处理下刺槐叶片受到水分亏缺和盐分的双重胁迫, P_n 值最低。同时也发现,3 种隔盐措施(FS、TL 和 HS)下 P_n 日变化均呈典型的单峰曲线(图 2),无光合午休现象,而对照(CK) P_n 曲线为双峰形。这表明隔盐措施为刺槐根系创造了更加适宜的水盐环境,使刺槐叶片内部生理对环境的适应调节能力增强。而 CK 则因土壤相对水分含量较低,盐分含量较高而使得刺槐生理调节适应能力受到限制,产生水分和盐分的双重胁迫,导致出现光合午休现象。

蒸腾速率(T_r)的大小可以调节植物的水分代谢,在一定程度上反映了植物调节水分损失的能力^[29-30],水分通过气孔蒸腾是蒸腾作用的主要形式。解婷婷和苏培玺^[31]研究发现, P_n 与 G_s 的相关系数小于 T_r 与 G_s 的相关系数,这说明 T_r 对气孔的依赖性更强。土壤水分在影响 G_s 、调节 T_r 方面尤为重要,土壤水分亏缺会造成气孔关闭,而使 T_r 大幅度下降,植物通过调节气孔开度等方式调节 P_n 和 T_r ,以适应土壤供水状况的变化。本研究表明,FS 和 TL 处理显著增加了 0—80 cm 土层的相对水分含量,使其达到适合刺槐生长的相对含水量范围,同时显著降低了根层土壤的盐分和盐溶质浓度,使土壤溶液的水势升高,根系吸水更加容易,所以两者 G_s 的日均值高于 HS 和 CK。其中 FS 处理的 G_s 日变化曲线呈单峰形,说明沸石隔盐处理更易为刺槐的生长提供适宜的水盐环境,使 G_s 更依赖于气象条件的变化^[32]。由于 FS 和 TL 处理的刺槐叶片有较高的 G_s ,同时其根系从土壤中吸收水分的速度能维持正常的蒸腾,因此一直保持较旺盛的 T_r , T_r 日均值也较高;HS 和 CK 处

理因土壤水分含量过高和过低且盐分含量较高而造成的气孔导度低于 FS 和 TL 处理,是导致其刺槐 T_r 日均值较低的原因。

胞间 CO_2 是光合作用的主要原料之一,胞间 CO_2 浓度 (C_i) 的变化决定了 P_n 和 G_s 之间的因果关系^[33]。逆境胁迫下,植物光合速率降低的自身因素归为两类:气孔部分关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制。前者表现为 C_i 下降,后者表现为 C_i 升高;当两者同时存在时,必须根据 C_i 的变化方向来判断 P_n 下降的主因。Farquhar 和 Sharkey^[34] 认为,在 G_s 下降时, C_i 同时下降才表明 P_n 下降的主要原因为气孔限制。即,只有叶肉细胞间的 CO_2 浓度降低可以证明光合速率的降低是气孔导度降低的结果。相反,叶肉细胞间的 CO_2 浓度增高说明光合速率的降低是气孔导度降低的原因。因此,推测在 8:00—10:00 时间段内,导致 CK 处理 P_n 值下降的因素为气孔因素。12:00—18:00 之间,各处理的 P_n 值均呈下降趋势, C_i 均呈上升趋势,这说明此时段内各处理 P_n 值的下降可能是非气孔因素或气孔不均匀关闭导致的^[35]。

叶片水分利用效率 (LWUE) 是叶片气体交换过程中 CO_2 和水汽的交换比率,其大小可以反映植物对逆境适应能力的强弱。土壤水分条件和叶片气孔导度是影响 LWUE 的重要外部因素和内部因素^[36]。本研究中的 FS 和 TL 处理均具有较高的 G_s 和更加适宜刺槐生长的土壤水分环境,从而导致其两者 LWUE 维持在较高的水平。而 HS 处理的土壤相对含水量在 75% 以上,超出了刺槐生长的适宜相对含水量范围,导致其 LWUE 最低。4 种处理刺槐叶片 LWUE 均在 18:00 时达到全天最高值,这与黄占斌和山仑^[37] 的研究结果相反,这是由于 16:00—18:00 时,随着气孔导度的下降,光合速率和蒸腾速率均下降,但蒸腾速率下降得比光合速率快,从而使水分利用效率升高。Cowan^[38] 认为,当气孔导度使植物在得到 CO_2 和失去水分的调节中达到最优时,其水分利用效率达到最高。FS 和 TL 处理的 LWUE 高于 HS 和 CK 处理,说明 FS 和 TL 处理后,滨海盐土的水盐环境更适合刺槐生长。

由于刺槐适宜在中性土、酸性土和含盐量 0.3% 以下的轻、中度盐渍土上正常生长^[13],而研究区的土壤类型为滨海盐土,表层土壤含盐量达到 0.874%,因此在含盐量大于刺槐适宜生长阈值的条件下,能够轻易的通过刺槐的长势评估出不同隔盐材料的降盐效果。刺槐树高和地径增长量的观测研究也说明,FS 和 TL 处理对刺槐生长的改善效果明显优于 HS 处理,从而进一步证实了 FS 和 TL 处理对刺槐生长的促进作用。

4 结论

在树木种植穴底部和侧壁铺设沸石或陶粒隔盐层可以显著增加树穴内部土壤相对水分含量,为刺槐生长创造更加适宜的水分环境。沸石隔盐处理能降低 0—80 cm 土体内盐分含量和土壤盐溶质浓度,控盐效果明显优于其他处理。陶粒隔盐处理只能在 40 cm 以下土层有显著的降盐效果,且控盐效果比沸石差。河沙处理降盐效果最差。

不同隔盐措施对土壤水分和盐分有不同程度的调控作用,并通过改变土壤水盐动态而影响刺槐光合特性。沸石作为隔盐材料可显著提高刺槐叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及叶片水分利用效率,降低胞间 CO_2 浓度。陶粒处理也可以显著增加刺槐叶片净光合速率、蒸腾速率,但效果均不及沸石显著,且对气孔导度、胞间 CO_2 浓度和水分利用效率没有显著影响。河沙处理虽然能显著增加刺槐叶片净光合速率和蒸腾速率,但却导致叶片水分利用效率显著降低。

综合来看,采用沸石、陶粒和河沙作为隔盐层材料均有助于土壤保墒控盐、改善刺槐光合特性以及促进刺槐生长,其中以沸石作为隔盐材料效果最佳。本文研究结果将直接为滨海地区的盐碱地刺槐造林提供技术和理论支持。

参考文献 (References):

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [2] Wang L L, Sun X Y, Li S Y, Zhang T, Zhang W, Zhai P H. Application of organic amendments to a coastal saline soil in North China: effects on soil physical and chemical properties and tree growth. PLoS ONE, 2014, 9(2): e89185.

- [3] Barter-Lennard E G. Restoration of saline land through revegetation. *Agricultural Water Management*, 2002, 53(1/3): 213-226.
- [4] 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 胡小龙, 王婧, 高鸿永. 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响. *生态学报*, 2013, 33(17): 5153-5161.
- [5] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 张建丰. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究. *农业工程学报*, 2006, 21(9): 23-26.
- [6] Rooney D J, Brown K W, Thomas J C. The effectiveness of capillary barriers to hydraulically isolate salt contaminated soils. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 104(3/4): 403-411.
- [7] 刘玉涛, 董智, 李红丽, 赵名彦, 丁国栋. 不同隔盐措施对滨海盐碱地白蜡光合作用日变化的影响. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 126-130.
- [8] Mahmoodabadi M, Yazdanpanah N, Sinobas L R, Pazira E, Neshat A. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 30-38.
- [9] Yazdanpanah N, Pazira E, Neshat A, Mahmoodabadi M, Sinobas L R. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (II): Impact on nitrogen, phosphorus and potassium redistribution and on microbial respiration. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 39-45.
- [10] 张莉, 丁国栋, 王翔宇, 赵名彦, 郭跃, 韦立伟, 梁文俊. 隔沙层对盐碱地土壤水盐运动的影响. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(2): 197-200.
- [11] 马晨, 马履一, 刘太祥, 左海军, 张博, 刘寅. 盐碱地改良利用技术研究进展. *世界林业研究*, 2010, 23(2): 28-32.
- [12] 翟鹏辉. 天津滨海土壤盐渍化特征与隔盐层处理技术的脱盐效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [13] 曹帮华. 刺槐抗旱抗盐特性研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [14] 唐保林, 马兰萍. 刺槐的特征及其栽培技术. *现代农业科技*, 2011, (22): 231-231.
- [15] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲. 不同土壤水分状况对刺槐的生长及水分利用特征的影响. *林业科学*, 2004, 40(5): 93-98.
- [16] 曹军胜, 刘广全. 刺槐光合特性的研究. *西北农业学报*, 2005, 14(3): 118-122, 136-136.
- [17] 孟凡娟, 王秋玉, 王建中, 李淑艳, 王疆江. 四倍体刺槐的抗盐性. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 654-663.
- [18] 张璐, 孙向阳, 尚成海, 田赞. 天津滨海地区盐碱地改良现状及展望. *中国农学通报*, 2010, 26(18): 180-185.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008: 178-200.
- [20] Pang H C, Li Y Y, Yang J S, Liang Y S. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 2010, 9(12): 1971-1977.
- [21] 王文焰, 张建丰. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究. *农业工程学报*, 1995, 11(1): 104-109.
- [22] Starr J L, Deroo H C, Frink C R, Parlange J Y. Leaching characteristics of a layered field soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42(3): 386-391.
- [23] 翟鹏辉, 李素艳, 孙向阳, 张冬华, 张涛, 张薇, 程龙. 隔盐层对滨海地区盐分动态及国槐生长的影响. *中国水土保持科学*, 2012, 10(4): 80-83.
- [24] 郝秀珍, 周东美. 沸石在土壤改良中的应用研究进展. *土壤*, 2003, 35(2): 103-106.
- [25] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 韩清芳, 杨宝平, 侯贤清. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响. *生态学报*, 2011, 31(3): 777-783.
- [26] 黄刚, 赵学勇, 崔建垣, 苏延桂. 水分胁迫对 2 种科尔沁沙地植物光合和水分利用特性的影响. *西北植物学报*, 2009, 28(11): 2306-2313.
- [27] Munns R. Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant Cell and Environment*, 1993, 16(1): 15-24.
- [28] 张光灿, 刘霞, 贺康宁. 黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究. *应用生态学报*, 2003, 14(6): 858-862.
- [29] Hikosaka K. Effects of leaf age, nitrogen nutrition and photon flux density on the organization of the photosynthetic apparatus in leaves of a vine (*Ipomoea tricolor* Cav.) grown horizontally to avoid mutual shading of leaves. *Planta*, 1996, 198(1): 144-150.
- [30] Jones H G, Sutherland R A. Stomatal control of xylem embolism. *Plant Cell and Environment*, 1991, 14(6): 607-612.
- [31] 解婷婷, 苏培玺. 干旱区不同土地类型下甜高粱叶片光合特性和水分利用效率. *中国农业科学*, 2011, 44(2): 271-279.
- [32] 王建林, 于贵瑞, 王伯伦, 齐华, 徐正进. 北方粳稻光合速率、气孔导度对光强和 CO₂ 浓度的响应. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 16-25.
- [33] 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题. *植物生理学通讯*, 2006, 42(6): 1163-1167.
- [34] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(1): 317-345.
- [35] 许大全. 气孔的不均匀关闭与光合作用的非气孔限制. *植物生理学通讯*, 1995, 31(4): 246-252.
- [36] 曹生奎, 冯起, 司建华, 常宗强, 卓玛措, 席海洋, 苏永红. 植物叶片水分利用效率研究综述. *生态学报*, 2009, 29(7): 3882-3892.
- [37] 黄占斌, 山仑. 不同供水下作物水分利用效率和光合速率日变化的时段性及其机理研究. *华北农学报*, 1999, 14(1): 47-52.
- [38] Cowan I R. Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants // Lange O L, Nobel P S, Osmond C B, Ziegler H. *Physiological Plant Ecology II. Encyclopedia of Plant Physiology*. vol 12B. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982: 589-613.