

滨海盐碱地刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 混交林土壤水盐动态

曹帮华¹, 吴丽云¹, 宋爱云², 于学宁¹, 郝木征³, 扈明明³

(1. 山东农业大学林学院, 山东泰安 271018; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

3. 山东省东营市园林绿化处, 山东东营 257091)

摘要:以固氮树种刺槐与绒毛白蜡、榆树、臭椿三树种的混交林及其纯林为研究对象,研究了刺槐与不同树种混交对土壤水分、盐分年动态变化的影响。研究表明:(1)刺槐与 3 个树种混交,刺槐臭椿混交林生长最好,均高于各自纯林。(2)混交林一定程度改善了土壤含水量及层次分布,土壤含水量整体趋势均表现出 0~60 cm 表层土中含水量高于各自纯林,而深层土壤含水量低的特点,只有 8 月份纯林和混交林的土壤含水量没有显著差别。不同树种在具体层次上略有差异;(3)混交林降低了土壤含盐量,改变了土壤盐分层次分布和年变化规律。不同月份间土壤含盐量随土壤深度、混交树种的变化而变化。深层土壤含盐量高,表层土壤含盐量低,混交林含盐量低于纯林且存在树种差异。混交林与纯林含盐量均雨季低,旱季高;但在某一具体月份各层次含盐量差别不大;不同土层含水量、含盐量与天然降水之间有明显的相关性,天然降水是混交林及纯林土壤水分的主要来源。

关键词:刺槐 (*Robinia pseudoacacia*);混交林;滨海盐碱地;年水盐运动规律

文章编号:1000-0933(2008)03-0939-07 中图分类号:S152 文献标识码:A

The soil water and soil salt distribution in coastal saline-alkali area: a comparison of pure and mixed plantations

CAO Bang-Hua¹, WU Li-Yun¹, SONG Ai-Yun², YU Xue-Ning¹, HAO Mu-Zheng³, HU Ming-Ming³

1 Forestry College of Shan Dong Agricultural University, Shandong, Tai'an 271018, China

2 Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 The Landscape Bureau of Dongying City, Shandong, Dongying 257091, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 0939 ~ 0945.

Abstract: To compare the pure plantations of *Robinia pseudoacacia*, *Fraxinus*, *Ulmus pumila*, and *Ailanthus* and mixed plantation with a nitrogen fixation species of *Robinia pseudoacacia* in the annual variations of soil water and soil salt, a series of experiments were carried out to measure the growth of the stand and the amount of soil water and soil salt for different kinds of plantations. The results showed that the mixed plantation of *R. pseudoacacia* and *A. altissima* had the best growth among three mixed plantations and all pure plantations. A major characteristic of mixed plantations is the improvement of soil water and soil salt distribution. Top layer of soil (0—60 cm) maintained more water in mixed plantations compared to their respective pure plantations, while the deeper soil water was low in all mixed plantations. As expected, there were not significant differences in soil water between pure and mixed plantation in August. Mixed

基金项目:国家科技部农业科技成果转化资金资助项目(02EFN216700794);山东省“十一五”重点科技攻关资助项目(2006GG2206001)

收稿日期:2007-09-06; 修订日期:2007-12-26

作者简介:曹帮华(1964~),男,山东苍山人,博士,教授,主要从事森林培育、树木生理生态研究. E-mail:caobh@sda. edu. cn

Foundation item: The project was financially supported by Agriculture High-tech Achievements Translation item of Ministry of Science and Technology, China (No. 02EFN216700794) and the Eleventh 5-year Key Programs for Shandong Province (No. 2006GG2206001)

Received date: 2007-09-06; **Accepted date:** 2007-12-26

Biography: CAO Bang-Hua, Ph. D., Professor, mainly engaged in silviculture and tree eco-physiology. E-mail:caobh@sda. edu. cn

plantations decreased soil salt and changed the annual distribution in different soil layers. Soil salt varied with months of the year, soil depth, and tree species of mixed plantation. For all plantations, soil salt migrated from top to deeper soil. Further more, the mixed plantations lowered soil salt compared to the pure plantation. Contrast to dry season, soil salt was low in rainy season in both pure plantations and mixed plantations, and the vertical distribution was same in both of pure and mixed plantations. Soil water and soil salt distribution were closely related to seasoning precipitation, and this explains that precipitation was the main water source for pure and mixed plantation.

Key Words: *Robinia pseudoacacia*; mixed plantation; coastal saline-alkali area; soil water and soil salt distribution

山东滨海盐碱地面积巨大,主要分布在莱州湾沿岸与黄河三角洲地区,是山东省最重要后备土地资源,盐渍化是制约滨海盐碱地农林生产发展的主要障碍^[1,2],山东滨海盐碱地森林覆被率低,生态环境脆弱,其改良利用研究对实现该地区土地资源的可持续利用具有重要意义。

滨海盐碱地盐土盐分运动十分复杂。盐分随着水分的运动而迁移,水分是盐分迁移的重要载体。国内外就盐渍化土壤水盐的动态、运移机制、空间分布特征等方面从不同时空尺度进行了多角度的研究^[3~17],尤以内陆盐渍土水盐运动模拟研究较多^[18~20],而对滨海盐渍土,尤其人工林内部水盐运移状况缺乏系统研究^[21]。在滨海盐碱地,水分和盐分是限制树木成活及生长的关键因子,树种间的水分竞争尤为突出,而且水分与盐分之间还有着某种潜在的关联。本文以黄河三角洲滨海盐碱地刺槐纯林和不同类型刺槐混交林(刺槐×白蜡、刺槐×臭椿、刺槐×榆树)为研究对象,对林内土壤水分与盐分的年运动规律进行了跟踪调查研究,旨在揭示不同刺槐混交林种间水分与盐分关系的实质,为指导盐碱地造林及开发利用滨海盐碱地提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山东省东营市河口区进行,该地地处黄河三角洲东北部,属暖温带半湿润大陆性气候,全年平均气温 12.3℃,极端最高气温达 41.9℃,极端最低气温 -23.3℃,大于 0℃ 以上积温 4783.5℃,大于 10℃ 以上积温 4183℃;太阳辐射年总量 5146~5411J/m²,年日照时数 2571~2865h,平均 2682h,是我国日照较丰沛的地区之一;平均无霜期 210d,降水量 542.3~842mm,其中约 63.9% 的降水集中于夏季,年蒸发量 1962.1mm,是降水量的 3.6 倍,春季是强烈的蒸发期,蒸发量占全年的 51.7%。试区为冲积性黄土母质在海浸母质上沉积而成,机械组成以粉沙为主,沙黏相间,层次变化复杂。由于土壤发育时间相对较短,尚未形成良好结构。土壤主要为滨海盐土,含盐量多在 1.0%~2.6% 之间,局部地段在 0.5%~1.0%,最高可达 3.564%。土壤 pH 值 6.79~8.87,平均 7.94,地下水位约 1.5m,水质矿化度较高。天然优势植物群落为怪柳群落和碱蓬群落,光板地分布相当普遍。群落种类组成主要有碱蓬、矮芦苇、罗布麻等,怪柳优势群落植被覆盖率平均 8%~33%,高者达 39%,光板地的植被覆盖率不足 5%^[5]。

1.2 研究对象

试验林均为 20 年生刺槐(*Robinia pseudoacacia*)纯林、臭椿(*Ailanthus altissima*)纯林、榆树(*Ulmus pumila*)纯林、绒毛白蜡(*Fraxinus chinensis*)纯林、刺槐和臭椿(1:1)行状混交林、刺槐和榆树(1:1)株间混交林、刺槐和白蜡(3:1)行状混交林。试验林于 1985 年春季采用 1 年生苗营造,株行距均为 2.5m×3m,翌年用同龄苗木进行了补植;造林当年林地间作豆类,第 2、3 年进行机械除草 1 次。不同类型林分随机区组排列,3 次重复。由于缺乏经常性的管护,目前林分生长状况一般。

1.3 研究方法

试验对上述 7 种类型的林分分别设置 0.06 hm² 的标准地,对标准地林木进行每木检尺,测定胸径、树高;在纯林、混交林内采用简单机械抽样法设置标准地,在样地内分树种进行株间设置取样点,每月中旬定期采集土样测定土壤水分盐分,每个采样点按 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100cm 5 个层次分别

采集土样,用烘干减重法(105℃下烘 12~14h)测定各层土壤含水量,用 DDSJ-308 型电导率仪测电导率法测土壤含盐量,水:土=5:1,以上测定均 5 次重复。

2 结果与分析

2.1 刺槐混交林土壤水盐年动态变化

2.1.1 刺槐白蜡行状混交林

刺槐和白蜡混交,混交林刺槐和白蜡株间含水量年变化较纯林表现出不同的规律性。混交林中刺槐株间含水量有两个高峰在 11~12 月份、6~8 月份;而白蜡株间含水量则表现出 4 个高峰分别在 11~12 月份、2 月份、4 月份、8 月份。纯林白蜡和刺槐的株间含水量也是 8 月份有个明显的高峰。总的来说,在 0~40cm 的表层土壤中,不同月份混交林 2 树种株间含水量均显著高于各自纯林的含水量($p < 0.01$),而在 40~80cm 的深层土壤中,不同月份纯林株间土壤含水量整体趋势显著高于混交林中相应树种($p < 0.01$),只有 8 月纯林和混交林的土壤含水量没有显著差别。并且,无论是混交林还是纯林,80~100cm 的深层土壤含水量在 1 年中都是最低的。刺槐与绒毛白蜡混交,能显著提高不同月份的林分土壤表层的含水量,这可能与混交林郁闭度大,地面杂草少,因而可以更大程度的减少土壤表层水分的蒸发,增加表层土壤中的含水量,改善表层土壤中的水分状况有关;而混交后深层土壤的含水量降低,这可能是因为固氮树种刺槐促进了白蜡的生长,使林分中的叶量和叶面积增大,从而增加了蒸腾耗水的缘故(图 1)。

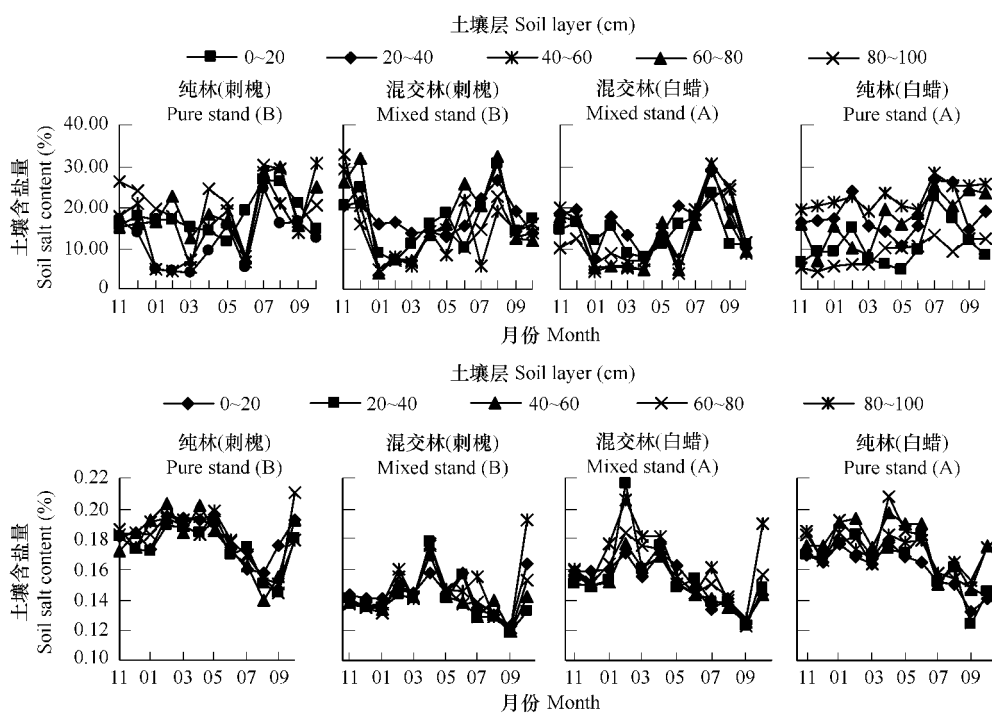


图 1 刺槐白蜡混交林及其纯林水分、盐分年动态变化

Fig. 1 The dynamic year changes of water and salt for mixed forest of *R. pseudoacacia* and *F. chinensis*

土壤中的盐离子一般随着土壤水分的运动而迁移。滨海盐碱地区具有明显的干湿季节变化,盐分因为具有“盐随水来,盐随水去”的特点,土壤也伴随着发生积盐和脱盐周期性变化,总的趋势是向脱盐方向发展,但不同土地利用类型盐分动态有很大差异。刺槐和白蜡混交林中土壤结构良好、大孔隙多,阻止了水分向上运动和蒸发,因而在旱季林分土壤含盐量自上而下逐渐增大,表层略小于底层,但不显著,无返盐现象(图 1)。林分由于改土时间长,土壤含盐量较相应纯林低,表现出混交林的优越性。在雨季,混交林及纯林各层次土壤含盐量为一年中最低值,这与含水量直接相关。但总的表现趋势是,表层土壤含盐量 0~60cm 内较低,而 60cm 以下则有所升高,显然这是林木根系作用的结果。由于刺槐根系大多分布在 60cm 以上,夏季树冠蒸腾

强烈,使地下水向根系聚积,水分被根系吸收后,部分盐分被根系吸收、转化,根层土壤含盐量下降,但根层以下盐分不断积累,因而土壤含盐量高。

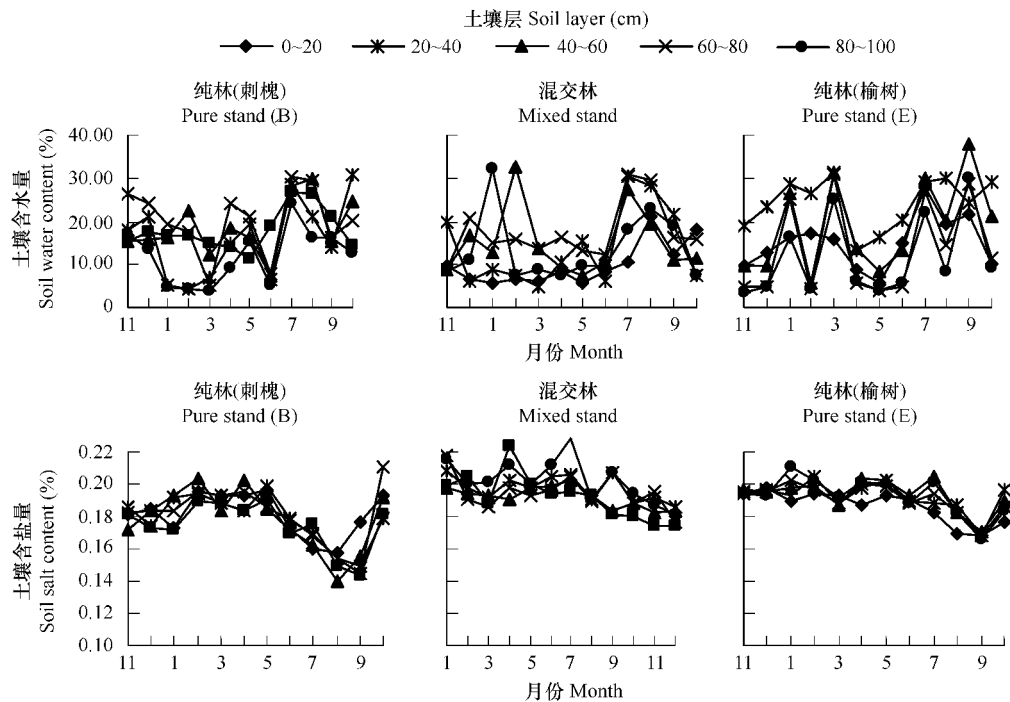


图2 刺槐榆树混交林及其纯林水分、盐分年动态变化

Fig. 2 The dynamic year changes of water and salt for mixed forest of *R. pseudoacacia* and *U. pumila*

2.1.2 刺槐榆树株间混交林

研究发现,刺槐榆树混交林与刺槐白蜡混交林相似之处是土壤株间含水量高峰也是出现在雨季(7月份);不同之处表现在0~60cm土壤中,不同月份刺槐榆树混交林土壤株间含水量均高于榆树纯林但低于刺槐纯林,但差异未达到显著水平($p > 0.05$)。其原因可能是无论是草本植物的密度还是高度,以榆树纯林为最大、混交林次之、刺槐纯林最少,榆树纯林中杂草对水分的竞争和激烈,纯林郁闭度小,蒸腾强度大;而刺槐榆树混交林中40~60cm土层的土壤株间含水量高并且高于混交林中其他层次,混交林中60~100cm土壤株间含水量均高于纯林刺槐和榆树。无论是混交林还是纯林,均是80~100cm土层含水量最低。土壤含盐量的这种垂直变化规律显然与林木根系分布有关,研究表明榆树的根系以细根为主,并集中分布在0~10cm的最表层,细根随深度增加而减少的现象很明显,与刺槐根系比较,榆树浅根系的特征更突出,因而在对水分的吸收方面,具有一定程度的分层性和互补性。

和土壤株间含水量表现不同,一年中从11月份开始,混交林中各层次土壤含盐量总体上呈下降的趋势,并低于纯林刺槐和榆树,这可能与混交林地表土疏松(林粮间作),以及春秋季节气温降低、雨季蒸腾减少、秋雨淋溶有关。纯林刺槐和榆树有着相似的变化规律,即从11月份开始逐渐下降,8月份降到最低点后又有所上升。可能与雨季过后气温高,纯林郁闭度小,蒸腾强烈,雨水少有关。

2.1.3 刺槐臭椿行状混交林

从刺槐与臭椿混交林的生长状况可知,在3种混交林中,刺槐臭椿混交是唯一能够使2个树种均获益,生长促进效果显著的混交方法。从图3可以看出,土壤株间含水量的季节变化与前2种混交林有一定的相似性。臭椿纯林的土壤株间含水量随着土层深度的逐渐加深逐渐减少,混交林中刺槐和臭椿的土壤株间含水量总体变化趋势与刺槐纯林相似,并且都是土壤株间含水量40~80cm > 0~40cm > 80~100cm,只是混交林中各层次间含水量较纯林拉开了一定的幅度,纯林各层次在季节变化上比较有规律。这是因为刺槐根系表层分布多,吸收水分导致表层土壤含水量较低;臭椿生长迅速,蒸腾作用旺盛,根蘖能力强,根系分布深可以大量吸

取深层的水分,加之本来深层土壤水分少,导致深层土壤水分最低。

混交林中土壤含盐量的变化趋势是:刺槐与纯林刺槐相似、臭椿与纯林臭椿相似,但刺槐是逐渐下降而后到 10 月份最高,臭椿则是 11 月份最高而后逐渐下降。虽然混交林与纯林中各层次间含盐量随着季节的变化没有太大的差别。但仍然可以看出,混交林各树种的含盐量低于相应纯林,而且深层土壤含盐量 60 ~ 100cm > 0 ~ 60cm。这显然也是与 2 树种的根系分布有关。

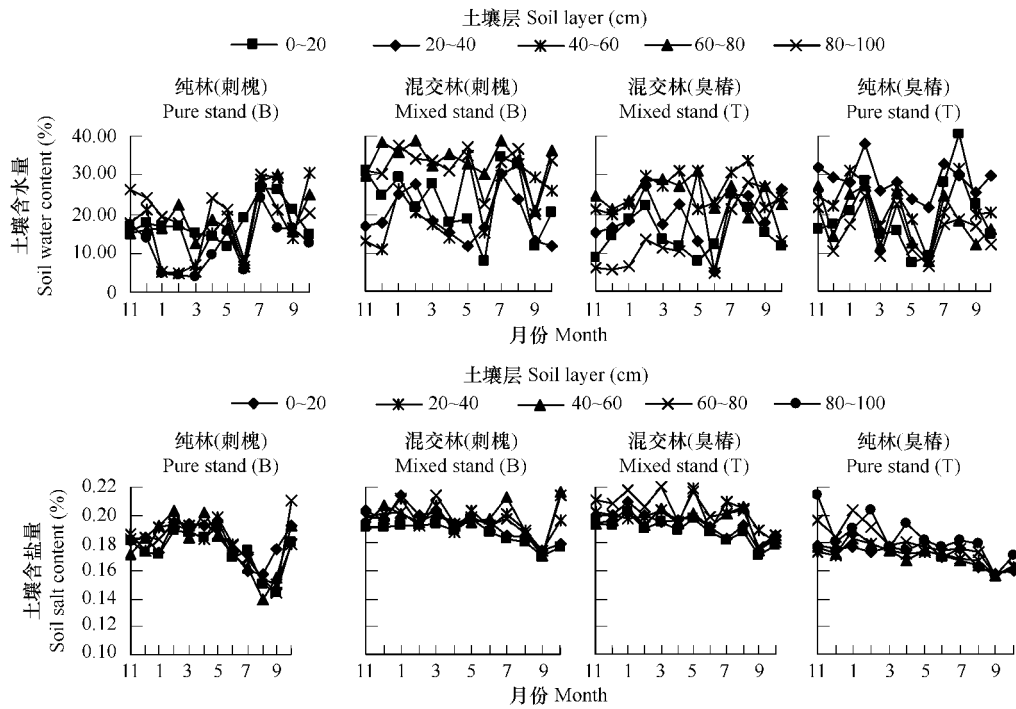


图3 刺槐臭椿混交林及其纯林水分、盐分年动态变化

Fig.3 The dynamic year changes of water and salt for mixed forest of *R. pseudoacacia* and *A. altissima*

2.2 不同类型林分的林木生长

各林分林木生长调查结果见表 1。结果表明:刺槐与绒毛白蜡混交林中刺槐与绒毛白蜡平均胸径均远远高于相应纯林,达到纯林刺槐和白蜡的 116.8% 和 133.0%;混交林中白蜡的平均树高显著高于纯林,是纯林的 120%,而刺槐则较纯林略有下降,但相差不大。刺槐与榆树混交,榆树得益较大,平均胸径和平均树高分别是纯林的 139.0% 和 163.8%,增长显著;而刺槐长势则较纯林差,分别下降了 16.8% 和 7.0%。混交效果表现最好的是刺槐臭椿混交林,平均胸径和平均树高都有明显提高,刺槐分别为纯林的 108.3% 和 102.9%,臭椿分别为纯林的 119.4% 和 127.8%,达到了相互促进的效果。

表 1 刺槐混交林及其纯林生长调查表

Table 1 The tree growth of *Robinia pseudoacacia* pure stand and its mixed stands

林分类型 Stands types	树种组成 Tree composition (%)	保存率 Preserving ratio (%)	郁闭度 Closing degree	胸径 DBH (cm)	树高 H (m)
刺槐 Black locust (B)	100	63	0.7	14.13	9.81
白蜡 Ash (A)	100	47	0.6	12.70	8.60
榆树 Elm (E)	100	78	0.5	10.91	6.29
臭椿 Tree of heaven (T)	100	81	0.5	9.04	7.27
刺槐 × 白蜡 B × A	75/25	52/72	0.8	16.51/16.89	9.58/10.31
刺槐 × 榆树 B × E	50/50	62/60	0.7	13.94/15.17	9.12/10.30
刺槐 × 臭椿 B × T	50/50	67/82	0.8	15.30/10.79	10.09/9.29

混交林营造的成败很大程度上取决于混交树种间关系是否协调,而种间关系主要取决于混交树种生物学特性,还与混交方法及比例有关。各林分林木生长现状是树木与盐碱土长期作用的结果,一方面土壤水盐影响着树木生长。研究证实,盐分对树木的生长有的抑制作用,随着盐分浓度的提高,树高、地上与地下部分生物量都呈下降趋势,盐分对土壤的理化性状和肥力状况也会产生不良影响^[22];另一方面不同林分的枯枝落叶和根系也深刻改变着土壤有机质状况,影响土壤有机质的数量和构成^[23,24],而有机质的动态变化也反过来影响土壤水盐运动状况和肥力特性^[20]。

从地上地下部分看,臭椿窄冠、深根性和刺槐阔冠、浅根性相得益彰,树种生物学特性的互补性明显,混交林林分空间结构分布合理,营养空间扩大,不仅林分地上部分更能充分利用光能进行光合作用,而且林分地下部分具有成层性,能充分利用林地养分,混交造林效果好。

3 结论

刺槐与不同树种混交,表现出不同的水盐运动规律。在 0~40cm 的表层土壤中混交林土壤株间含水量高于纯林,刺槐与绒毛白蜡混交林与纯林差异达到了极显著水平($p < 0.01$),刺槐榆树、刺槐臭椿混交林与纯林间差异不显著;40~80cm 土层,刺槐与白蜡混交林土壤株间含水量低于纯林,刺槐榆树混交林、刺槐臭椿混交林相反,都高于相应纯林;刺槐与 3 树种混交林中共同点是 80~100cm 土层中的含水量是各土层中最低的,但混交林略高于纯林。

根据刺槐混交林和纯林中水分的年动态变化,大致可以将不同层次的土壤含盐水平分为 3 组,即 0~20cm 和 20~40cm 为一组,土壤含盐量低;60~80cm 和 80~100cm 为另一组,土壤含盐量显著高于上一组;40~60cm 为过渡层次,土壤含盐量介于上述两组之间。土壤含盐量的这种垂直变化规律显然与林木根系分布有关。白蜡、臭椿都是深根性树种,根系大多分布于 0~60cm 土层内,具有更好的吸收水分的能力,而榆树作为浅根性树种,根系分布范围窄,降盐改土的能力也就差。

综合以上分析,在滨海盐碱地上营造刺槐混交林,混交效果表现最好的是刺槐臭椿混交林,平均胸径和平均树高都有明显提高,刺槐白蜡混交林对白蜡促进作用更为明显,刺槐榆树混交林最差;各种刺槐混交林对土壤含水量、含盐量均有一定改良作用,对土壤盐分改良效果以刺槐白蜡混交林最好,刺槐臭椿混交林、刺槐榆树混交林效果次之,但垂直分布规律各不相同。

References:

- [1] Wang Z Q, Zhu S Q, You W R. Salt soil of china. Beijing: Science Publishing, 1993.
- [2] Yao R J, Yang J S, Jiang L. Study on spatial variability and appropriate sampling quantity of soil salinity in Yellow River delta. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 89—94.
- [3] Zhang W Z, Gao Q. Exploration of the movements of water and dissolved salts in soils under different plant communities in *Aneurolepidium chinense* grassland of Songnen Plain. Acta Phytocologica Sinica, 1994, 18(2): 132—139.
- [4] Zhang B S, Hu Z Z, Zhu X Y. Studies on soil, water and salt dynamics of *Puccinellia* grassland in Hexi Region of Western Gansu. Acta Prataculture Sinica, 1994, 3(3): 61—70.
- [5] Li Y X, Dongye G L, Li X J. Counter measure on sustainable utilization of saline soil in Yellow River delta. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 55—61.
- [6] Liu W A. General mathematical modelling for heat and mass transfer in unsaturated porous media; an application to free evaporative cooling. Heat and Mass Transfer, 1995, 31(1): 49—55.
- [7] Li Y, Wang W Y, Wang Q J, Shao M A, et al. Comparison analysis on water and salt movement characteristics under isothermal and non-isothermal conditions. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(6): 16—20.
- [8] Xiao M, An S Z. The water-salt attributes of the grassland soil-plant system in arid region. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20(5): 397.
- [9] Nielsen D R. Water flow and solute transport in unsaturated zone. Water Resources Research, 1986, 22(9): 89—108.
- [10] Fu H, Zhu X Y, Yan S G. Studies on water and salt dynamic of *Puccinellia* grassland and the factors affecting them in saline alias of Hexi Corridor Regions. Prataculture Science, 1997, 14(2): 1—4, 8.
- [11] Yang G Y. A Study on water-salt movement of solonchak in Hetao Plain, Inner Mongolia. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(4): 107—110.

- [12] Niu D L, Wang Q J. The water-saline dynamic analysis of the discarded field in Chaidamu basin. *Acta Pratacultura Sinica*, 2002, 11(4): 35—38.
- [13] Hu S J, Kang S Z, Song Y D, *et al.* Research on spatial variability of soil water and salt in Weigan River irrigation area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 10—12, 20.
- [14] Ziberbrand, Michael, Gvirtzman, Haim. Monitoring of water flow and solute transport through the unsaturated zone using a large-diameter borehole. *Ground Water*, 1996, 34(1): 57.
- [15] Shi Y C, Li Y Z, Lu J W. The movement of moisture and salt within the salinity soil. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1986.
- [16] Li C S, Yang X H, Yu C T, *et al.* Effects of grazing on spatial heterogeneity of soil moisture and salt content in saline grassland in low terrace of the Yellow River. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2402—2408.
- [17] Armstrong S B, Rycroft D W, Tanton T W. Seasonal movement of salts in naturally structured saline-sodic clay soils. *Agricultural Water Management*, 1996, 32(1): 15—27.
- [18] Xu D, Cheng X J. Model application of Water Flow and Solute Transport During Non-steady Diffusion From Subsurface Emitter Source. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(1): 27—30.
- [19] Xu L G, Yang J S, Zhang M X. Study of simplified transport model on forecasting the water-salt regime of salt-affected soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(1): 8—11.
- [20] Zhang S R, Huang Y F, Li B G, *et al.* The temporal and spatial variability of soil organic matter contents in the alluvial region of Huang-Huai-Hai Plain, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, (12): 2041—2047.
- [21] Hu H B, Liang Z H. Reducing soil salinity of shelter-forest in silting coastal area. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(5): 34—37.
- [22] Zhang J F, Zhang X D, Zhou J X, *et al.* Effects of salinity stress on poplars seedling growth and soil enzyme activity. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 426—430.
- [23] Chang C. Variation in soil total organic matter content and total nitrogen associated with microrelief. *Canadian. J. of Soil Sci.*, 1995, 75(4): 471—473.
- [24] Wu J, O' Donnell A G, Syers J K. Modeling soil organic matter changes in lay-arable rotations in sandy soils of Northeast Thailand. *European J. of Soil Sci.*, 1998, 49: 463—470.

参考文献:

- [1] 王遵亲, 祝寿泉, 尤文瑞, 等. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993.
- [2] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 黄河三角洲土壤盐分空间变异性与合理采样数研究. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 89~94.
- [3] 张为政, 高琼. 松嫩平原羊草草地土壤水盐运动规律的研究. *植物生态学报*, 1994, 18(2): 132~139.
- [4] 张柏森, 胡自治, 朱兴运. 河西地区碱茅属植物草地水盐动态研究. *草业学报*, 1994, 3(3): 61~70.
- [5] 李贻学, 东野光亮, 李新举. 黄河三角洲盐渍土可持续利用对策. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 55~61.
- [7] 李毅, 王文焰, 王全九, 等. 等温与非等温条件下水盐运动特征的比较. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 16~20.
- [8] 肖明, 安沙舟. 干旱区不同草地土壤植物系统水盐的特征. *植物生态学报*, 1996, 20(5): 397~403.
- [10] 付华, 朱兴运, 阎顺国. 河西走廊盐渍区碱茅草地水盐动态及影响因素的研究. *草业科学*, 1997, 14(2): 1~4, 8.
- [11] 杨光滢. 内蒙古河套平原盐碱地水盐运动研究. *林业科学*, 1999, 35(4): 107~110.
- [12] 牛东玲, 王启基. 柴达木盆地弃耕地水盐动态分析. *草业学报*, 2002, 11(4): 35~38.
- [13] 胡顺军, 康绍忠, 宋郁东, 等. 渭干河灌区土壤水盐空间变异性研究. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 10~12, 20.
- [15] 石元春, 李韵珠, 陆锦文. 盐渍土的水盐运动. 北京: 北京农业大学出版社, 1986.
- [16] 李朝生, 晓晖, 于春堂, 等. 放牧对黄河低阶地盐化草场土壤水盐空间异质性的影响. *生态学报*, 2006, 26(7): 2402~2408.
- [18] 许迪, 程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模型的应用. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 27~30.
- [19] 徐力刚, 杨劲松, 张妙仙. 土壤水盐运移的简化数学模型在水盐动态预报上的应用研究. *土壤通报*, 2004, 35(1): 8~11.
- [20] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征. *生态学报*, 2002, (12): 2041~2047.
- [21] 胡海波, 梁珍海. 淤泥质海岸防护林的降盐改土功能. *东北林业大学学报*, 2001, 29(5): 34~37.
- [22] 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 盐分胁迫对杨树苗期生长和土壤酶活性的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 426~430.