

# 低洼盐渍区滴灌不同土壤水基质势对土壤盐分及速生杨生长的影响

董世德<sup>1,2</sup>, 万书勤<sup>2</sup>, 康跃虎<sup>2</sup>, 孙甲霞<sup>2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为探寻宁夏引黄低洼灌区植被快速构建模式, 以速生杨为试验对象, 设置-5, -10, -15, -20, -25 kPa 5个滴灌土壤水基质势处理进行水盐调控试验。结果表明, 低盐区呈椭圆状分布, 且随灌水量增加而增大; 基质势处理开始前强化淋洗阶段, 盐分淋洗迅速, 较初始值降低 70.87%, 单位脱盐灌溉水耗水率为 41.7 mm/(dS/m); 基质势处理阶段, 各处理整个土层盐分差异不显著, 但 0—40 cm 土层的  $EC_e$  值和 SAR 有显著差异, 且随基质势控制阈值的降低而线性增加。通过对速生杨树高、冠幅、株径、胸径及新梢生长量 5 个生长指标的主成分分析, 发现-15 kPa 处理和-5 kPa 处理得分在均值以上, 其余处理在均值以下。本着水资源高效利用的原则及盐分淋洗效果, 确定-15 kPa 为本地区速生杨生态林构建的基质势控制阈值。

**关键词:** 速生杨; 植被构建; 水盐调控; 土壤水基质势; 主成分分析

中图分类号: S157.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0236-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.039

## Effect of Different Soil Matric Potentials on Distribution of Soil Salt and Growth of Poplar (*Populus*) by Drip Irrigation in Low-lying Saline Area

DONG Shide<sup>1,2</sup>, WAN Shuqin<sup>2</sup>, KANG Yuehu<sup>2</sup>, SUN Jiaxia<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** Irrigation districts in low-lying areas of Ningxia, where drawing water from Yellow River, suffered from salinization and poor ecosystem problems. Aiming to construct vegetation rapidly in these areas, experiments of water and salt management that chose poplar (*Populus*) as target plant included five drip irrigation treatments, in which controlled soil matric potential (SMP) higher than -5 kPa, -10 kPa, -15 kPa, -20 kPa and -25 kPa respectively. Results showed low salinity zone, which enlarged as the irrigation water amount increased, appeared irregular oval. At the enhanced leaching stage that before the soil matric potential treatments was conducted, the salt leached rapidly with a decrease of 70.87% compared with the initial values and the water consumption per  $EC_e$  unit (dS/m) decrease was 41.7 mm. As the soil matric potential (SMP) treatments conducted, the  $EC_e$  and SAR from 0 to 40 cm depth soils had significant difference while significant difference was not showed in the whole depth soils. The  $EC_e$  and SAR increased linearly as the soil matric potential controlled decreased. Principal component analysis of poplar's growth factors, including height, crown width, stem diameter, diameter at breast height (DBH), and growth rate of treetop, showed the treatments of both -15 kPa and -5 kPa got scores higher than the average value while others got lower scores than the average value. Based on principle of efficient water use and the effect of salt leaching, the -15 kPa could be used as a controlled SMP value to instruct the poplar ecology forestry construction in this area.

**Keywords:** poplar; vegetation construction; water and salt management; soil matric potential; principal component analysis

收稿日期: 2016-08-10

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项(201504402); 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0501304); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC028); 国家自然科学基金项目(51409126)

第一作者: 董世德(1990—), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事盐渍土水盐调控研究。E-mail: dongsd.14s@igsrr.ac.cn

通信作者: 万书勤(1978—), 女, 江西南昌人, 副研究员, 主要从事农田水循环与农业水资源高效利用研究。E-mail: wansq@igsrr.ac.cn

宁夏青铜峡市地处低洼引黄灌区,引黄灌溉采用大引大排的形式,灌溉水利用效率低,渗漏严重,地下水位升高,次生盐渍化严重,生态脆弱<sup>[1]</sup>,有必要通过综合造林方式进行盐碱地生态恢复改良。造林可以增加土壤有机质,改良土壤结构,降低地下水位,改善环境,调节小气候<sup>[2]</sup>。宁夏地区造林过程中种植最广的树种为杨属植物,人工林普遍存在成活率低、质量差和树种结构单一的问题<sup>[3]</sup>。除此之外,引黄灌区次生盐渍化面积较大,普通造林法难以保证树种存活。针对这些问题,该地区有待进一步开展水盐机理和速生经济生态林造林技术的研究。

在盐碱地造林过程中主要形成了改良剂、隔盐层、客土法以及滴灌技术+砾石隔盐层法等有效的造林技术<sup>[4-6]</sup>。其中改良剂措施对改良盐碱地土壤,特别是碱土有着不可替代的作用。然而,对于次生盐渍化土壤,碱化现象不明显,这对改良剂的施用量要求较高,施用量偏高,易造成土壤全盐升高,施用量偏低,效果不明显。隔盐层法和客土法通过深挖树坑,铺设垫层,换土填埋,对于重度低洼盐碱地能够有效保证成活率并防止盐分上移,这种工程措施需要大量的好土,运输及人力成本较高<sup>[7]</sup>。滴灌+砾石隔盐层法效果显著,但是投入成本太高,适合盐碱地景观绿化,而对低成本构建生态林经济适用性差。近年来,康跃虎等<sup>[8-9]</sup>和 Wan 等<sup>[10]</sup>提出的“垄作+覆膜+滴灌”的种植模式,以及集成了滴头正下方 20 cm 处土壤基质势的水盐调控方法等技术体系,并取得了良好的改良效果。因此,本研究提出“垄作+滴灌+乔灌木结合”的综合生态林构建技术,研究不同土壤水基质势处理对土壤盐分分布及速生杨等树种生长的影响,从而提出适合当地的生态林构建关键灌溉参数,为该低洼盐渍区生态林构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在宁夏回族自治区吴忠市青铜峡市树新林场西北盐碱地生态恢复关键技术与示范基地(38°1'44" N, 105°56'36" E)进行,海拔 1 140 m。研究区地处西北内陆,东部季风区与西部干旱区域的交汇地带,属中温带大陆性气候,四季分明,昼夜温差大,全年日照时数 2 955 h,年平均气温 8.3~8.6℃,无霜期 176 d,年降水量 260.7 mm,2015 年生长期降水蒸发量见图 1,降水量和蒸发量用筒径 20 cm 雨量筒和蒸发皿测得。

试验区地势低平,地处黄河灌区,地下水埋深在 1.2~1.5 m,盐分聚集明显,地表有盐霜或结皮。0—120 cm 土壤基础理化性质如表 1 所示,土壤饱和泥浆提取液电导率( $EC_e$ )平均为 10.61 dS/m,为重度盐渍

土。土壤主要盐分离子成分为  $Na^+$ 、 $Cl^-$  和  $SO_4^{2-}$  离子,土壤为砂质壤土,容重随深度的增加而增加。

灌渠水为黄河水,其矿化度较低,电导率为 0.86 dS/m,pH 为 7.95,钠吸附比(SAR)为 2.8 (mmol/L)<sup>0.5</sup>。

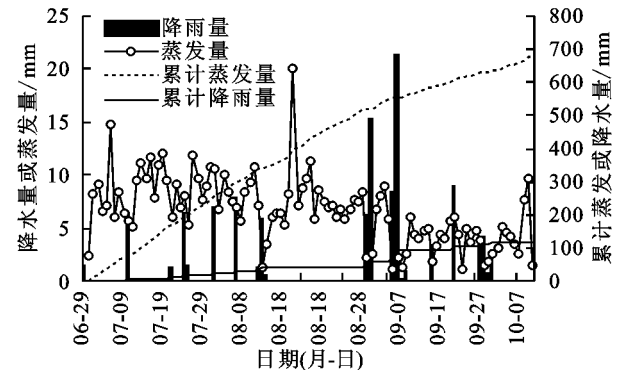


图 1 2015 年生育期内降雨量和蒸发量

表 1 土壤基础理化性质

| 土层深度/cm | 土壤质地 | $EC_e/(dS \cdot m^{-1})$ | pH   | 容重/( $g \cdot cm^{-3}$ ) |
|---------|------|--------------------------|------|--------------------------|
| 0—10    | 砂质壤土 | 10.11                    | 7.55 | 1.36                     |
| 10—20   | 砂质壤土 | 7.91                     | 7.48 | 1.48                     |
| 20—30   | 砂质壤土 | 7.79                     | 7.51 | 1.41                     |
| 30—40   | 砂质壤土 | 6.20                     | 7.47 | 1.57                     |
| 40—60   | 砂质壤土 | 8.06                     | 7.54 | 1.57                     |
| 60—80   | 砂质壤土 | 10.09                    | 7.63 | 1.59                     |
| 80—100  | 砂质壤土 | 13.82                    | 7.81 | 1.59                     |
| 100—120 | 砂质壤土 | 15.67                    | 8.02 | 1.56                     |

1.2 试验设计及布置

试验开始于 2015 年 5 月,设置 5 个土壤水基质势处理,分别为 -5 kPa(S1),-10 kPa(S2),-15 kPa(S3),-20 kPa(S4)和 -25 kPa(S5),每个处理设置 3 个重复,并随机区组设计,共 15 个试验小区。每个小区起 4 条垄,垄长 12 m,垄面宽 2 m,高 0.8 m,垄间距 4 m。起垄后各小区垄面均匀铺设 4 条滴灌带,滴灌带间距 0.6 m,垄沟铺设 1 条滴灌带,滴灌带滴头间距 0.3 m,滴头在 0.1 MPa 压力下出水量 1.38 L/h。垄面种植速生杨并搭配灌木和草,速生杨树龄 2 a,种植在垄中间,种植深度 0.3 m,灌木分别种植紫穗槐、山桃、山杏、金叶榆和丝棉木,种植于垄的两侧并与速生杨交错种植,草本种植沙打旺,如图 2 所示。速生杨株距 3 m,每个小区 16 棵,灌木株距 1.5 m~2 m 不等,沙打旺行播 5 行。在各处理第 2 个重复的速生杨附近的滴头正下方 20 cm 和 50 cm 深处各安装 1 支负压计,当 2 只负压计任一支达到控制阈值即进行灌溉,每次灌水 10 mm(实际灌溉中由于压力不够设计压力,灌水量为 6~7 mm)。5 个处理灌水独立,安装 5 套滴灌系统,包括水表、控制阀、压力表、过滤器、施肥罐等滴灌设备。树木移栽后进行一周的强化淋洗压盐保墒,灌水量为 143 mm,随后进行为期 45 d 的缓苗期,此阶段土壤水基质势统

一控制在  $-10$  kPa, 灌水量为  $186$  mm。缓苗期结束后进行水势处理, 灌水按土壤水基质势控制阈值进行。试验期间共进行 2 次施肥, 分别为处理开始前和处理开始后 1 个月, 施肥量尿素为  $2.4$  g/( $\text{m}^2 \cdot \text{次}$ ), 磷酸二氢钾为  $2$  g/( $\text{m}^2 \cdot \text{次}$ ), 施肥采用水肥一体化, 随滴灌系统一起施肥。

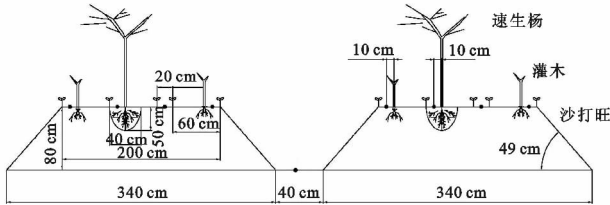


图 2 垄作种植示意

### 1.3 试验观测及方法

在试验前、处理开始前、冬灌前及处理开始后每隔 30~45 d 取土, 取土位置从垄中间开始向垄沟方向取土, 一直取到垄沟底部, 间隔 10 cm, 垂直取土深度为: 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—60, 60—80, 80—100, 100—120 cm, 如图 3 所示。土样室内风干磨碎过 1 mm 筛, 测定土壤  $EC_e$ 。土壤溶液采用饱和泥浆提取法, 电导率用 DDS-11A 电导率测定。每日分别于 8:00 和 15:00 观测负压计读数和气象数据。每月调查灌木和速生杨的成活率, 速生杨株高、株径及冠幅; 速生杨新梢生长速率在生长旺季每 15 d 左右测一次, 每个处理的每个重复随机选定 3 株速生杨进行生长指标跟踪测定, 每个处理共选 9 株。

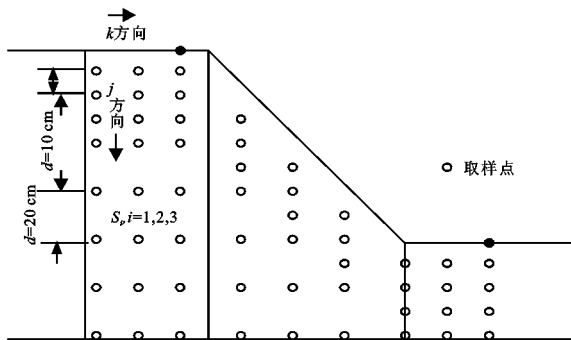


图 3 取样示意

SAR、 $EC_e$  面积加权平均值计算公式:

$$\overline{EC_e} \text{ (or } \overline{SAR}) = \frac{\sum_{i=1}^N (\overline{EC_{ei}} \times S_i) \text{ (or } \sum_{i=1}^N (\overline{SAR_i} \times S_i))}{\sum_{i=1}^N S_i} \quad (1)$$

$$\overline{EC_{ei}} \text{ (or } \overline{SAR_i}) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (EC_{ei,k,j} \times d_{i,j,k}) \text{ (or } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J (SAR_{i,j,k} \times d_{i,j,k}))}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J d_{i,j,k}} \quad (2)$$

式中:  $\overline{EC_e}$  (or  $\overline{SAR}$ ) 为整个剖面  $EC_e$  或 SAR 面积加权平均值;  $\overline{EC_{ei}}$  (或  $\overline{SAR_i}$ ) 为剖面分块面积内  $EC_e$  或 SAR 距离加权平均值;  $S_i$  为分块面积大小;  $N$  为面积

个数。  $EC_{ei,k,j}$  (或  $SAR_{i,j,k}$ ) 为取样点的  $EC_e$  或 SAR;  $d_{i,j,k}$  为取样点控制深度, 图 3 中距离  $d$ ;  $K$  和  $J$  分别为图 3 中每个分块面积内取样点列数及每列的取样点个数。

脱盐灌溉水耗水率计算公式:

$$WCR = \frac{WI}{\Delta \overline{EC_e}} \quad (3)$$

式中: WCR 为单位灌溉水脱盐耗水率 (mm/(dS/m));  $WI$  为期间内总灌水量 (mm);  $\Delta \overline{EC_e}$  为分析区内剖面平均  $EC_e$  变化量 (dS/m)。

主成分分析的模型为<sup>[11]</sup>:

$$P_i = \sum_{j=1}^p u_{ij} Z_j, i=1, 2, \dots, k \quad (4)$$

式中:  $P_i$  为主成分得分;  $u_{ij}$  为系数矩阵;  $Z_j$  为原始因子标准化后变量;  $i$  为主成分编号;  $j$  为变量编号。系数矩阵  $u_{ij}$  由主成分特征值和因子载荷向量计算得到, 计算公式如下:

$$u_{ij} = \frac{PC_{i,j}}{\sqrt{\lambda_i}} \quad (5)$$

式中:  $PC_{i,j}$  转轴后因子载荷矩阵;  $\lambda_i$  为第  $i$  个主成分的特征值。

### 1.4 数据分析

数据分析采用 Surfer 7.0、SPSS 19.0 和 Excel 2016 等软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水基质势与灌水量

2.1.1 土壤水基质势 由图 4 可知, 20 cm 处土壤水基质势基本受控制阈值的影响而上下变动, 其平均值随着控制阈值的增加而增加。在 7 月 24 日之前, 处于缓苗阶段, 各处理同时灌水, 且土壤水基质势控制在  $-10$  kPa, 这一阶段各处理的土壤水基质势基本维持在  $(-10) \sim (-5)$  kPa, 处理间没有差异。处理开始后, 各处理的土壤水基质势逐渐拉开差距, 且呈有规律的锯齿状波动, 基质势控制阈值越低, 土壤水基质势上下波动幅度就越大, 这一规律与其他学者一致<sup>[12]</sup>。由图 4 可以发现, 各处理土壤水基质势在 8 月份不论变动幅度还是变动频率都显著高于 9 月份, 主要原因是 8 月份气温高, 蒸发和蒸腾强烈, 20 cm 处土壤水分变化强烈, 这一现象与 Wang 等<sup>[13-14]</sup>人研究结果一致。对比图 4 和图 5, 50 cm 处的土壤水基质势变动状况明显没有 20 cm 处的活跃, 各处理的土壤水基质势均值虽然也随着控制阈值的增大而增大, 但变动幅度较小, 而且在蒸发强烈的 8 月, 土壤水基质势变动依然保持平稳, 这主要是因为深层土壤水分较稳定, 受地表蒸发和灌水的影响有限。

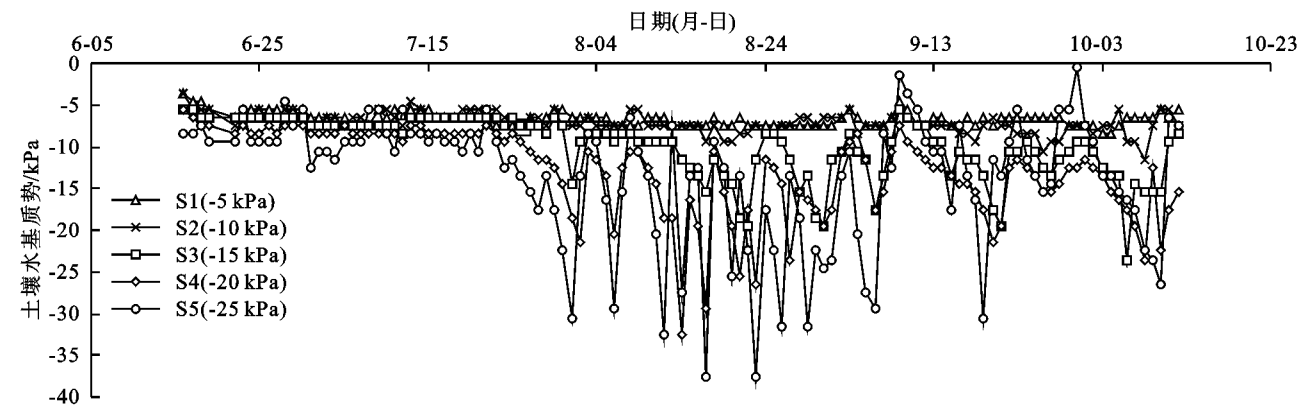


图 4 各处理埋深 20 cm 负压计读数变动

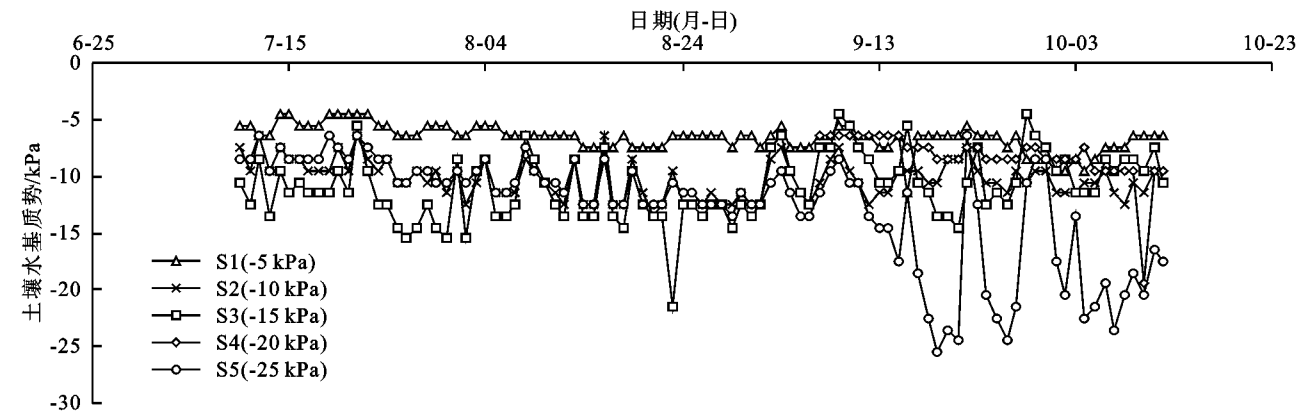


图 5 各处理埋深 50 cm 负压计读数变动

2.1.2 不同处理灌水量 处理开始后,不同处理相应灌水量随对应的基质势阈值的降低而减少,土壤水基质势控制阈值与灌水总量之间呈极显著的指数函数关系。土壤含水量与土壤水基质势的关系可以用土壤水分特征曲线来描述,国内外很多学者进行了土壤特征曲线测定的研究试验,得出的结果基本相同。当土壤含水率小于饱和含水率时,随着土壤含水率的减小,土壤水基质势呈现指数减小的趋势(土壤吸力则类似指数增加)<sup>[15-16]</sup>。土壤基质势阈值较高时,对应的土壤含水率较高,此时要维持较高土壤含水率就需要更多的灌溉水,随着土壤基质势控制阈值的降低,对应的土壤含水率也降低。由土壤水分特征曲线可知,土壤含水率类似指数模式降低,加上土壤脱水过程的滞后效应,使得基质势阈值控制越低,需要的水量越低,因此,灌水量与土壤基质势控制阈值呈指数关系。需要指出的是,试验第 1 年,地表植被覆盖较少,速生杨形成的冠层较小,受植被蒸腾影响较小,若地表植被茂密,蒸腾作用加强,则处理间灌水量差异可能会减小。

2.2 土壤盐分

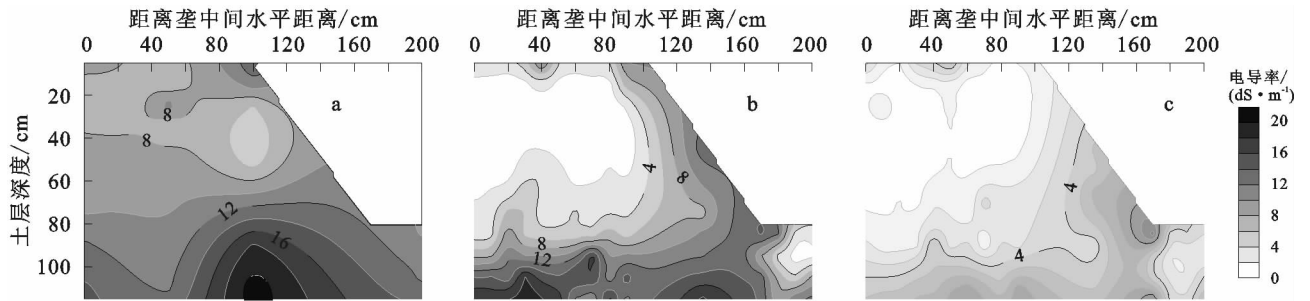
2.2.1 强化淋洗阶段盐分分布 处理开始前各时间段的盐分分布状况见图 6。试验开始前,背景盐分分布如图 6a 所示,剖面饱和泥浆提取液电导率( $EC_e$ )基本在 8 dS/m 以上,剖面  $EC_e$  面积加权平均值为 10.61 dS/m,

经过 1 周的强化淋洗和一周的缓苗期后,盐分分布情况如图 6b。 $EC_e<4$  dS/m 的等值线已经推移到 60 cm 深度,两条滴灌带形成的低盐区均呈椭圆状,且沿滴灌带间距中心呈几何对称,盐分等值线图与垄坡平行分布,从低盐区往外,盐分逐渐增加,底部和垄坡底盐分变化不明显,垄沟受铺设的滴灌带影响,也形成了低盐区。此阶段垄体盐分平均值(面积加权)为 7.55 dS/m,较本底值降低 3.06 dS/m,单位脱盐灌溉水耗水率为 46.7 mm/(dS/m)。图 6c 为试验处理前土壤盐分分布情况,经过 40 d 左右的缓苗期,盐分继续降低, $EC_e<4$  dS/m 的等值线已经推移到 90 cm 深度,整体盐分降低显著,垄坡和垄底都有较大程度的降低,垄体盐分平均值(面积加权)为 3.09 dS/m,较前一时段降低 4.46 dS/m,此阶段单位脱盐灌溉水耗水率为 41.7 mm/(dS/m)。整体来看,从试验开始到处理开始前,盐分淋洗效果显著,相对于本底值,盐分平均降低 70.87%。

2.2.2 基质势处理后盐分动态分布 由水势处理开始后 45 d 盐分分布(图 7)可以看出,相对于处理开始前(图 6c),各处理盐分变化不大,低盐区( $EC_e<4$  dS/m)基本保持在 100 cm 左右的深度,各处理间盐分差异不明显。处理末期(图 8)各处理盐分有较大差异,S1 和 S2 两处理垄体盐分继续淋洗,整个垄体  $EC_e<4$  dS/m,实现了垄沟和垄体的整体脱盐,垄体平均  $EC_e$  分别为 1.93 dS/m 和 2.27 dS/m,相

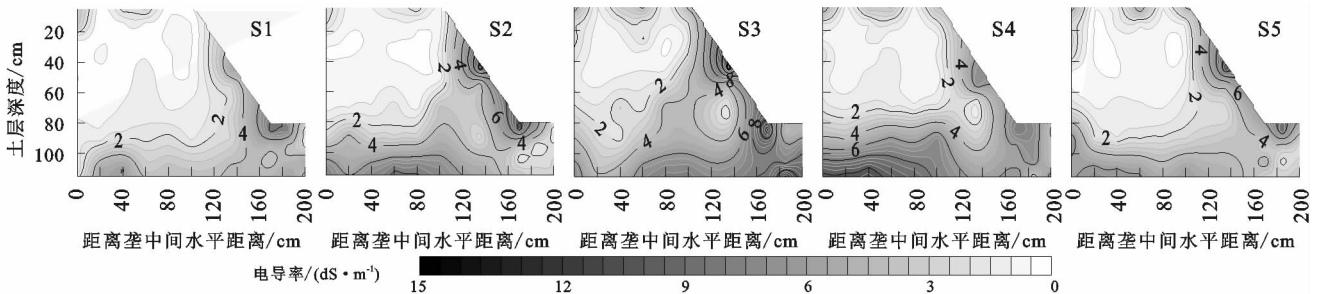
对处理前的 3.09 dS/m 分别降低 37.5% 和 26.5%，相对初始值分别降低 81.8% 和 78.6%；S3 处理盐分较处理开始前变化不大， $EC_e < 4$  dS/m 的等值线维持在 90 cm 深度，剖面  $EC_e$  平均值为 3.01 dS/m，与处理前相比几乎持平；S4 处理在坡低有盐分累积现

象，剖面  $EC_e$  平均值为 3.70 dS/m，较处理前增加 19.7%，盐分小幅度增加；S5 处理盐分变化不明显， $EC_e$  平均值为 2.54 dS/m，有小幅降低。总的来看，随着水势控制阈值的降低，剖面  $EC_e$  平均值有增加的趋势，但增加趋势有限。



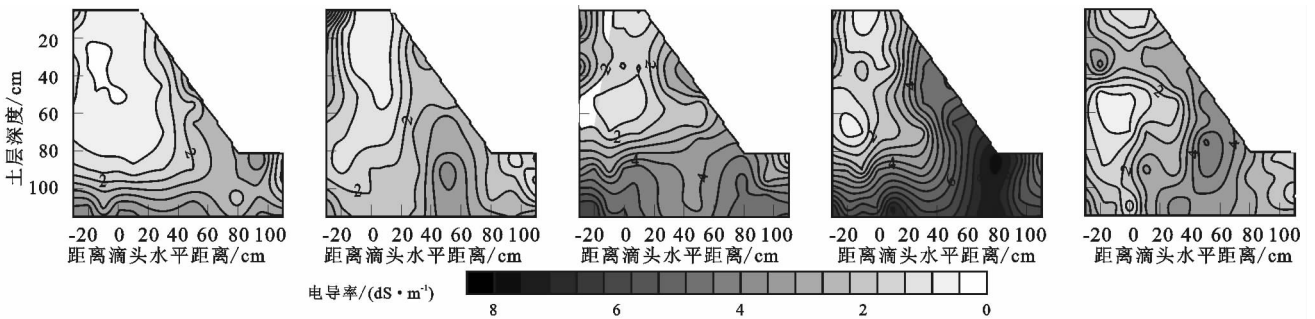
注：a、b、c 分别为试验区背景（5 月 27 日）、强化淋洗后（6 月 12 日）、处理开始前（7 月 22 日）土壤剖面盐分分布。

图 6 土壤剖面盐分分布



注：取样点从垄中间开始取样，其中包含 2 条滴灌带，水平 0 点为垄中间位置

图 7 处理开始后 45 d (9 月 8 日) 各处理盐分分布



注：垄面取样只取了单条滴灌带影响区域，水平 0 点为滴头。

图 8 生长季末期 (10 月 25 日) 盐分分布

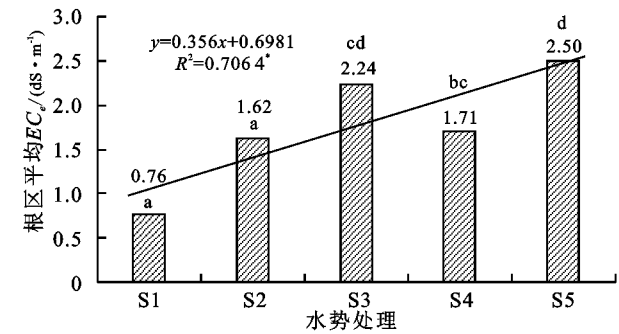
剖面平均电导率值反映了盐分淋洗的整体效果，但不能反映植物根区的盐分变化情况，为了能更客观准确的评价盐分对作物的影响，需对植物根区盐分进行分析。大量研究表明，滴灌条件下树木根系深度比常规灌溉条件下浅，且大部分集中分布在 0—50 cm 的深度<sup>[17-19]</sup>。本试验速生杨种植深度为 30 cm，故根区定为滴头附近水平距离 40 cm，垂直深度 40 cm 的立方体区域。取根区内土样的  $EC_e$  值和 SAR 值的平均值，各处理平均值见图 9，各处理根区  $EC_e$  值均维持在较低水平，最小值为 0.76 dS/m，出现在 S1 处理，最大值为 2.5 dS/m，出现在 S5 处理，S1 到 S5 各处理  $EC_e$  值较初始值分别降低：90.5%，79.75%，72.01%，78.63% 及 68.76%。总体来看随着基质势

控制阈值的降低，根区  $EC_e$  有线性增加趋势， $R^2 = 0.7064$ ，回归关系显著，并且各处理  $EC_e$  均值有显著差异性 ( $P < 0.05$ )。各处理根区 SAR 值与  $EC_e$  值变化规律类似，其中最小值为  $5.46 (\text{mmol/L})^{0.5}$ ，出现在 S1 处理，最大值为  $12.74 (\text{mmol/L})^{0.5}$ ，出现在 S5 处理，S1 到 S5 各处理 SAR 值较初始值分别降低：74.21%，65.94%，51.2%，57.25%，39.82%。随着基质势控制阈值的降低，根区 SAR 有线性增加趋势， $R^2 = 0.85$ ，回归关系显著，并且各处理 SAR 均值有显著差异性 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 速生杨生长量主成分分析

2.3.1 速生杨生长因子间相关性 到生长季结束，各处理速生杨成活率均在 90.9% 以上，生长状况良

好。为充分展现各处理生长的差异性,以最后一次测定结果进行生长量分析。由表 2 可知,速生杨的冠



幅、株径、胸径、树高及新稍生长量 5 项指标具有较强的相关性,适合进行主成分降维。

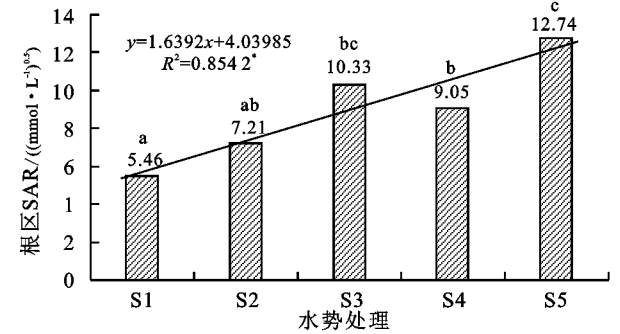


图 9 生长季末期 0—40 cm 平均  $EC_e$ (A)和 SAR(B)分布

表 2 各生长因子相关关系

| 生长指标 | 树高增量   | 冠幅增量   | 株径增量   | 胸径增量   |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 冠幅增量 | 0.76** |        |        |        |
| 株径增量 | 0.57** | 0.70** |        |        |
| 胸径增量 | 0.58** | 0.61** | 0.76** |        |
| 枝长增量 | 0.83** | 0.91** | 0.67** | 0.60** |

注: \*\* 相关性在 0.01 水平上显著(双尾检验)。

2.3.2 速生杨生长量主成分分析 经 KMO 检验(Kaiser-Meyer-Olkin Measure)和 Bartlett 球度检验(Bartlett's Test of Sphericity)得知,KMO 值为 0.803,Bartlett 值为 170.797,球度检验的相伴概率为 0.000,小于显著性水平 0.05,表明本研究的数据适合做因子分析<sup>[20]</sup>。在求算主成分因子时,采用方差最大正交旋转法进行转轴,通过此方法可使得每个因子的最高载荷的变量数最少,每个因子独立性较强,使因子载荷易于解释<sup>[20]</sup>。以特征值大于 1 的原则确定主成分个数,计算选择出来特征值的标准正交特征向量,得出各因子的因子载荷和因子得分系数。

由表 3 可知,按照特征值大于 1 的原则,提取第一因子作为主因子,此时,方差贡献率为 76.16%,累计贡献率为 76.16%。通过因子降维,原来的 5 个生长指标可以高度概化为一个主成分 PC。主成分因子载荷是主成分因子与原始因子的相关关系<sup>[20]</sup>。

由表 4 可知,提取出来的主成分与原始 5 个因子的相关关系如表 4 中转轴后的因子载荷向量所示,分别为:0.86,0.92,0.85,0.81,0.93,因而,主成分可以有有效的替换原始 5 个生长量作为一个评价生长的综合因子。实际上,以上步骤为因子分析的部分,主成分分析则可以借助因子分析结果进行下一步分析。

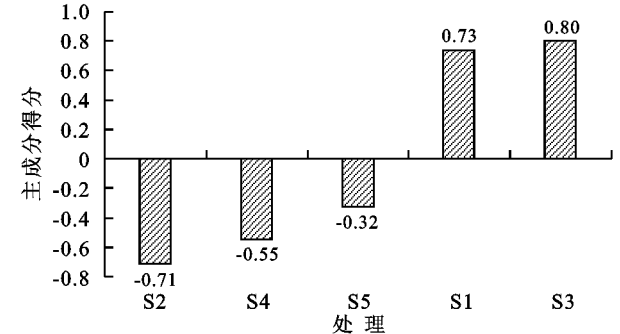
表 3 转轴后的因子载荷平方和

| 成分 | 初始特征值 |         |         |
|----|-------|---------|---------|
|    | 特征值   | 方差贡献率/% | 累计贡献率/% |
| 1  | 3.808 | 76.161  | 76.161  |
| 2  | 0.632 | 12.644  | 88.805  |
| 3  | 0.299 | 5.984   | 94.789  |
| 4  | 0.179 | 3.579   | 98.368  |
| 5  | 0.082 | 1.632   | 100.000 |

表 4 主成分因子的载荷向量和得分系数矩阵

| 原始因子 |    | 转轴后的因子 | 因子得分 |
|------|----|--------|------|
| 项目   | 编号 | 载荷向量   | 系数向量 |
| 树高增量 | X1 | 0.86   | 0.44 |
| 冠幅增量 | X2 | 0.92   | 0.47 |
| 株径增量 | X3 | 0.85   | 0.43 |
| 胸径增量 | X4 | 0.81   | 0.41 |
| 枝长增量 | X5 | 0.93   | 0.48 |

由图 10 可知,S1 和 S3 两个处理的主成分得分值最高,结合图 7 中各处理盐分淋洗状况以及生长状况综合分析,此地区速生杨生态林构建过程中,土壤水基质势为-15 kPa 可作为灌溉指导阈值。图 10 中显示灌水量位于 S1 和 S3 两个处理之间的 S2 处理,其得分位于平均值以下,这种突变情况可能与采样偏差及空间变异有关。



注:主成分因子得分为负值说明在平均值以下,正值在平均值以上。

图 10 不同处理主成分得分

### 3 讨论

主成分分析(Principal component analysis, PCA)方法是一种将多个指标化为少数几个综合指标(即主成分)的统计分析方法,提取的主成分都是原始变量的线性组合,各主成分间互不相关,是一种有效的降维技术,也是一种综合评价方法<sup>[21]</sup>。主成分分析方法已较多的用于土壤盐渍化程度、类型、盐渍土的分布及发展方向的研究,但主成分法用于评价多种

相关的作物生长指标较少。本研究调查了速生杨的冠幅、株径、胸径、树高及新梢生长量 5 个指标,用主成分分析法能够更直观、更全面的进行生长状况的评价。通过对速生杨生长指标的主成分分析可知,得分最高的处理为 $-5\text{ kPa}$ 和 $-15\text{ kPa}$  2 个处理,其余处理得分均在平均分以下,其中, $-10\text{ kPa}$  处理得分在均值以下可能是由于采样偏差及空间变异造成的。因此使得速生杨生长与土壤水基质势控制阈值的相关规律不显著,若抛开 $-10\text{ kPa}$  处理的变异因素的影响, $-10\text{ kPa}$  处理的速生杨生长得分应该在平均值以上,从而确定 $(-15)\sim(-5)\text{ kPa}$  的最佳土壤水基质势控制阈值。结合各处理盐分淋洗状况以及速生杨生长状况,并本着节水的原则,在该地区低洼盐渍区通过“高垄+滴灌+乔灌木结合”的方式种植速生杨,可以将滴头正下方  $20\text{ cm}$  和  $50\text{ cm}$  的土壤基质势下限控制在 $-15\text{ kPa}$  作为灌溉指导。

王若水等<sup>[14]</sup>在新疆克拉玛依开展滴灌覆膜新疆杨造林试验,试验结果表明,土壤基质势下限为 $-5\text{ kPa}$ 与 $-10\text{ kPa}$ 时灌水量较大,盐分淋洗效果较好,根系周围的土体中的平均含盐量比移栽前减少了 79%,而土壤基质势下限控制在 $-25\text{ kPa}$  的处理由于灌水量较小,盐分随土壤深度增加的幅度较大,当土壤深度达到  $40\text{ cm}$  时土壤盐分出现大幅度的增加。Li 等<sup>[4]</sup>在滨海盐碱地开展了 3 年咸水滴灌景观造林试验研究,结果表明试验第 1 年土壤水基质势控制阈值保持在 $-10\text{ kPa}$  以上时可以保证大部分植被成活率在 90% 以上,而第 2 年水盐调控阶段控制阈值可保持在 $-35\text{ kPa}$  以上,第 3 年借助雨养可以控制土壤水基质势在 $-40\text{ kPa}$ 。

与新疆克拉玛依相比,虽然宁夏吴忠青铜峡地理位置和地理环境差异很大,但是同属干旱一半干旱地区,同样有大面积的次生盐渍土。而通过不同种类杨树的造林试验结果对比可以看出,两试验结果基本类似, $-5\text{ kPa}$  和 $-10\text{ kPa}$  土壤水基质势阈值可以持续淋洗盐分,而土壤水基质势小于 $-20\text{ kPa}$  时会造成盐分淋洗不明显,甚至会积盐。滨海盐碱地造林与以上两试验有很大不同,滨海地区降雨在  $600\text{ mm}$  以上,而且潜在蒸发远小于干旱一半干旱地区,因此土壤水基质势控制阈值可以设置的更低,甚至可以借助雨养灌溉。这说明,在造林活动中,灌溉制度的制定要充分考虑气候区和地理位置,东部多雨盐碱地区可以设置较低的土壤水控制阈值指导灌溉,而西北干旱一半干旱盐渍区应当保持土壤水基质势在 $-15\text{ kPa}$  以上。

## 4 结论

(1)统一灌溉结束后, $0\sim100\text{ cm}$  深度内电导率基本保持在  $4\text{ dS/m}$ ,剖面平均盐分较初始值减少 70.87%,

单位脱盐(以土壤剖面平均  $EC_e$  计)灌溉水耗水率为  $41.7\text{ mm}/(\text{dS/m})$ ,低耐盐植物生长状况良好。

(2)土壤水基质势控制试验结束后,各处理  $0\sim40\text{ cm}$  根区范围内土壤  $EC_e$  值和 SAR 值有显著差异,且均随土壤基质势控制阈值的降低而线性增加,根区土壤盐分运移明显受水分运动的影响。

(3)土壤水基质势能够很好地控制土壤水分运移的方向(垂直方向上),从而影响到盐分集散状态。通过本研究可知,到生育期末期,各处理盐分相对于处理前盐分有不同的响应, $S1(-5\text{ kPa})$ 、 $S2(-10\text{ kPa})$  处理盐分呈继续淋洗状态,而  $S3(-15\text{ kPa})$  处理较处理前持平, $S4(-20\text{ kPa})$  和  $S5(-25\text{ kPa})$  2 个处理则呈盐分增加的趋势,说明 $-15\text{ kPa}$  可以作为该地区植被构建的关键灌溉参数。

## 参考文献:

- [1] 李小龙. 青铜峡灌区水盐动态研究[D]. 西安:西安理工大学,2003.
- [2] Franco D, Franco D, Mannino I, et al. The impact of agroforestry networks on scenic beauty estimation: The role of a landscape ecological network on a socio-cultural process[J]. Landscape & Urban Planning, 2003, 62(3): 119-138.
- [3] 汪泽鹏. 宁夏森林资源趋势变化分析与评价[J]. 林业资源管理, 2010(4): 17-21.
- [4] Li X B, Kang Y H, Wan S Q, et al. First and second-year assessments of the rapid reconstruction and re-vegetation method for reclaiming two saline-sodic, coastal soils with drip-irrigation[J]. Ecological Engineering, 2015, 84(11): 496-505.
- [5] Sun J, Kang Y, Wan S. Effects of an imbedded gravel - sand layer on reclamation of coastal saline soils under drip irrigation and on plant growth[J]. Agricultural Water Management, 2013, 123(9): 12-19.
- [6] 殷小琳. 滨海盐碱地改良及造林技术研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.
- [7] 张建锋, 张旭东, 周金星, 等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 28-30.
- [8] 康跃虎, 万书勤, 蒋树芳. 盐碱地农业与植被建设[J]. 高科技与产业化, 2012, 8(4): 66-71.
- [9] 康跃虎. 实用型滴灌灌溉计划制定方法[J]. 节水灌溉, 2004(3): 11-12.
- [10] Wan S, Kang Y, Wang D, et al. Effect of drip irrigation with saline water on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) yield and water use in semi-humid area[J]. Agricultural Water Management, 2007, 90(1/2): 63-74.
- [11] 郭显光. 如何用 SPSS 软件进行主成分分析[J]. 统计与信息论坛, 1998(2): 61-65.
- [12] 焦艳平, 康跃虎, 万书勤, 等. 干旱区盐碱地覆膜滴灌条件下土壤基质势对糯玉米生长和灌溉水利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 144-151.