

DOI: 10.5846/stxb201809051893

乔雪涛, 何俊, 范秀华, 孙兆军. 引黄灌区次生盐碱地速生杨光谱与光合特性对不同秸秆层的响应. 生态学报, 2019, 39(15): 5573-5583.

Qiao X T, He J, Fan X H, Sun Z J. Response of spectral reflectance and photosynthetic characteristics of fast-growing poplar (*Populus*) to different straw layers in secondary saline-alkali land in the Yellow River irrigation area. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5573-5583.

# 引黄灌区次生盐碱地速生杨光谱与光合特性对不同秸秆层的响应

乔雪涛<sup>1</sup>, 何俊<sup>2</sup>, 范秀华<sup>1</sup>, 孙兆军<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> 北京林业大学理学院, 北京 100083

<sup>2</sup> 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 银川 750021

**摘要:** 在宁夏引黄灌区次生盐碱地, 设置了埋埋秸秆层(B)、覆盖秸秆层(M)、埋埋配合覆盖秸秆层(B+M)和无任何处理(空白对照, CK)共 4 种处理, 通过随机区组试验, 在土壤水盐变化的基础上, 通过分析速生杨光谱及光合特性对秸秆层响应, 探究不同秸秆层的植物光合速率、色素含量、营养状况以及受胁迫等情况, 以期更准确的反应出各处理的改良效果及植被恢复情况。研究结果表明: (1) 秸秆层有助于提升灌区次生盐碱地速生杨的光谱与光合等生理状况。B、M 和 B+M 均能显著提升速生杨叶片的最大净光合速率与饱和光强, 其中, B 和 B+M 还能够明显降低速生杨叶片的光补偿点和暗呼吸速率, M 则不能。B 和 B+M 均显著提高速生杨叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合参数。另外, B+M 的速生杨叶片光合色素含量最高, 营养状况最好, 其他光谱参数结果与 CK 相比都有显著提高。处理 B 和 M 也可以显著提高速生杨叶片光合色素含量和营养状况, 但效果均不如 B+M。(2) B 与 B+M 均能降低不同时期的土壤盐分含量, 但 B+M 在不同时期提高土壤含水量的效果均高于 B。M 也能降低土壤盐分和提升土壤含水量, 但不同时期的效果均不如处理 B+M。综合试验结果, 在引黄灌区次生盐碱地, 不同秸秆层均能不同程度的调节土壤水盐变化, 缓解水盐胁迫, 提升速生杨光合与光谱特性, 其中 B+M 作为秸秆层效果最佳。

**关键词:** 次生盐碱地; 秸秆层; 光谱; 光合; 速生杨

## Response of spectral reflectance and photosynthetic characteristics of fast-growing poplar (*Populus*) to different straw layers in secondary saline-alkali land in the Yellow River irrigation area

QIAO Xuetao<sup>1</sup>, HE Jun<sup>2</sup>, FAN Xiuhua<sup>1</sup>, SUN Zhaojun<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

<sup>2</sup> Development Center of New Technique Application and Research, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** Soil secondary salinization an escalating problem worldwide, especially in arid and semi-arid regions. Plants growing in salt-affected soils may suffer from physiological drought stress, ion toxicity, and mineral deficiency that lead to reduced growth and biomass. At present, in the study of secondary salinization soil amelioration, more attention is focused on the influence of soil salt ions, and soil physical and chemical properties than on the evaluation of amelioration and vegetation restoration. However, this assessment does not simultaneously consider the effects on the growth and physiological conditions of vegetation. Utilization of the straw layer in soil is a widely used and effective measure for soil salinity control. To study the response of the spectral reflectance and photosynthetic characteristics of fast-growing poplar (*Populus*) to

**基金项目:** “宁夏(中阿)旱区资源评价与环境调控重点实验室”建设项目与宁夏科技支撑项目“银川国家农业园区盐渍化改良技术的研究与示范”

收稿日期: 2018-09-05; 网络出版日期: 2019-05-16

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunzhaojunyx@126.com

different straw interlayers, a field experiment was conducted in the typical secondary salinized land of the northwestern salinized and ecologically fragile area of Ningxia. The experiment was established with four treatments: straw interlayer (B), straw mulching (M), straw interlayer plus straw mulching (B+M), and no addition of straw interlayer (CK). All treatments were arranged in a randomized complete block design with four blocks. Based on the change of soil salt and water in the background, the response of the straw layer was studied by analyzing the spectrum and photosynthetic characteristics of the fast-growing poplar. The photosynthetic rate, pigment content, nutritional status, and stress of the above-ground plants under different straw layer conditions were measured to more accurately reflect the effect of each treatment on saline soil improvement and above-ground vegetation restoration. It is of great significance to further study the physiological indexes, such as reflectance spectra and photosynthetic characteristics of plants. The results showed that: (1) different straw layers had different effects on water and salt regulation, resulting in different soil conditions among different treatments, which caused changes in pigment content, nutritional status, and physiological and biochemical conditions of the plants; (2) by detecting the plant reflection spectrum and photosynthetic characteristics, changes in plant growth and physiological conditions could be reflected. Based on this, we could use the reflectance spectrum and photosynthetic characteristics of fast-growing poplar to respond to different straw layers and more accurately assess improvement measures. The maximum net photosynthetic rate and saturation light intensity of B, M, and B+M treatment were significantly increased, and the B and B+M treatment light compensation points and dark respiration rates were significantly reduced. B and B+M treatment significantly increased the leaf photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $Tr$ ), stomata conductance ( $G_s$ ), and intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ). The spectral reflectance of plant leaves, chlorophyll content of the B+M treatment was highest, and photosynthetic and nutrition performed best. Compared with that of the control group, other spectral reflectance indices significantly improved. The B and M treatments also significantly improved chlorophyll content and photosynthetic characteristics, but were less effective than B+M; (3) the experimental study showed that the reflectance spectrum and photosynthetic characteristics of fast-growing poplar responded differently to different straw layers. The straw layer helped to improve the physiological condition of fast-growing poplar. Based on the results of comprehensive reflection spectrum and photosynthetic characteristics, B+M was the most suitable straw layer model for the improvement of secondary saline-alkaline land in the Northwest Yellow River irrigation area.

**Key Words:** secondary saline-alkali land; straw layer; spectral reflectance; photosynthetic characteristics; fast-growing poplar (*Populus*)

次生盐碱化是指由于不合理的人为措施的干扰与破坏,所引发土壤发生盐碱化的过程,易发生于具有潜在盐碱化因素如气候条件干旱、降水稀少、地下水位较高的地区<sup>[1]</sup>。大量研究表明,过度开垦使得多年生深根系的本土植物被一年生浅根植物(农作物)所替换,以及长期不合理灌溉,引起地下潜水上升,导致深层的盐分随潜水不断上升并累积到地表,是引发灌区土地次生盐碱化的主要原因<sup>[2]</sup>。统计表明,我国西北地区盐碱化土地面积达  $2216 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 约占全国盐碱地总面积的 60%, 其中由于灌溉方式不当而引发的次生盐碱地面积约  $140 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占全国次生盐碱化土地总面积的 70%, 已严重影响了当地农业的可持续发展与生态环境的恢复, 因此, 引黄灌区次生盐碱地的防治与植被恢复是当前迫切需要解决的问题<sup>[3-4]</sup>。

国内外许多研究者针对次生盐碱地区存在的科学难题进行了深入研究,发现通过恢复和栽种优势深根植物,能够增加土壤有机质,改善土壤结构与环境,降低地下水位,调节区域小气候,有助于将水文功能恢复到原始状态,恢复植被的同时达到控盐改土的目的<sup>[2,5-7]</sup>。但次生盐碱地土壤盐分高,水分有效性差,直接栽植会由于盐胁迫与干旱胁迫导致林木生长状况差,造林的成活率低,植被恢复困难<sup>[7]</sup>。以往的研究表明在地表覆盖秸秆能减少土表水分蒸发,改善土壤水热状况,活化土壤养分,抑制盐分表聚;在地下铺设秸秆层能够打破长时间浅耕形成的坚固犁底层,阻断土壤毛细管的连续性,降低潜水蒸发,阻隔盐分上行,防止根层盐化<sup>[6-7]</sup>。

但这些研究大多只注重秸秆层对盐碱土壤的水盐变化、改良利用及其对环境的危害等方面,而对地上植物的生长、生理和受胁迫等植被恢复状况研究较少。

植物光合作用与植物的生长环境具有密切的相关性,如适宜的环境会促进植物原有的光合潜能发挥,通过研究植物光合特性能够有效反映出植物对生长环境的适应机制<sup>[8-12]</sup>。同时,植物在不同的环境条件以及不同的生长发育阶段,其体内色素含量、营养状态以及生理生化状况会发生不同的变化,从而导致植物反射光谱发生变化<sup>[8-9]</sup>。利用光谱与光合特性反映植被体内光合色素、生长状态以及受胁迫等情况<sup>[11-14]</sup>。因此本研究以西北灌区典型的次生盐碱地为例,在土壤水盐变化的基础上,通过分析不同措施下植物光谱及光合特性变化,研究速生杨反射光谱及光合生理特性对不同秸秆层的响应。探究不同秸秆层的地上速生杨光合速率、色素含量、营养状况以及受胁迫等情况,对进一步研究利用植物的反射光谱及光合特性等生理指标评估各类盐碱地改良措施的生态效益具有重要意义,以期为引黄灌区次生盐碱地的土壤改良与植被恢复提供理论指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地概况

试验地选在宁夏北部银川平原的青铜峡灌区(38°01'N, 105°57'E),是引黄灌区次生盐碱地主要分布区。处于我国西北内陆干旱与半干旱地区,属中温带大陆性气候。四季分明,昼夜温差较大,年平均气温 8.3—8.6℃。全年日照时数 2955 h,无霜期 176 d。气候条件干燥,降水极少,年均降水量仅为 193—203 mm。试验地为典型引黄灌区次生盐碱地,在试验开始前为弃耕的裸荒地,土地表层盐分表聚明显,地表有盐霜和结皮,属重度盐碱地。在裸荒前种植过玉米(*Zea mays*)、枸杞(*Lycium chinense*)。试验地 0—80 cm 土层土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 试验地土壤基本理化性质  
Table 1 Soil basic physical and chemical properties of the study field

土壤质地 Soil texture	容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	电导率 Electrical conductivity/ (dS/m)	pH	钠吸附比 Sodium adsorption ratio/ (mmol/L) <sup>0.5</sup>	田间持水量 Field capacity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	土壤养分 Soil nutrient/(g/kg)			
							有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	有效磷 Available phosphorus	有效钾 Available potassium
砂质壤土 Sandy loam	1.52	17.9	7.2	15.5	21.3	28.1	3.43	0.31	7.36×10 <sup>-3</sup>	5.53×10 <sup>-2</sup>

### 1.2 试验材料与设计

速生杨是西北干旱与半干旱地区农田防护林和防风固沙林的主要树种,生长迅速,生物量大,易繁殖,根系发达,生长季吸收养分能力强,蒸腾作用高,适应能力强,在森林生态系统中占主导地位<sup>[15-16]</sup>。2016 年 4 月,本试验选取树龄为 2 年的速生杨带根苗作为试验树种,截干栽植,截干高度 2.46—2.89 m。试验设无任何处理为对照(空白对照,CK)、填埋秸秆层(B)、覆盖秸秆层(M)和填埋配合覆盖秸秆层(B+M),4 种处理。选取干燥的玉米秸秆,切碎为 10 cm 左右作秸秆层材料。根据前人对有关秸秆层的研究,结合本试验速生杨根系深度、秸秆厚度以及当地地下水深度,将填埋深度设为距离地表 80 cm 处,覆盖量和填埋量都设为 7000 kg/hm<sup>2</sup><sup>[6-7]</sup>。在地表覆盖秸秆后,其表面铺设 5 cm 土,起到固定秸秆的作用。把试验地规划分为 4 个区组,每个区组规划分为 3 个小区,把 4 种处理随机分配到 4 个区组,每个小区 1 个处理,每个处理 3 次重复。相邻区组之间的间隔为 6 m;每个小区规格为 9 m×9 m,相邻小区之间的间隔为 3 m。每小区栽植 9 棵,株间行距 3 m×3 m,栽植穴的规格 1 m×1 m×1 m。采用定额灌溉的方式,考虑当地的气候因素、灌溉周期与农耕实际情况,将灌溉额度定为 200 mm,在 4 月至 10 月进行灌溉,每 30 天灌溉一次<sup>[17]</sup>。

### 1.3 试验测定内容及方法

#### 1.3.1 光谱参数

本试验利用 Unispec-SC 光谱仪(PPSYSTEM, USA)测量叶片反射光谱,其波长测定范围 310—1130 nm,扫

描波长间隔 3.3 nm, 卤光灯的光强 100%, 整合时间 4 ms, 重复扫描次数为 3 次。为确保叶片采集的可靠性和普遍性, 选取有代表性顶部向阳处的成熟叶片, 每个小区随机选 3 棵速生杨, 每个处理共选 9 棵, 每棵采集 3 片叶片, 每片叶测 3 点不同位置。利用 Multispec 5.1 软件对光谱仪测量数据进行处理, 得到光谱反射率  $R_\lambda$ , 其中  $R_\lambda$  表示叶片反射与参比反射的比值,  $\lambda$  为波长。本研究选用了已被广泛证实较能反应叶片特征结构以及适合无损光学检测的光谱指数及公式(表 2)。

表 2 本研究中所用的反射光谱指数

Table 2 The spectral reflectance indices used in this study

类型 Description	反射光谱指数 Spectral reflectance indices	缩写与公式 Acronym and Formulation	文献来源 References
归一化差值指数 Normalized difference indices	叶绿素归一化指数	$\text{ChlNDVI} = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705})}$	[18]
	改良红边归一化植被指数	$m\text{ND}_{705} = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})}$	[19]
简单比率指数 Simple ratio indices	改良归一化差值指数	$m\text{SR}_{705} = \frac{(R_{750} - R_{445})}{(R_{705} - R_{445})}$	[19]
其他 Others	结构不敏感色素指数	$\text{SIPI} = \frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} - R_{680})}$	[20]
	植物衰老反射指数	$\text{PSRI} = \frac{(R_{680} - R_{500})}{R_{750}}$	[21]
	生理反射指数	$\text{PRI} = \frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})}$	[22]

Chl NDVI: 叶绿素归一化指数, Chl normalized difference index;  $m\text{ND}_{705}$ : 改良红边归一化植被指数, Modified red edge normalized difference vegetation index;  $m\text{SR}_{705}$ : 改良归一化差值指数, Modified red edge ratio; SIPI: 结构不敏感色素指数, Structure-insensitive pigment index; PSRI: 植物衰老反射指数, Plant senescence reflectance index; PRI: 生理反射指数, Physiological reflectance index

利用光谱归一化微分分析, 将反射光谱的数据进行一阶微分处理, 具体计算公式为:

$$R'_{(\lambda_i)} = (R_{(\lambda_i)} - R_{(\lambda_{i-1})}) / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})$$

式中,  $\lambda_i$  是波段  $i$  的波长值,  $R_{(\lambda_i)}$  是  $\lambda_i$  的光谱反射率值,  $R'_{(\lambda_i)}$  是第  $i$  波段的一阶微分数值。并在 680—750 nm 范围内确定红边位置<sup>[14,23]</sup>。

### 1.3.2 光合参数

本试验利用 LI-6400 光合作用分析仪 (Li-cor, USA), 选择天气晴朗的时期测定速生杨的光合特性。测定速生杨叶片的净光合速率 ( $P_n$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、气孔导度 ( $G_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol/mol}$ ) 和叶片水分利用效率 (LWUE,  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$ ) 等光合指标, 同时记录环境  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_a$ ,  $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol}$ )、光合有效辐射 (PAR,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 等环境因子。

利用非直角双曲线模型对光响应过程模型拟合分析, 模型的具体表达式为:

$$P_n = (\text{PAR} + P_{n_{\max}} - \sqrt{(\text{PAR} + P_{n_{\max}})^2 - 4\text{PAR}k P_{n_{\max}}}) / 2k - R_d$$

式中,  $P_n$  为净光合速率, 为表观量子效率 ( $\text{mol/mol}$ );  $\text{PAR}$  为光合有效辐射 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $P_{n_{\max}}$  为最大净光合速率 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $R_d$  为暗呼吸速率 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )<sup>[24-25]</sup>。

### 1.3.3 土壤参数

用管式不锈钢土钻采集土壤样品。土壤含水量的测定采用烘干法。土壤含盐量是采集的土壤经过风干后去杂质, 磨碎并过 2 mm 筛。以土水比 1:5 提取土壤溶液上清液, 用 MP-522 电导仪测电导率, 土壤含盐量如下计算公式<sup>[26]</sup>:

$$S_i = EC_{1:5} \times 0.064 \times 5 \times 10/1000$$

式中,  $S_i$  表示第  $i$  土层含盐量 ( $\text{g/kg}$ );  $EC_{1:5}$  为土水比 1:5 的土壤浸提液电导率 ( $\text{dS/m}$ )。

## 1.4 数据分析

试验数据采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著极差法 (LSD), 在 0.05 水平上检验不同处

理测定结果的差异显著性,利用 Origin 9.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 光谱特征对秸秆层的响应

#### 2.1.1 反射光谱特征

图 1 所示,不同秸秆层的速生杨反射光谱曲线的整体趋势表现出一定的规律。可见光(400—760 nm)范围,由于叶绿素对于绿色光反射作用极强,而吸收蓝光与红光进行光合作用,因此在绿光(550 nm)处有一小的反射峰,蓝光(450 nm)和红光(670 nm)处有两个吸收谷。在 700—800 nm 存在反射的陡坡,在 1100 nm 附近出现峰值。这是由于叶片内海绵组织对 800—1300 nm 的近红外波段强烈反射,导致在光谱曲线上形成了最高反射峰。

光谱噪声会对光谱微分技术造成影响,采样时的光照、气候情况等都会导致测量的光谱曲线结果产生一定的差异,通过微分变换,将原始光谱数据进行一阶微分处理,能够减少背景噪声的影响进而提高生化参数的监测效果<sup>[23]</sup>。红边位置是植物反射光谱中最明显的光谱特征之一,是指在红光范围(680—750 nm)的光谱反射率的一阶微分值达到最大时所对应的波长,由于红边特征不受叶片结构的影响,因此适用于更广泛的植物检测,红边位置与叶绿素的荧光具有很强的相关性,叶绿素含量越高,红光区域吸收越多,红边就会向长波移动<sup>[18]</sup>。由图 1 可知,有秸秆层的 B、M 和 B+M 的在 680—750 nm 的反射光谱一阶导数最大值所对应的波长位置均在 CK 的长波方向处,按各处理峰顶点所对应的波长位置大小顺序是: B+M>B>M>CK。

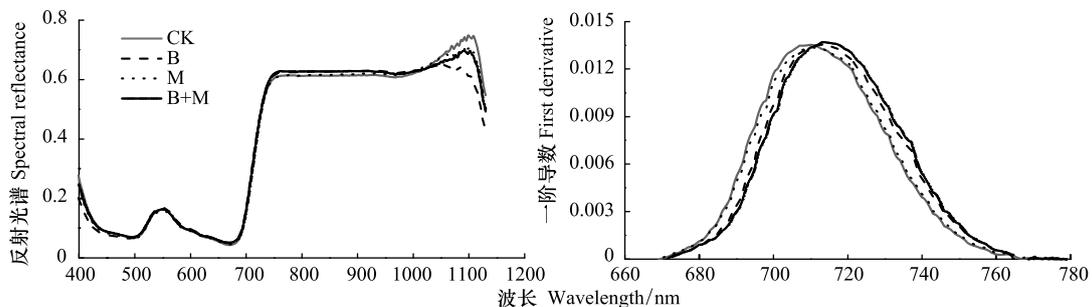


图 1 不同秸秆层的速生杨反射光谱曲线和红光波段(680—750 nm)一阶导数曲线

Fig.1 The spectral reflectance and first derivative in red area (680—750 nm) of fast-growing poplar leaves under different straw interlayers

CK:空白对照,Blank control;B:填埋秸秆层,Bury straw interlayer;M:覆盖秸秆层,Straw mulching;B+M:填埋配合覆盖秸秆层,Straw interlayer plus straw mulching

#### 2.1.2 反射光谱指数

不同秸秆层对土壤水盐运移及环境条件影响不同,引发地上植物体内色素含量、营养状态以及生理生化状况发生相应变化,导致速生杨叶片反射光谱指数发生变化(图 2)。叶绿素归一化指数(Chl NDVI)以及改良归一化差值指数( $mSR_{705}$ )与叶绿素的含量呈线性关系<sup>[18-19]</sup>。B、M 和 B+M 的  $mSR_{705}$  与 Chl NDVI 均显著大于 CK ( $P<0.05$ ),其中 B 最大,B+M 次之。改良红边归一化植被指数( $mND_{705}$ )与叶绿素含量具有极高的相关性<sup>[19]</sup>。方差分析表明,B 与 B+M 的  $mND_{705}$  均大于其他处理 ( $P<0.05$ ),其中 B+M 最大,B 其次。B 和 B+M 两种处理都具有填埋的秸秆层,表明填埋秸秆层可以显著提高速生杨叶片的叶绿素含量。结构无关色素指数(SIPI)是反映类胡萝卜素与叶绿素 a 比值的光谱指数<sup>[20]</sup>,B、M 和 B+M 的 SIPI 均比 CK 的高 ( $P<0.05$ ),其大小关系为 B>M>B+M>CK。植物衰老反射指数(PSRI)是与类胡萝卜素和叶绿素比值高度相关的指数<sup>[21]</sup>,有秸秆的三种处理 PSRI 均小于 CK,且各处理间差异显著 ( $P<0.05$ ),大小关系排序为 CK>B+M>M>B,表明秸秆层可以显著改变地上速生杨叶片的类胡萝卜素含量。光化学反射指数(PRI)与叶黄素循环中的色素含量呈

负相关,当色素含量发生变化,过多的辐射会被叶黄素循环中的色素吸收,而无法进行光合作用,所以当 PRI 低时,其光合速率就低<sup>[22]</sup>。图 2 中 CK 和 M 的 PRI 之间无显著差异( $P>0.05$ ),而 B 与 B+M 显著高于其他处理( $P<0.05$ ),根据 PRI 结果所示,B 与 B+M 比其他处理的地上速生杨光合速率水平要高。

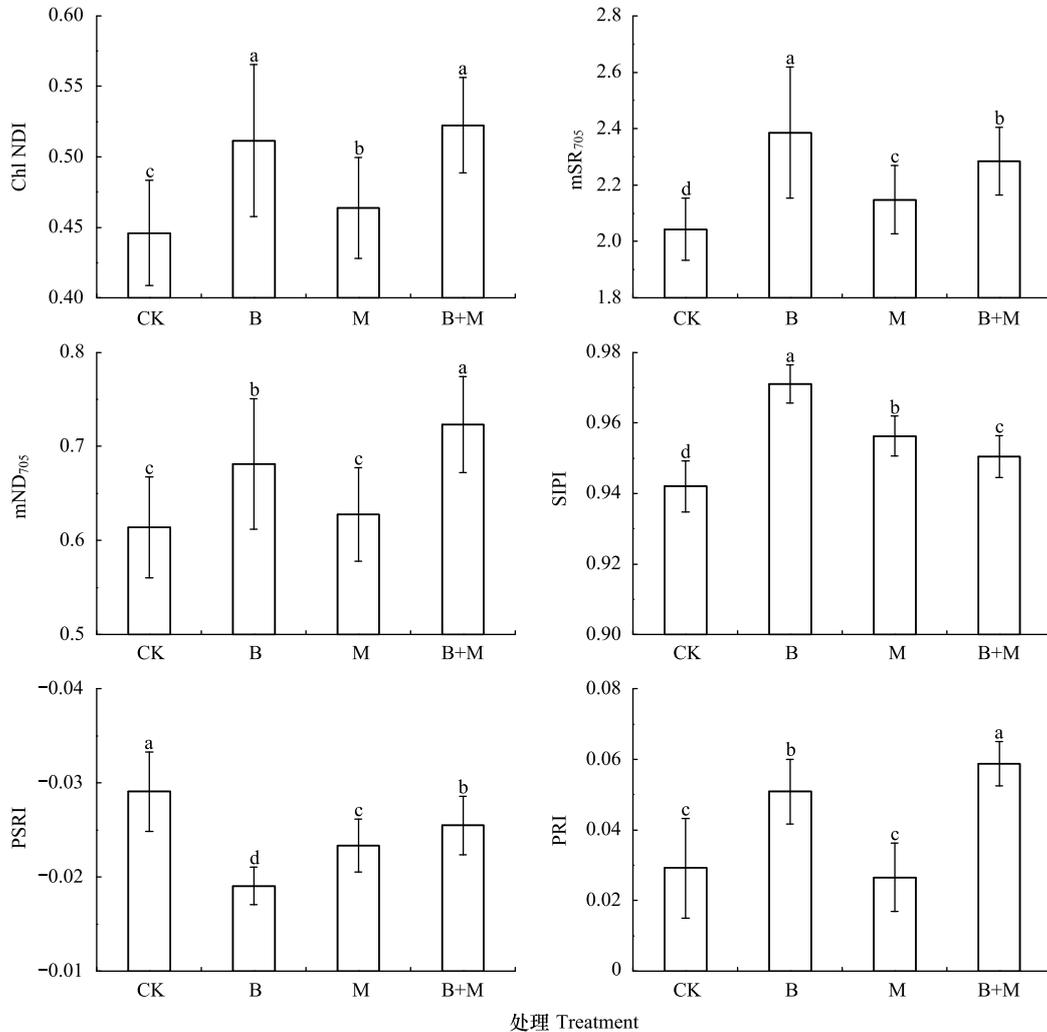


图 2 不同秸秆层的速生杨叶片光谱指数变化

Fig.2 Changes of the reflectance spectrum indices of fast-growing poplar leaves under different straw interlayers

Chl NDVI: 叶绿素归一化指数, Chl normalized difference index; mND<sub>705</sub>: 改良红边归一化植被指数, Modified red edge normalized difference vegetation index; mSR<sub>705</sub>: 改良归一化差值指数, Modified red edge ratio; SIPI: 结构不敏感色素指数, Structure-insensitive pigment index; PSRI: 植物衰老反射指数, Plant senescence reflectance index; PRI: 生理反射指数, Physiological reflectance index

## 2.2 光合特性对秸秆层的响应

### 2.2.1 光合气体交换参数

速生杨的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  以及 LWUE 等光合气体交换参数对不同秸秆层的响应是不同的,并且在不同生长时期也是不同的(表 3)。随着时间的变化,4 种处理的  $P_n$  表现出逐渐降低的趋势。与对照组 CK 相比,B+M 提高了不同时期速生杨的  $P_n$ ,其前期(5 月)、中期(7 月)和末期(9 月)的  $P_n$  分别比 CK 高 0.73%、28.07%和 24.56%。B 与 M 在中、后期的  $P_n$  与 B+M 表现出相同的变化趋势,并且都显著高于 CK,但均低于 B+M。秸秆层明显有助于提高速生杨在不同生长期的  $P_n$ ,其中,B+M 的  $P_n$  提高的效果最好。从作用时期看,各处理在中期对速生杨  $P_n$  提高的幅度最大。各处理  $G_s$  随着时间变化,呈现降低的趋势,总体上 B、M 与 B+M 的气孔导度均比 CK 大( $P<0.05$ )。各处理的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  呈现相同的变化趋势,原因是一方面,由于速生杨

的  $T_r$  受气孔大小调节,因此  $G_s$  较高,  $T_r$  也较大,因此 4 种处理速生杨的  $T_r$  变化趋势与  $G_s$  相同。另一方面,速生杨会由于  $P_n$  的迅速下降,通过降低  $T_r$  来提高 LWUE。速生杨 LWUE 总体呈降低的趋势,前期差异不明显,中后期 B、M、B+M 的 LWUE 均比 CK 大( $P<0.05$ )。而速生杨的  $C_i$  随着时间的变化趋势与  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  不同,各处理间在中期差异不显著,前期和后期 B+M 均显著大于 CK( $P<0.05$ )。

表 3 生长季各阶段不同秸秆层的速生杨光合参数

Table 3 Photosynthetic parameters of fast-growing poplar under different straw interlayers indifferent periods of growing season

月份 Month	处理 Treatments	净光合速率( $P_n$ ) Photosynthetic rate /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	气孔导度( $G_s$ ) Stomata conductance /( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率( $T_r$ ) Transpiration rate /( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ ) Intercellular $\text{CO}_2$ concentration /( $\mu\text{mol/mol}$ )	水分利用效率(LWUE) Leaf water use efficiency /( $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ )
5	CK	10.93±0.75a	69.80±2.72a	3.58±0.24a	192.80±4.60c	3.05±0.05b
	B	11.07±4.58a	66.34±1.80a	3.60±0.08a	229.44±7.26a	3.02±0.16b
	M	10.88±10.36a	65.61±1.42a	3.49±0.31b	182.81±6.27d	3.20±0.31a
	B+M	11.01±0.45a	62.28±3.25b	3.61±0.11a	207.63±4.40b	3.05±0.18b
7	CK	5.13±0.74c	42.52±2.34b	2.10±0.07c	226.38±10.56a	2.44±0.34b
	B	6.04±0.07b	46.34±3.21a	2.35±0.06b	227.17±5.78a	2.57±0.07a
	M	6.22±0.18b	47.83±1.90a	2.44±0.10a	223.03±3.79a	2.56±0.18a
	B+M	6.57±0.32a	42.84±3.32b	2.55±0.03a	203.22±6.49b	2.57±0.11a
9	CK	4.27±0.16c	36.58±2.82c	2.10±0.09b	178.06±2.59c	2.03±0.01b
	B	4.54±0.13b	43.09±7.96b	2.14±0.02a	197.77±11.98b	2.12±0.08b
	M	4.66±0.28b	41.13±1.57b	2.16±0.01a	217.57±3.02a	2.15±0.13b
	B+M	5.31±0.99a	50.08±4.49a	2.24±0.09a	223.97±7.58a	2.37±0.34a

同列具有不用字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ); CK: 空白对照, Blank control; B: 埋埋秸秆层, Bury straw interlayer; M: 覆盖秸秆层, Straw mulching; B+M: 埋埋配合覆盖秸秆层, Straw interlayer plus straw mulching

### 2.2.2 光响应曲线与特征参数

如图 3 所示,不同秸秆层的速生杨光合作用的光响应过程及其特征参数均发生了显著变化。不同处理的速生杨净光合速率( $P_n$ )随着光合有效辐射(PAR)的升高,整体上呈相似的变化趋势,均先迅速增加,然后逐渐变缓。在弱光条件下( $\text{PAR} \leq 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $P_n$  随着 PAR 的增加呈线性升高,表明 PAR 是光合作用的主导因子,但 4 种处理间  $P_n$  对 PAR 的响应差异不明显( $P>0.05$ )。随着 PAR 继续增加,当  $\text{PAR} > 200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $P_n$  上升至最大净光合速率( $P_{n_{\max}}$ ), PAR 增至饱和点(LSP),约  $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,在此阶段  $P_n$  随着 PAR 增加呈曲线上升,表明 PAR 不是该阶段的主导因子,大气温湿度、 $C_a$ 、 $C_i$  等生理生态因子也对速生杨的光合作用产生重要影响。当 PAR 超过 LSP,各处理  $P_n$  随着 PAR 增加而无明显变化,光响应曲线趋于平缓。

如表 4 所示,空白对照组 CK 代表了自然状况下速生杨光响应参数值。方差分析表明,与 CK 相比,有秸秆层的三种处理的光响应参数呈显著差异。B、M 和 B+M 的  $P_{n_{\max}}$  与 LSP 都显著提高( $P<0.05$ ),其中 B+M 最高,B 和 M 次之,CK 最低。LCP 和  $R_d$  差异水平结果相同,处理 M 大于 CK( $P<0.05$ ),B 与 B+M 均小于 CK,其中 B 最小。

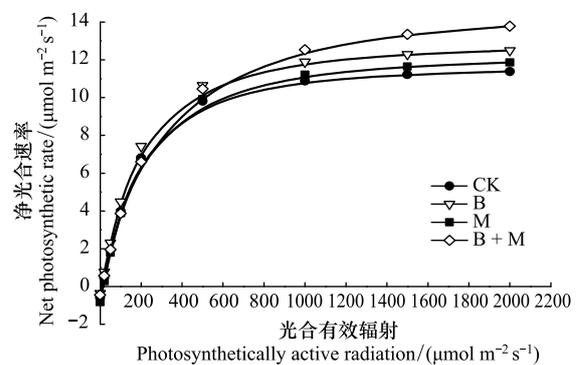


图 3 不同秸秆层的速生杨叶片净光合速率的光响应及其模拟  
Fig.3 Photosynthetic rate-light response curves and simulation of fast-growing poplar under different straw interlayers

## 2.3 土壤水盐变化

### 2.3.1 土壤含水量

图4表示5月、7月和9月灌溉后30天内的土壤含水量变化。随着时间推进,4种处理的土壤含水量均逐渐下降,但下降程度具有差异。CK为空白处理,其含水量下降程度高,一个灌溉周期后的值最低;与CK对比发现,B、M和B+M均一定程度改变了土壤含水量的下降速度,并提高灌溉后的土壤含水量,其中处理B+M蓄水效果较好,表明秸秆层均能够提高土壤含水量,其中填埋秸秆层的蓄水效果最好。

表4 速生杨叶片光合作用光响应参数直角双曲线修正模型拟合值

Table 4 The model fitted values of photosynthesis-light response parameters of fast-growing poplar under different straw interlayers

处理 Treatments	表观量子效率( $\Phi$ ) Apparent quantum yield/(mol/mol)	饱和光强(LSP) Light saturation point /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	最大净光合速率 ( $Pn_{\text{max}}$ ) Maximum photosynthetic rate/( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	光补偿点(LCP) Light compensation point /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	暗呼吸速率( $R_d$ ) Respiration rate /( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
CK	0.056±0.0029a	243.83±15.66c	12.80±1.27c	9.81±1.14b	0.557±0.049b
B	0.056±0.0012a	250.65±10.37bc	13.68±1.69b	5.53±0.49d	0.314±0.034d
M	0.055±0.0017a	266.67±8.59b	13.75±2.34b	14.05±0.84a	0.768±0.142a
B+M	0.050±0.0011b	306.75±7.31a	14.88±2.29a	8.96±0.64c	0.447±0.083c

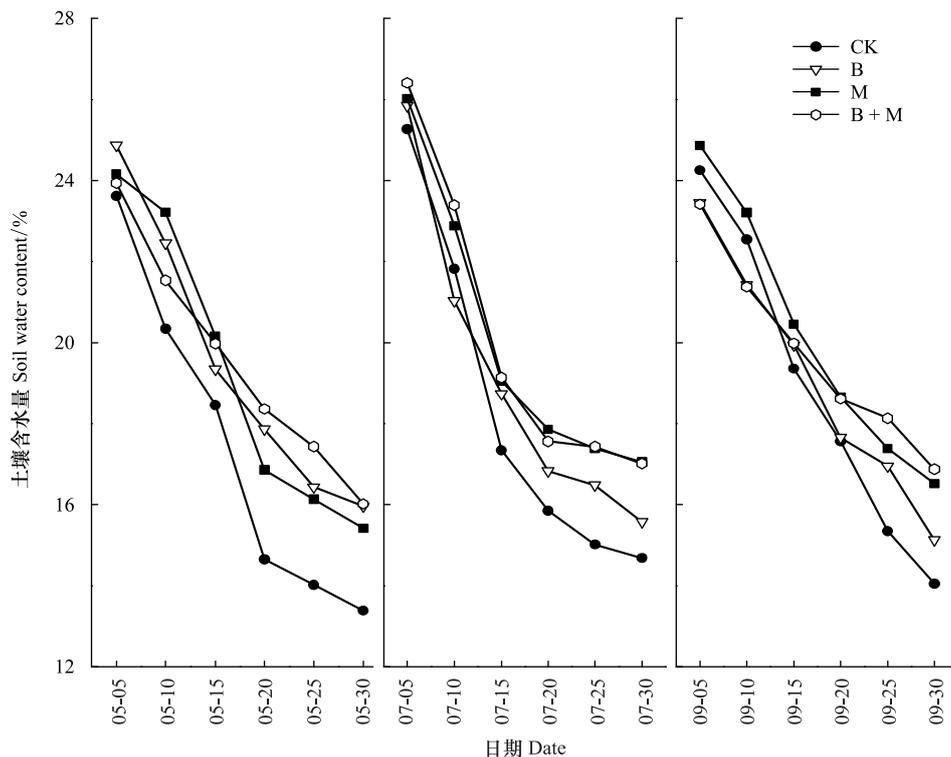


图4 不同秸秆层在不同时期土壤含水量变化

Fig.4 Soil water content in the different stages under different straw interlayers

### 2.3.2 土壤盐分含量

由图5可以看出,随着时间推移,不同处理条件,土壤盐分含量总体呈降低趋势,但降低程度具有明显差异。与空白对照组CK相比,B与B+M在不同时期的土壤盐分含量均低于其他处理( $P<0.05$ ),但处理B与B+M间无显著差异( $P>0.05$ )。处理M也能够降低不同时期的盐分含量,但盐分均高于处理B与B+M( $P<0.05$ )。表明秸秆层能够显著降低不同时期土壤盐分含量,并且填埋秸秆层的抑盐效果要高于覆盖秸秆层。从不同的月份来看,5月份各处理盐分含量相对较高,原因是可能是5月份仅进行了一次灌溉,未完全发挥出

秸秆的淋洗作用,随着时间的推进,灌溉次数的增加,各处理的盐分均有所下降,其中有填埋秸秆层的处理 B 与 B+M 土壤盐分含量降低程度最大。

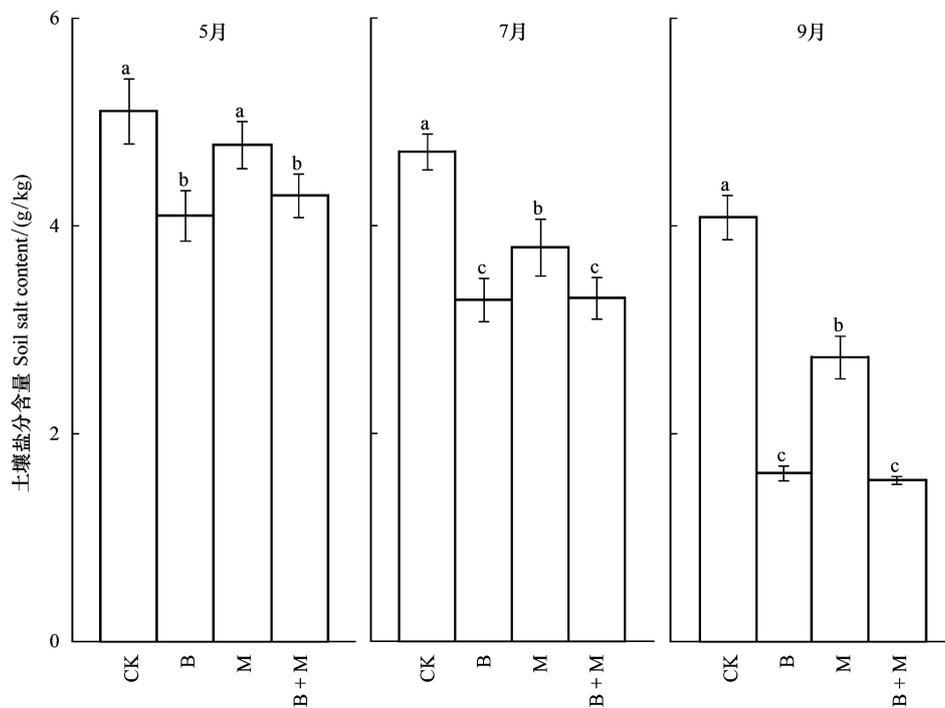


图5 不同秸秆层在不同时期土壤盐分含量

Fig.5 Soil salt content in the different stages under different straw interlayers

### 3 讨论

光合作用是所有绿色植物中极为复杂和最基本的生理过程,其机制涉及各种组分,包括光合色素和光系统,电子传递系统和二氧化碳减少途径,因此任何由胁迫引起的损害都可能影响绿色植物的整体光合能力<sup>[10,27]</sup>。同时,光合作用是植物生产力高低的决定因素和对环境胁迫程度的反应指标<sup>[28]</sup>。本试验所在的西北干旱与半干旱地区,降水少,蒸发量大,土壤水分大量无效蒸发以及土壤盐分积聚,所导致的干旱胁迫和盐胁迫是限制本地区植被成活的重要原因<sup>[3-4]</sup>。Chaves 等人研究表明盐胁迫会抑制或破坏植物光系统的部分功能,电子传递系统以及光合作用的能量,使得植物叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素以及酶活性等明显降低,导致光合作用下降;水分胁迫通过气孔限制和叶肉细胞光合活性下降的非气孔限制两种机制引发植物光合效率降低<sup>[12]</sup>。在本试验中,5月处于改良前期,土壤盐分较高且差异不明显,各处理的速生杨净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等光合气体交换参数之间差异不明显,与其他时期相比光合效率水平较低,其原因主要是盐胁迫引起的。经过数月的灌溉和降水的淋洗作用,在7月与9月,与空白对照组相比,地下填埋秸秆层的 B 与 B+M 土壤盐分下降到较低水平,B 和 B+M 明显提升不同时期地上速生杨  $P_n$ 、 $Tr$ 、 $G_s$ ,表明填埋秸秆层对速生杨的光合作用效能及其光能利用效率产生了明显的提升作用。另外,叶片水分利用效率(LWUE)的大小可以反映出植物对逆境的适应能力<sup>[29-30]</sup>。在前期,各处理土壤水盐环境大致相同,各处理的 LWUE 差异不明显;中后期,B+M 的 LWUE 高于 CK 和其他处理,表明填埋搭配覆盖秸秆层处理后的水盐环境更适合速生杨生长。这与王琳琳等对刺槐的研究结果相符<sup>[28]</sup>。最大净光合速率( $P_{n_{max}}$ )体现了植物对强光的利用能力,饱和光强(LSP)和光补偿点(LCP)表示对光能(强光和弱光)的利用能力和程度,表观量子效率( $\Phi$ )表征了植物对弱光的利用能力,暗呼吸速率( $R_d$ )表示植物的线粒体呼吸<sup>[29]</sup>。B、M 和 B+M 的最大净光合速率与饱和光强均显著提高,表示具有秸秆层的处理提升了速生杨的有机物的合成能力以及强光的利用能力和程

度。B 和 B+M 其中光补偿点和暗呼吸速率明显降低, M 则相反, 表示埋秸秆层的处理提升了速生杨对弱光的利用能力和程度, 并降低植物的呼吸消耗。

植物的光谱特性是指植物受电磁波作用时, 会在某些特定的波段, 由于电子跃迁、分子振动和转动等复杂作用, 形成能够反映物质结构和组成的光谱吸收与反射特征, 这种对不同波长位置光谱的响应特性叫植物的光谱特性<sup>[14]</sup>。植物光谱特性与植物的色素含量、水分含量、以及营养状况密切相关, 通过光谱可以检测和分析植物的生长状况、光合能力及受胁迫程度等生理状况<sup>[12,27,31-32]</sup>。本试验中, 处理 B+M 的速生杨叶片光合色素含量最高, 光合特性以及营养状况最好, 红边位置以及其他光谱参数的结果与 CK 相比都有显著提升。而处理 B 与 M 也可以显著提升速生杨光合色素量和光合特性, 表明秸秆层对缓解灌区次生盐碱地速生杨生长所受胁迫具有积极的作用, 其中处理 B+M 的效果最好。光化学反射指数 (PRI) 与植物叶片光能利用效率呈正相关, 能够反映不同植物在不同营养条件和不同生长阶段的光能利用效率, 因为 PRI 与叶黄素循环中的色素含量呈负相关, 当色素含量发生变化, 过多的辐射会被叶黄素循环中的色素吸收, 而无法进行光合作用, 所以当 PRI 低时, 其光合速率就低<sup>[33-34]</sup>。本试验中, PRI 所与光合特性所反应的结果较为一致, 进一步表明了秸秆层对提升灌区次生盐碱地植物光合效率具有积极的作用。另外, 本试验两种与叶片光合色素含量相关的光谱指数 SIPI 和 PSRI 所得出来的结果稍有差异, 这是由于反应叶片色素的特征光谱指数会因植被类型、生长阶段以及取样方案的不同而有所差异, 因此在选择利用光谱分析技术更准确的研究植被时, 要根据具体的研究对象和条件, 通过更进一步的研究筛选出最适宜该试验植物光谱特征的指数。

引黄灌区农业生产中会产生的大量秸秆废弃物, 探究利用秸秆层改良灌区次生盐碱地是一种重要、有效的秸秆利用方式, 也是一种合理、因地制宜的土壤改良方式。不仅能够避免造成环境污染和资源浪费, 还能增加土壤有机质和养分, 改善土壤水盐胁迫环境。本研究中, 土壤水盐变化的结果表明, 与对照组 CK 对比, B、M 和 B+M 土壤含水量较高, B 和 B+M 的盐分含量低, 由此可知, 在地表覆盖秸秆层的处理 M 虽然能够提高了土壤含水量, 但降低土壤盐分的作用较弱, 而栽植穴底部具有秸秆层的处理 B 和 B+M 有助于提高土壤水分, 有效降低土壤盐分, 起到控盐保水的效果, 这与赵永敢等人的研究结果相一致<sup>[35]</sup>。结合土壤的水盐的变化来看, 不同秸秆层对土壤水盐调控程度不同, 造成各处理的土壤环境条件不同, 影响地上速生杨生理状况发生相应变化, 埋秸秆层为速生杨根层创造了较适宜的水盐土壤环境, 从而减轻了水盐胁迫对速生杨光谱与光合特性的抑制作用。

在以往对次生盐碱地土壤改良与植被恢复的研究当中, 一般较为注重土壤改良状况, 而在植被恢复方面, 对于农作物一般看其产量或生物量的多少, 而对于具有生态效益的非经济植物, 利用传统的化学分析法检测植物生理状况, 操作步骤繁琐, 花费时间较长, 还会对植物造成一定的损伤, 更不利于对同一植物的生长状况、光合效率和受胁迫等情况进行长期动态监测。而通过检测植物光谱与光合特性可以揭示出地上植物生长及生理状况的变化, 不仅迅速、准确、无损伤, 并且通过一次测定就可以分析出光合色素、生长状态以及受胁迫等生理状况, 基于此, 可以通过更进一步研究, 探索利用植物的光谱及光合特性评估各类盐碱地改良措施的植被恢复效益, 对各类改良措施的植被恢复状况进行更为高效且准确的评估。

#### 4 结论

速生杨的光谱及光合特性对不同秸秆层的响应是不同的, 秸秆层有助于提升灌区次生盐碱地中速生杨的光谱及光合等生理状况。B、M 和 B+M 均能显著提升速生杨叶片的最大净光合速率与饱和光强, 其中, B 和 B+M 还明显降低速生杨叶片的光补偿点和暗呼吸速率, M 则不行。B 和 B+M 均显著提高速生杨叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合参数。另外, B+M 的速生杨叶片光合色素含量最高, 营养状况最好, 并且其他光谱参数结果与 CK 相比都有显著提高。处理 B 和 M 也可以显著提高速生杨叶片光合色素含量和营养等生理状况, 但效果均不如 B+M。

不同秸秆层对土壤的水盐调控程度不同, 秸秆层能够改善灌区次生盐碱地的高盐、干旱的土壤环境, 减轻

盐胁迫与干旱胁迫对速生杨生理状况的抑制作用,从而引起速生杨光谱与光合状况发生相应变化。B 与 B+M 均能降低不同时期的土壤盐分含量,且两处理间无显著差异,然而,B+M 在不同时期提高土壤含水量的效果均高于 B。M 也能降低土壤盐分和提升土壤含水量,但不同时期的效果均不如处理 B+M。

综合试验结果,在引黄灌区次生盐碱地,不同秸秆层均能不同程度的调节土壤水盐变化,缓解速生杨所受水盐胁迫,提升速生杨光谱与光合特性,其中 B+M 秸秆层模式效果最佳。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Hatton T J, Nulsen R A. Towards achieving functional ecosystem mimicry with respect to water cycling in southern Australian agriculture. *Agroforestry Systems*, 1999, 45(1/3): 203-214.
- [ 2 ] Barrett-Lennard E G. Restoration of saline land through revegetation. *Agricultural Water Management*, 2002, 53(1/3): 213-226.
- [ 3 ] 马传明, 靳孟贵. 西北地区盐渍化土地开发中存在问题及防治对策. *水文*, 2007, 27(1): 78-81.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] Jiang S C, He N P, Wu L, Zhou D W. Vegetation restoration of secondary bare saline-alkali patches in the Songnen plain, China. *Applied Vegetation Science*, 2010, 13(1): 47-55.
- [ 6 ] 李芙蓉, 杨劲松, 吴亚坤, 姚荣江, 余世鹏, 张建兵. 不同秸秆埋深对苏北滩涂盐渍土水盐动态变化的影响. *土壤*, 2013, 45(6): 1101-1107.
- [ 7 ] 张建锋. 盐碱地的生态修复研究. *水土保持研究*, 2008, 15(4): 74-78.
- [ 8 ] Van Gaalen K E, Flanagan L B, Peddle D R. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and spectral reflectance in *Sphagnum* moss at varying water contents. *Oecologia*, 2007, 153(1): 19-28.
- [ 9 ] Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 105-117.
- [ 10 ] Ashraf M, Harris P J C. Photosynthesis under stressful environments: An overview. *Photosynthetica*, 2013, 51(2): 163-190.
- [ 11 ] 陈媛媛, 江波, 王效科, 李丽. 北京典型绿化树种幼苗光合特性对硬化地表的响应. *生态学报*, 2017, 37(11): 3673-3682.
- [ 12 ] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 2009, 103(4): 551-560.
- [ 13 ] Naidu R A, Perry E M, Pierce F J, Mekuria T. The potential of spectral reflectance technique for the detection of *Grapevine leafroll-associated virus-3* in two red-berried wine grape cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 66(1): 38-45.
- [ 14 ] 薛忠财, 高辉远, 彭涛, 姚广. 光谱分析在植物生理生态研究中的应用. *植物生理学报*, 2011, 47(4): 313-320.
- [ 15 ] 胡砚霞, 黄进良, 杜耘, 韩鹏鹏, 王久玲, 黄维. 洞庭湖洲滩速生杨树林变化信息提取方法. *生态学报*, 2014, 34(24): 7243-7250.
- [ 16 ] Jain S K, Singh P. Economic analysis of industrial agroforestry: poplar (*Populus deltoides*) in Uttar Pradesh (India). *Agroforestry Systems*, 2000, 49(3): 255-273.
- [ 17 ] 孙兆军. 银川平原盐碱荒地改良模式研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [ 18 ] Gitelson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 1994, 143(3): 286-292.
- [ 19 ] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2/3): 337-354.
- [ 20 ] Penuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
- [ 21 ] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, Rakitin V Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106(1): 135-141.
- [ 22 ] Gamon J A, Peñuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 41(1): 35-44.
- [ 23 ] 吴寿国, 余学军, 李凯, 蒋玉俭, 张汝民. 海盐对绿竹叶片反射光谱及叶绿素荧光参数的影响. *生态学报*, 2014, 34(17): 4920-4930.
- [ 24 ] 孙宝玉, 韩广轩, 陈亮, 王安东, 吴立新, 赵敏. 短期模拟增温对黄河三角洲滨海湿地芦苇光响应特征的影响. *生态学报*, 2018, 38(1): 167-176.
- [ 25 ] 叶子飘, 于强. 光合作用光响应模型比较. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1356-1361.
- [ 26 ] Pang H C, Li Y Y, Yang J S, Liang Y S, Yang J S. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1971-1977.
- [ 27 ] 张金林, 李惠茹, 郭姝媛, 王锁民, 施华中, 韩庆庆, 包爱科, 马清. 高等植物适应盐逆境研究进展. *草业学报*, 2015, 24(12): 220-236.
- [ 28 ] 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.
- [ 29 ] 谢东锋, 张光灿, 夏宣宣, 郎莹. 不同浓度酚酸对欧美杨 I-107 苗木生长和光合特性的影响. *生态学报*, 2018, 38(5): 1789-1798.
- [ 30 ] 贾中民, 王力, 魏虹, 冯汉茹, 李昌晓. 垂柳和旱柳对镉的积累及生长光合响应比较分析. *林业科学*, 2013, 49(11): 51-59.
- [ 31 ] 彭涛, 李鹏民, 贾裕娇, 高辉远. 介绍两种无损测定植物活体叶片色素含量的方法. *植物生理学通讯*, 2006, 42(1): 83-86.
- [ 32 ] 刘伟国, 范秀华. 长白山红松阔叶林主要树种光谱反射特征对光环境的响应. *生态学报*, 2009, 29(9): 4720-4726.
- [ 33 ] Demmig-Adams B, Adams III W W. The role of xanthophyll cycle carotenoids in the protection of photosynthesis. *Trends in Plant Science*, 1996, 1(1): 21-26.
- [ 34 ] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought — from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(3): 239-264.
- [ 35 ] 赵永敢, 李玉义, 胡小龙, 王婧, 逢焕成. 地膜覆盖结合秸秆深埋对土壤水盐动态影响的微区试验. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1129-1137.