

DOI: 10.5846/stxb201712062197

乔雪涛,何欣燕,何俊,范秀华.不同秸秆埋量对盐碱土的水盐运移及垂柳反射光谱影响.生态学报,2018,38(22): - .

Qiao X T, He X Y, He J, Fan X H. Effect of burying different amounts of straw on soil water, salt movement, and the spectral reflectance of *Salix babylonico* grown on saline-alkaline land. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

# 不同秸秆埋量对盐碱土的水盐运移及垂柳反射光谱影响

乔雪涛<sup>1,2</sup>, 何欣燕<sup>1</sup>, 何俊<sup>3</sup>, 范秀华<sup>2,\*</sup>

1 北京林业大学森林资源与生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083

2 北京林业大学理学院, 北京 100083

3 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 银川 750021

**摘要:**在宁夏西北盐化生态脆弱区的典型盐碱化土地,通过随机区组试验,探究在栽植穴埋量 2000(T<sub>1</sub>)、7000(T<sub>2</sub>)、12000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>3</sub>)及 17000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>4</sub>)等作隔盐层对土壤水盐运移及垂柳(*Salix babylonica*)反射光谱的影响,将地下土壤水盐变化与地上植物生长及生理状况相结合,以期更准确的反映出各处理对盐碱土壤改良效果及地上植被恢复情况。研究表明:(1)埋量一定的秸秆作隔盐层可以改变地下土壤水盐的剖面分布特征。T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和 T<sub>4</sub>处理与对照组相比,20—80 cm 土层土壤含水量都显著提高,埋量的秸秆层起到了蓄水保墒的作用;都明显降低了 0—80 cm 土层土壤盐分含量和盐溶质浓度;但这 3 种处理之间无显著差别。T<sub>1</sub>由于埋量秸秆量太少,无显著蓄水控盐效果。(2)通过检测植物叶片反射光谱可以反映出地上植物生长及生理状况的变化。埋量一定的秸秆作为隔盐层有助于改善垂柳的生理状况。T<sub>2</sub>的垂柳叶片光合色素含量最高,光合特性及营养状况最好,其他光谱参数结果都显著提高。T<sub>3</sub>显著提高叶绿素含量和光合特性,但效果均不如 T<sub>2</sub>,且营养状况差。T<sub>4</sub>处理类胡萝卜素含量与叶片水分含量均处于最高水平,但叶绿素含量、营养状态以及光合特性都显著降低。T<sub>1</sub>处理效果最差。(3)在地下埋量秸秆作隔盐层,会通过地下土壤水盐运移及微域生态系统环境的调节,影响到地上植物生长及生理状况。综合地下水盐分布与地上植物叶片反射光谱的结果,T<sub>2</sub>是宁夏引黄灌区盐碱地改良中最适宜的秸秆埋量。

**关键词:**秸秆埋量;盐碱地;水盐运移;反射光谱;垂柳

## Effect of burying different amounts of straw on soil water, salt movement, and the spectral reflectance of *Salix babylonico* grown on saline-alkaline land

QIAO Xuetao<sup>1,2</sup>, HE Xinyan<sup>1</sup>, HE Jun<sup>3</sup>, FAN Xiuhua<sup>2,\*</sup>

1 Key Laboratory for Forest Resources & Ecosystem Processes of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Development Center of New Technique Application and Research, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** Salinization is the process by which water-soluble salts build up over the soil profile. Soil salinity is 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. These problems can lead to reduced growth and biomass. In previous studies on saline-alkali soil amelioration, evaluation of the amelioration measures has focused on the influence of soil salt ions and soil physical and chemical properties. However, this assessment is one-sided and does not consider simultaneously the effects on the growth and physiological conditions of the vegetation. Burying straw in soil as salt-isolation

基金项目:林业公益性行业科研专项(201504402)

收稿日期:2017-12-06; 网络出版日期:2018-00-00

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

interlayers is a widely used and effective measure for soil salinity control. The effect of burying different amounts of straw on the amelioration of saline-alkali land and vegetation restoration was assessed by conducting field experiments on typical saline-alkaline land in the ecologically fragile area of Ningxia in northwest China. The experiment had four straw burial treatments. These were 2000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>1</sub>), 7000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>2</sub>), 12000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>3</sub>), and 17000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>4</sub>). The control treatment was no straw burial. All the treatments were arranged in a randomized complete block design with five blocks. Each block was then divided into three plots. The five treatments were randomly assigned to each block. The soil water and salt contents in the 0—100 cm soil layer and spectral reflectance were measured during the *Salix babylonico* growing season. The results indicated that (1) burying straw as a salt-isolation interlayer could significantly modify underground soil water and salt processes. The T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, and T<sub>4</sub> treatments significantly increased the soil water content in the 20—80 cm soil layer compared to CK, and significantly reduced the soil salt content and salt solute concentration in the 0—80 cm soil layer. However, there were no significant differences between these three treatments. The amount of straw buried in T<sub>1</sub> was low. This meant that there was no significant difference between it and the distribution of soil water and salt in CK. Therefore, the salinity control effect was not obvious. (2) The results for the plant leaf spectral reflectance showed that plant growth and physiological condition could be estimated from the results. Straw interlayers significantly improved the physiological condition of *Salix babylonico*. The spectral reflectance results showed that the T<sub>2</sub> treatment produced the highest chlorophyll content, photosynthetic characteristics, and nutrition levels. Other spectral reflectance parameters also significantly improved compared to CK. The T<sub>3</sub> treatment significantly improved chlorophyll content and photosynthetic characteristics, but was less effective than T<sub>2</sub> and nutrition levels were poor. Carotenoids content and the leaf water content were highest in the T<sub>4</sub> treatment, but other parameters were significantly lower than CK. The T<sub>1</sub> treatment was the worst. (3) Burying straw in the ground as a salt-isolation interlayer could affect the growth and physiological state of the plant by regulating underground soil water and salt transport, and the micro-ecosystem environment. The results for the distribution of soil water and salt, and the spectral reflectance of the plant leaves suggested that the T<sub>2</sub> treatment was the most suitable straw burying amount for the amelioration of saline-alkaline land in the ecologically fragile area of Ningxia.

**Key Words:** straw burying amount; saline-alkali land; water and salt movement; spectral reflectance; *Salix babylonico*

土壤盐碱化对全球农业的生产力和可持续发展造成了严重影响,目前全世界约有盐碱化土地  $9.5 \times 10^8$  hm<sup>2</sup>,并且随着时间的推移,其面积持续扩大,盐碱化的水平持续加剧<sup>[1]</sup>。我国盐碱地分布广泛,面积较大,约  $3.6 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,同时还存在大面积潜在的盐碱土地<sup>[2]</sup>。因此,采取行之有效的措施改良盐碱荒地,使其能被有效利用是当前迫切需要解决的问题。

盐碱荒地改良利用的核心是改善植物生长的土壤环境<sup>[3]</sup>。土壤盐分运动情况非常复杂,盐分以水分为载体,随着水分的运动而迁移<sup>[4]</sup>。地表返盐和聚盐的主因就是土壤水分无效蒸发与潜水上升,而通过切断潜水上升通道,减少水分蒸发,促进下行重力水的淋洗作用,能够有效抑制返盐和聚盐作用,降低盐分对植物的胁迫作用<sup>[5]</sup>。大量研究与实践表明,填埋秸秆作为隔离垫层,能够有效破坏土壤毛细管的连续性,降低潜水蒸发,阻隔盐分随潜水上升,防止根层盐化和盐分表聚,最终达到保墒抑盐的效果<sup>[5-9]</sup>。但目前关于利用秸秆作隔离垫层对盐碱土壤水盐分布影响的研究,对于秸秆填埋量的研究较少,并且大多都是在室内设计的一维土柱试验,而室内试验无法模拟出野外受多种自然因素影响的土壤水盐分布的实际情况<sup>[10-13]</sup>。另外,在当前盐碱土壤改良的研究中,各种改良措施的评价只注重对地下土壤盐分离子以及土壤理化性质的影响,这种评价较为片面,没有同时考虑对地上植物的生长及生理状况的影响,如一些改良措施在降低土壤盐分含量的同时会造成土壤含水量骤降,养分元素流失,重金属积累污染,最终导致对地上植物的生长产生不利影响<sup>[14-17]</sup>。因此,将地下土壤水盐变化与地上植物生长及生理状况相结合的研究能更全面的反映出盐碱土壤改良措施的效果。

近年来,基于植物反射光谱特征的光谱分析技术的快速发展,其在植物生理生态研究中得到广泛的应用。植物在不同的环境条件以及不同生长发育阶段,会引发体内色素含量、营养状态以及生理生化状况发生相应的变化,从而导致植物反射光谱特性发生变化<sup>[18-22]</sup>。通过光谱分析技术不仅能够快速、无损、准确的检测植物体内光合色素含量、水分含量、营养情况等,还能够从叶片、冠层和生态系统等多种水平探究植物在不同环境条件下的生理生态变化<sup>[22]</sup>,从而评估植物生长状况、光合作用、受胁迫等情况<sup>[23]</sup>。因此,本研究以宁夏西北盐化生态脆弱区的典型盐碱地为例,研究了不同秸秆填埋量对地下 0—100 cm 土壤的水盐运移及垂柳叶片反射光谱影响,探究不同填埋量的秸秆隔离垫层的控盐改土效果,以及对地上植物色素含量、光合速率、营养状况以及受胁迫等情况的影响。以期为西北盐化生态脆弱区的土地改良与植被恢复提供理论指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究地区概况

试验样地选在宁夏回族自治区吴忠市树新林场(38°01'N,105°57'E),属西北盐碱地生态恢复关键技术与示范基地。位于宁夏引黄灌区,属于典型大陆气候。年均气温 8.3—8.6℃,昼夜温差较大。气候干燥,降水稀少,年均降水量仅 193—203 mm,并多集中于 7—9 月,约占年总降水量的 70%。风大沙多,蒸发量大,年均蒸发量 1763 mm,强烈蒸发期主要出现在春、秋两季。日照充足,全年日照数 2988—3040 h,无霜期 176 d 左右。试验地土壤属重度盐化土,土地表层盐分表聚现象严重,土壤碱化度高达 25%以上,矿化度为 0.6—15 g/L,全盐量平均 4.6 g/kg 以上,地表有盐霜或结皮。地下水埋深较浅 1.3—2.0 m。本试验地的土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地土壤基本理化性质

Table 1 Physiochemical properties of the study field

土壤质地 Texture	电导率 Electrical conductivity/ (dS/m)	pH	土壤物理性质 Soil physical properties				土壤养分 Soil nutrient			
			容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	田间持水量 Field capacity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity/%	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	有效钾 Available K / (mg/kg)
砂质壤土 Sandy loam	15.5	8.1	1.04	21.3	28.1	45.8	3.31	0.27	8.74	51.48

### 1.2 试验设计

为了保证试验条件一致,选取地下土壤水分和盐分较为均匀的样地作为试验地。本试验采用随机区组排列设计,将试验地划分成 5 个区组,每个区组规格为 33 m×9 m,每个区组划分为 3 个小区,每个小区规格为 9 m×9 m,两个相邻区组间隔 6 m,两个相邻小区间隔 3 m。选用切碎为 10 cm 左右的干燥玉米秸秆作为填埋材料。试验设不做任何处理为对照(CK)、地表下填埋秸秆 2000(T<sub>1</sub>)、7000(T<sub>2</sub>)、12000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>3</sub>)及 17000 kg/hm<sup>2</sup>(T<sub>4</sub>)等 5 种处理。5 种处理除秸秆填埋量不同,其余因素均相同。将 5 种处理随机分配到 5 个区组中,每个小区为 1 种处理,每种处理重复 3 次。秸秆填埋深度过浅,垂柳根部秸秆过多,会导致垂柳栽植不牢,易倒伏;秸秆填埋深度过深,试验地地下水较浅,秸秆隔层无法发挥淋洗作用<sup>[8-10]</sup>。综合垂柳根系深度、填埋秸秆厚度以及地下水深度,将填埋深度设为距离地表 80 cm 处。选取垂柳(*Salix babylonico*)作为试验树种,树龄为 2 年,截干栽植,地径和截干的高度分别在 0.29—0.38 m 和 2.51—2.77 m 之间,并在截干顶端刷漆。每个小区内 9 棵垂柳,株间的行距为 3 m×3 m,栽植穴规格为 1 m×1 m×1 m。为便于淋洗排水,在试验地周围设置宽 4 m,深 3 m 的明沟。在试验开始前 3 天,对试验地进行人工深翻,平整土地。每 30 d 大水漫灌一次,灌溉定额设 200 mm。

### 1.3 样品采集与分析

### 1.3.1 地下土壤水盐

于 2016 年 9 月 5 日用管式不锈钢土钻采集土壤样品,每小区随机选择 3 棵样树,为保证土样具代表性,采集 3 个取样点的土样均匀混合,取样点分别设为距树干 30 cm(根际土)、70 cm(冠下土)和 110 cm(边缘土)处,取 0—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 共 5 个土层的土样。土壤含水量的测定采用烘干法。采集的土壤放置于室内自然风干,去除石块和杂质后进行磨碎,过 2 mm 筛。以土水比 1:5 浸提土壤,160 r/min 条件下振荡 5 min,转速 5000 r/min 离心 5 min,电导率仪 MP-522 测定土壤浸提液的电导率。将不同层次的浸提液电导率转化为土壤含盐量,计算公式如下<sup>[24]</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(g/kg);  $EC_{1,5}$  为土水比 1:5 的土壤浸提液电导率(dS/m)。

计算出相应的土壤盐溶质浓度,采用如下公式:

$$SC_i = S_i / W_i \times 10$$

式中,  $SC_i$  表示第  $i$  土层盐溶质浓度(g/L);  $S_i$  表示第  $i$  土层含盐量(g/kg),  $W_i$  表示第  $i$  土层水分含量。

### 1.3.2 地上垂柳反射光谱

本研究使用 Unispec-SC 光谱仪(美国 PPSYSTEM 公司)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,卤光灯的光强设为 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,选取顶部向阳处的成熟叶片,每个处理 3 个重复,每个重复选取 3 棵垂柳,每棵选取 3 片叶子,每片测 3 个不同位置。

原始光谱数据的处理采用 Multispec5.1 软件得到光谱反射率  $R(\lambda_i)$ 。本研究选用了一些已被广泛证实,能够进行光合色素、水分含量和氮素变化的无损光学检测,以及反映叶片特征结构的光谱参数,见表 2。

表 2 本研究中所用的反射光谱参数

Table 2 The spectral reflectance parameters used in this study

类型 Description	反射光谱参数 Spectral reflectance parameters	缩写与公式 Acronym and Formulation	文献来源 Reference
与叶绿素相关 Related to chlorophyll	叶绿素归一化指数	$ChINDVI = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705})}$	[25]
	绿色归一化差值植被指数	$GreenNDVI = \frac{(R_{750} - R_{550})}{(R_{750} + R_{550})}$	[25]
	改良红边归一化植被指数	$mND_{705} = \frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})}$	[26]
	改良归一化差值指数	$mSR_{705} = \frac{(R_{750} - R_{445})}{(R_{705} + R_{445})}$	[26]
与胡萝卜素相关 Related to carotenoid	结构不敏感色素指数	$SIP1 = \frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} - R_{680})}$	[27]
	植物衰老反射指数	$PSRI = \frac{(R_{680} - R_{500})}{R_{750}}$	[28]
与光合作用相关 Related to photosynthesis	生理反射指数	$PRI = \frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})}$	[29]
与叶片含水量相关 Related to leaf water content	水分指数	$WI = \frac{R_{900}}{R_{970}}$	[30]

采用光谱归一化微分分析,对反射光谱数据进行一阶微分处理,得到微分光谱,计算公式如下:

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

式中,  $\lambda_i$  为波段  $i$  的波长值,  $R(\lambda_i)$  为  $\lambda_i$  的光谱反射率值,  $R'(\lambda_i)$  为第  $i$  波段的一阶微分数值。根据表 3 红边参数的定义,在 680—750 nm 确定红边参数,红边参数定义见表 3。

## 1.4 统计分析

试验数据利用 Sigmaplot 10.0 做图,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)比较各处理间差异,多重比

较采用最小显著极差法(LSD)检验差异显著性。

表 3 红边参数的定义

Table 3 Definition of red edge parameters

名称 Name	参数 Parameter	定义 Definition	文献来源 Reference
红边位置 Red edge position	REP	680—750 nm 光谱反射率的一阶微分值达到最大时所对应的波长	[31]
红边面积 Area of red edge	Area	680—750 nm 红边光谱一阶微分值的和	[32]
红边振幅 Differential value of red edge	Dr	红边区域内一阶微分光谱值的最大值	[33]
红谷位置 Location	Lo	680—750 nm 光谱反射率的一阶微分值达到最小时所对应的波长	[34]

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆填埋量对土壤水盐运移的影响

#### 2.1.1 土壤含水量

图 1 所示,CK 代表了自然条件下,各层土壤的含水量从地表向地下深层先逐渐降低,在 40—60 cm 达到最低点,然后随土壤层次的加深而增加,总体上,深层土壤的水含量高于浅层。 $T_1$  和 CK 土壤水分含量在 0—20 cm 差异显著 ( $P<0.05$ ),在其余土壤层次均无明显差异,表明秸秆填埋量  $T_1$  对于土表下层的土壤含水量分布没有影响。 $T_3$  和  $T_4$  显著提高了 20—80 cm 土层含水量 ( $P<0.05$ ),并且改变了地下土壤水分分布情况,使得各土层土壤含水量从地表向地下深层先逐渐升高,在 40—60 cm 达到最高点后,在深层有所略微降低,但都显著高于其他处理 ( $P<0.05$ )。 $T_2$  也显著提高了 20—60 cm 的含水量 ( $P<0.05$ ),但对 60—80 cm 含水量无显著影响 ( $P>0.05$ )。 $T_3$  和  $T_4$  在 80—100 cm 的土壤水分含量显著低于其他处理 ( $P<0.05$ )。

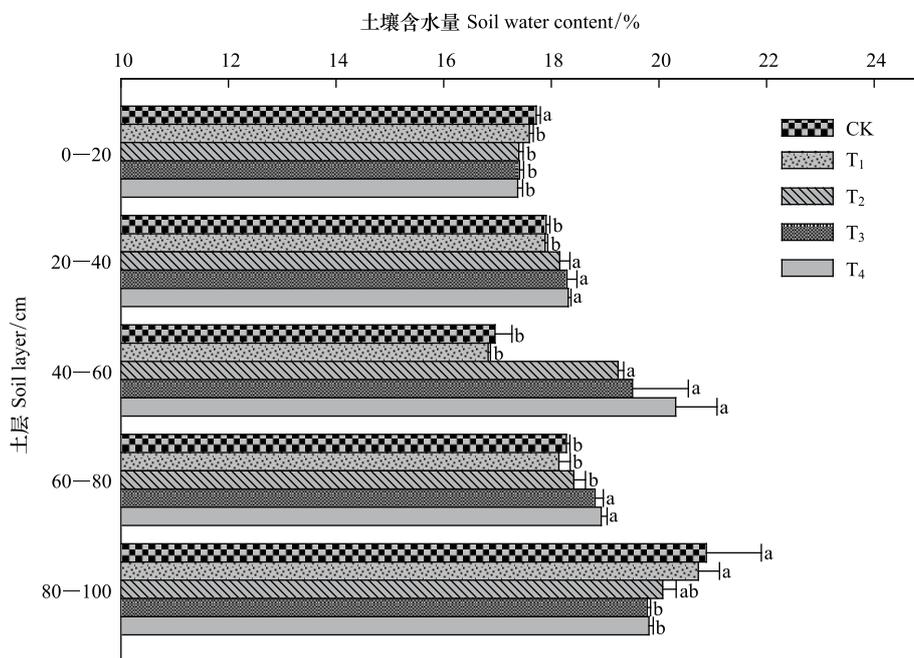


图 1 不同秸秆填埋量下 0—100 cm 土层土壤水分含量

Fig.1 Soil water content of 0—100 cm soil layer with different straw burying amount

不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ); CK: 空白对照, blank control;  $T_1$ : 填埋秸秆 2000 kg/hm<sup>2</sup>, bury straw 2000 kg/hm<sup>2</sup>;  $T_2$ : 填埋秸秆 7000 kg/hm<sup>2</sup>, bury straw 7000 kg/hm<sup>2</sup>;  $T_3$ : 填埋秸秆 12000 kg/hm<sup>2</sup>, bury straw 12000 kg/hm<sup>2</sup>;  $T_4$ : 填埋秸秆 17000 kg/hm<sup>2</sup>, bury straw 17000 kg/hm<sup>2</sup>

### 2.1.2 土壤盐分含量与盐溶质浓度

由表 4 可以看出,CK 代表了自然状况下,由于盐分表聚现象的发生,地下水位高,矿化度大,导致盐分含量在地下土层的垂直空间上表现为底层和表层高,中间层低的状态。 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  与 CK 相比均能明显降低各层的盐分含量( $P<0.05$ ),改变盐分在垂直空间上的分布情况,各层之间相比,0—20 cm 与 40—60 cm 的盐分含量处于较高水平,原因是秸秆隔层的孔隙度较大,填埋秸秆后有效促进了盐分被灌溉水淋洗到秸秆层以下。但  $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  之间在 0—80 cm 的土壤盐分无明显差异( $P<0.05$ )。 $T_1$  盐分含量与 CK 之间均无明显差异( $P>0.05$ ),表明秸秆填埋量过少不能发挥控盐作用。

$T_2$  和  $T_3$  能显著降低各个土层盐溶质浓度( $P<0.05$ ),其根部土层 20—60 cm 盐溶质浓度比 CK 低 59.30%,使土层土壤盐溶质浓度处于较低水平,受盐胁迫程度要低于其他处理,有效改善了垂柳生长的土壤环境,但两处理间无显著差异( $P>0.05$ )。 $T_4$  也能降低土层总盐溶质浓度,但在 20—40 cm 和 60—100 cm 的效果不如  $T_2$  和  $T_3$ 。 $T_1$  土壤各层的盐溶质浓度与 CK 相比均无明显差异( $P>0.05$ )。

表 4 不同秸秆填埋量下 0—100 cm 土层土壤盐分含量及盐溶质浓度

Table 4 Soil salt content and soil salt solute concentration of 0—100 cm soil layer with different straw burying amount

项目 Item	处理 Treatments	土层 Soil layer/cm				
		0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
盐分含量 Salt content/(g/kg)	CK	3.6475±0.6281a	3.1952±0.4461a	2.6965±0.2311a	2.7648±0.1457a	2.8309±0.4099a
	$T_1$	3.7109±0.1774a	2.8997±0.2082a	2.5675±0.2416a	2.5728±0.1675a	2.6181±0.1627a
	$T_2$	2.0917±0.2627b	1.4944±0.2468b	1.5664±0.1511b	1.3125±0.1930b	1.3536±0.0989c
	$T_3$	2.2469±0.0275b	1.2379±0.0384b	1.4757±0.2417b	1.2277±0.1218b	1.4176±0.2868c
	$T_4$	2.0885±0.1645b	1.5136±0.0836b	1.5136±0.3758b	2.1024±0.2557b	1.8128±0.1492b
盐溶质浓度 Salt solute concentration/(g/L)	CK	2.0922±0.4606a	1.8332±0.2897a	1.6023±0.1678a	1.5118±0.0959a	1.5421±0.2815a
	$T_1$	2.1154±0.1293a	1.6496±0.1188a	1.5697±0.1448a	1.4145±0.1309a	1.4236±0.1068a
	$T_2$	1.2701±0.1392b	0.7665±0.1296b	0.7865±0.0861b	0.6880±0.1088c	0.7250±0.0676c
	$T_3$	1.2882±0.0234b	0.6874±0.0230b	0.7098±0.1641b	0.7049±0.0684c	0.8243±0.1269c
	$T_4$	1.1922±0.1153b	0.8186±0.0517a	0.6497±0.1049b	1.2005±0.1530b	0.9726±0.0798b

同列具有不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )

## 2.2 不同秸秆填埋量对地上垂柳叶片反射光谱的影响

### 2.2.1 垂柳叶片反射光谱特征

图 2 所示,不同处理下的垂柳反射光谱曲线在光合有效辐射 380—710 nm 内和近红外区 780—1000 nm 有差异。不同处理情况下垂柳反射光谱曲线的整体趋势表现出一定的规律,符合典型的盐生植物反射光谱特征。可见光 400—760 nm 内,由于叶绿素对绿色光具有强烈的反射作用,而强烈吸收蓝色光与红色光波段的光进行光合作用,因此绿光区 550 nm 处有一个小的反射峰,蓝光区 450 nm 和红光区 670 nm 附近有两个吸收谷。近红外光内,700—800 nm 有反射的陡坡,在 800—1000 nm 附近处于较高水平。这主要是由于叶片的海绵组织对 800—1000 nm 处的近红外波段强烈反射作用,导致光谱曲线上形成了最高反射峰。

### 2.2.2 反射光谱的一阶导数

光谱噪声会对光谱微分技术造成影响,采样时的光照情况、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。而通过微分变换,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,表现出相似

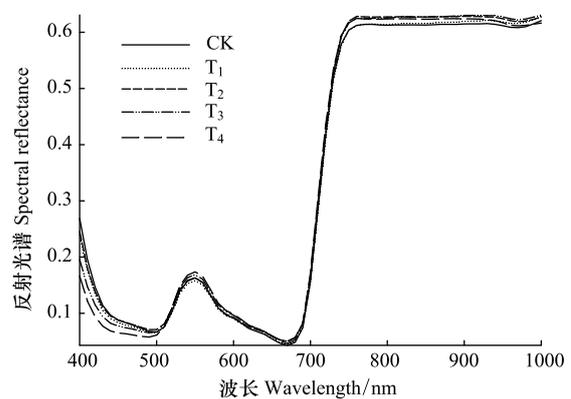


图 2 不同秸秆填埋下垂柳反射光谱曲线

Fig.2 The spectral reflectance curve of *Salix babylonico* leaves in different straw burying amounts

的光谱特征,提高生化参数的监测效果<sup>[35-36]</sup>。由图3红光波段的反射光谱一阶导数曲线可以看出,5种处理的在680—750 nm 的红光区范围内出现峰值,但峰顶点所对应的波长位置有明显差异,与CK的峰顶点所对应的波长位置相比, $T_4$ 在CK的短波方向,其他三种处理都处于CK的长波方向。按各处理峰顶点所对应的波长位置大小顺序是: $T_2 > T_3 > T_1 > CK > T_4$ 。

### 2.2.3 红边参数

红边特征是植物反射光谱中最明显的光谱特征之一,红边参数与其他光谱参数相比,优势是不受叶片结构如叶片表面反射率的影响,因此能适用于更为广泛的叶片结构<sup>[26]</sup>。根据公式计算出反射光谱的一阶导数,在680—750 nm 确定红边参数。红边参数是反映生物和非生物胁迫的重要指标<sup>[22]</sup>。由图4可以看出,不同处理的红边位置经过多重比较分析表明, $T_2$ 的红边位置、红边幅值以及红边面积都显著大于其他处理( $P < 0.05$ ),而红谷位置处于最低水平。处理 $T_3$ 的红边位置低于处理 $T_2$ ( $P < 0.05$ ),两处理间其他参数并不存在显著差异( $P > 0.05$ )。处理 $T_1$ 与CK除红谷位置外,其他几种红边参数均无显著差异( $P > 0.05$ )。

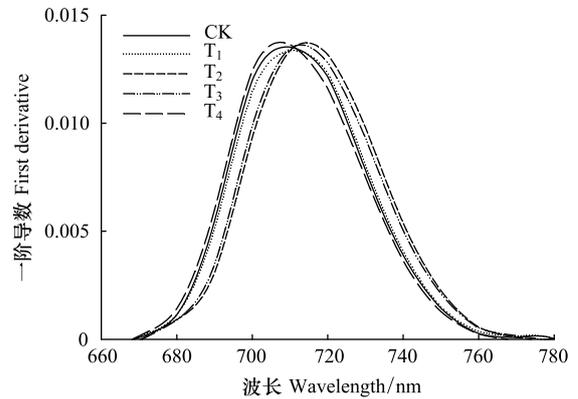


图3 不同秸秆填埋量下垂柳红光波段(680—750 nm)的一阶导数

Fig.3 First derivative in red area (680—750 nm) of *Salix babylonico* leaves in different straw burying amounts

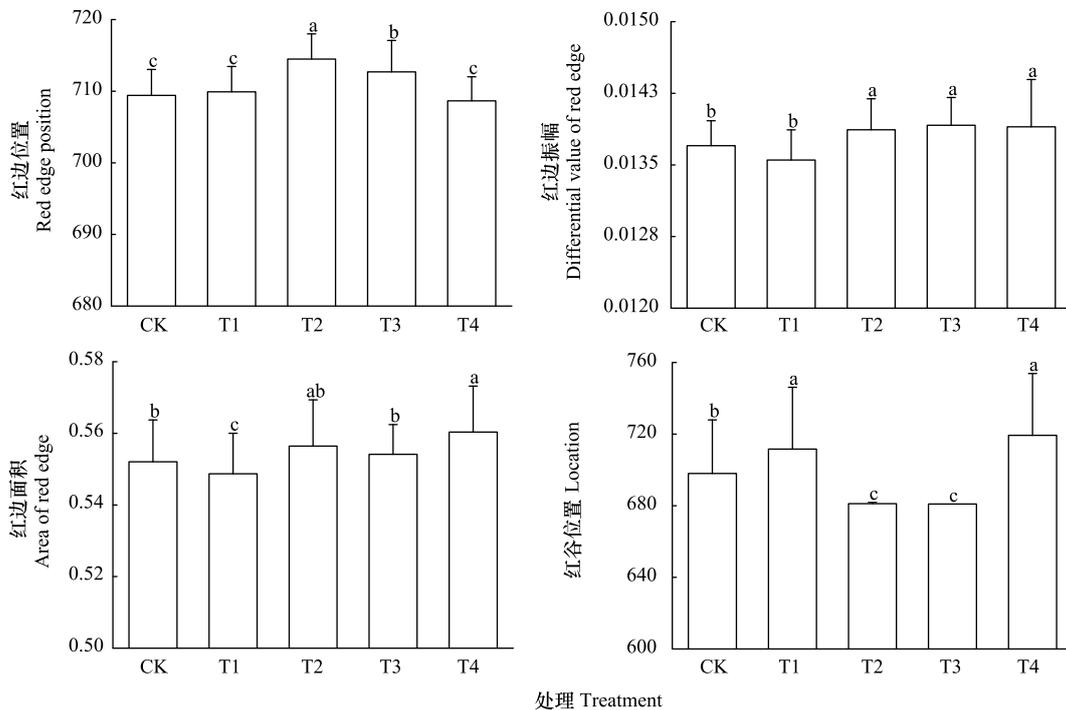


图4 不同处理的垂柳叶片红边参数变化

Fig.4 Changes of the red edge parameters of *Salix babylonico* leaves in different treatments

### 2.2.4 与叶绿素相关的光谱参数

不同秸秆填埋量对地下土壤各层的水盐调控程度不同,造成各处理的地下土壤环境条件不同,从而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,导致垂柳叶片反射光谱参数发生变化(表5)。

叶绿素归一化指数(Chl NDI)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>[25-26]</sup>。如

表 5 所示,方差分析表明, $T_2$ 与 $T_3$ 的 Chl NDI 值均大于其他处理( $P<0.05$ ); $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 和 $T_4$ 的  $mSR_{705}$  值之间差异显著且均显著大于 CK( $P<0.05$ ),其大小关系为  $T_3>T_2>T_4>T_1>CK$ 。绿色归一化差值植被指数(Green NDVI)以及改良红边归一化植被指数( $mND_{705}$ )都与叶绿素含量具有很高的相关性<sup>[22,25-26]</sup>。方差分析表明,几种处理的  $mND_{705}$  和 Green NDVI 差异水平结果相同, $T_2$ 与 $T_3$ 均大于其他处理( $P<0.05$ ),其中  $T_2$ 最大,表明  $T_2$ 具有更高的叶绿素含量。而 CK 与  $T_1$ 之间无明显差异( $P>0.05$ ), $T_4$ 显著低于其他处理( $P<0.05$ )。表明通过在地下填埋一定量的秸秆可以显著提高垂柳叶片的叶绿素含量,总体来说, $T_2$ 与 $T_3$ 效果较好。

表 5 不同处理垂柳叶片叶绿素相关光谱指数变化

Table 5 Changes of the reflectance spectrum parameters related to chlorophyll of *Salix babylonico* leaves in different treatments

处理 Treatment	与叶绿素相关的反射光谱参数 The reflectance spectral parameters related to chlorophyll			
	Chl NDI	$mSR_{705}$	Green NDVI	$mND_{705}$
CK	0.4631±0.0359c	1.6395±0.1085e	0.5754±0.0324ab	0.5959±0.0515c
$T_1$	0.4740±0.0382b	1.7220±0.1250d	0.5854±0.0349a	0.6008±0.0531c
$T_2$	0.5418±0.0349a	1.8971±0.1381b	0.5921±0.0362a	0.7074±0.0506a
$T_3$	0.5240±0.0522a	1.9691±0.2229a	0.5791±0.0485ab	0.6566±0.0683b
$T_4$	0.4452±0.0343d	1.8246±0.1151c	0.5622±0.0362b	0.5271±0.0451d

同列具有不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。Chl NDI:叶绿素归一化指数,Chl normalized difference index; $mSR_{705}$ :改良归一化差值指数,Modified red edge ratio;Green NDVI:绿色归一化差值植被指数,Green normalized difference index; $mND_{705}$ :改良红边归一化植被指数,Modified red edge normalized difference vegetation index

### 2.2.5 其他光谱参数

结构无关色素指数(SIPI)与植物衰老反射指数(PSRI)都是与类胡萝卜素的含量高度相关的指数<sup>[27-28]</sup>。由表 6 可以看出, $T_4$ 、 $T_3$ 、 $T_2$ 和 $T_1$ 的 SIPI 都显著比 CK 的大( $P<0.05$ ),其大小关系为  $T_4>T_3>T_1>T_2>CK$ ,表明 4 种填埋秸秆的处理其地上垂柳的类胡萝卜素与叶绿素比值要比未填埋秸秆的高。各处理的 PSRI 之间差异也显著( $P<0.05$ ),大小关系排序与 SIPI 的相同,进一步说明了填埋一定量的秸秆可以显著提高了其地上垂柳叶片的类胡萝卜素与叶绿素比值,其中  $T_4$ 与 $T_3$ 效果较好。

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>[29]</sup>。表 5 中  $T_1$ 、 $T_4$ 和 CK 的 PRI 之间无显著差异( $P>0.05$ ),而  $T_2$ 与 $T_3$ 显著高于其他处理( $P<0.05$ ),表明  $T_2$ 和 $T_3$ 比其他处理的地上垂柳光合速率水平要高。水分指数(WI)与植物水分浓度(PWC, Plant water concentration)有很高的相关性<sup>[30]</sup>,表 6 中  $T_2$ 、 $T_3$ 和 $T_4$ 的 WI 要显著大于 CK 与  $T_1$ ( $P<0.05$ ),表明填埋秸秆对地上植物水分浓度含量有显著影响,填埋适量的秸秆可以提高地上垂柳的植物水分浓度。

表 6 不同处理垂柳叶片反射光谱参数变化

Table 6 Changes of other reflectance spectrum parameters of *Salix babylonico* leaves in different treatments

处理 Treatment	反射光谱参数 Reflectance spectral parameters			
	类胡萝卜素相关 Related to carotenoid		光合作用相关 Related to photosynthesis	水分相关 Related to water
	SIPI	PSRI	PRI	WI
CK	0.9229±0.0073e	-0.0305±0.0042e	0.0310±0.0138c	1.0104±0.0031d
$T_1$	0.9367±0.0056c	-0.0251±0.0027c	0.0295±0.0095c	1.0062±0.0020e
$T_2$	0.9313±0.0063d	-0.0269±0.0034d	0.0623±0.0077a	1.0149±0.0033b
$T_3$	0.9518±0.0056b	-0.0207±0.0021b	0.0543±0.0086b	1.0114±0.0025c
$T_4$	0.9772±0.0050a	-0.0136±0.0021a	0.0311±0.0071c	1.0203±0.0025a

同列具有不同字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。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;WI:水分指数,Water index

### 3 讨论

在西北盐化生态脆弱区,限制植被成活及生长的关键因子是水分和盐分,土壤的水盐运动情况非常复杂,并且水和盐之间还存在某种潜在关联,盐分以水为载体,随着水的运动而迁移<sup>[4]</sup>。本试验中除 T<sub>1</sub>外,其他处理与对照组相比,均显著提高了对盐分的淋洗作用,同时又抑制了根部盐分积聚,达到了良好的控盐抑盐效果,这与 Pang 的研究结果相符<sup>[24]</sup>。通过在栽植穴填埋秸秆能够减轻土壤盐化程度的原因分为两个方面<sup>[5-10]</sup>:一方面,填埋的秸秆隔层能够抑制潜水上升,起到了隔盐垫层的作用。秸秆与土壤相比,孔隙度大,毛管力弱,填埋的秸秆隔离垫层有效切断了土壤水盐运移的土壤毛细管路径,抑制了盐分随水分蒸发上移,从而降低了地表聚盐。另一方面,填埋秸秆后提高了盐分淋洗并抑制根部盐分积聚。填埋秸秆后,提高了土壤孔隙度,配合降水或灌溉,由于重力作用秸秆层上方的土壤盐分被淋洗并滞留到秸秆层下方,从而降低了植被根区土壤盐分浓度。对照组没有填埋秸秆,虽然经过灌溉后的淋洗作用使土壤中盐分含量暂时下降,但由于没有秸秆隔层阻隔地表返盐,经过一段时间强烈蒸发,土壤表层又逐渐恢复到了原有盐化程度。本试验中 T<sub>1</sub>没有产生控盐抑盐效果,可能是由于填埋秸秆的量太少导致的。

本试验所在的西北半干旱地区,降水少,蒸发量大,自然降水的大量无效蒸发是限制本地区植被成活的重要原因。在试验中,除 T<sub>1</sub>外其他三种填埋秸秆的处理,其秸秆层上方含水量显著增高,赵永敢等人也得出类似的研究结果<sup>[9]</sup>。这是由于土壤中的填埋的秸秆层具有阻水性和减渗性,秸秆层对下渗水产生了一定的滞留作用,填埋秸秆后,下渗水量和下渗速率明显减小。另外,填埋秸秆还改变了各层土壤含水量的分布情况,本研究表明秸秆所具有的持水性使其所在土层的土壤含水量明显增高,并且增加秸秆填埋量可以提高地下土壤总含水量,这对于植物的生长非常有利<sup>[8]</sup>。

利用传统的化学分析法检测植物生理状况,虽然结果准确,但操作步骤繁琐,花费时间较长,还会对植物造成一定的损伤,也无法对同一植物生长状况、光合作用、受胁迫情况等长期动态监测<sup>[22]</sup>。而用光谱分析法测定色素含量不仅快速、无损、准确,并且高效,通过一次测定就能分析多种色素含量、水分含量以及光合等生理状况。当植物衰老、患病、营养缺失以及遭受周围环境胁迫时,会引发体内光合色素含量及组成的变化,如较高的盐胁迫和较差营养状况都会导致植物叶片的光合色素含量降低,因此植物组织中光合色素含量是体现植物生理状况的重要指标<sup>[37]</sup>。同时,叶片中光合色素含量变化不仅可以反映出植物的生长和营养状况,还可以反映出植物对环境因子的响应<sup>[37]</sup>。水分指数(WI)是由 Peñuelas 等人建立,可准确的反映叶片水势、气孔导度和细胞壁弹性,可应用于植物叶片含水量的长期动态监测。从本试验所得的地下土壤水分含量及地上植物叶片的 WI 结果来看,处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和 T<sub>4</sub>的与空白对照组相比,显著提高了地下蓄水量和地上植被叶片含水量,表明填埋秸秆作隔离垫层对缓解了干旱与半干旱植被缺水问题有积极的作用。

由反射光谱参数反映的结果来看,本文利用同类型的反射光谱参数所得结果有些许差别,这是由于每种光谱参数建立时采用的植被叶片结构和考虑的主要影响因素是不同的,因此各光谱参数对不同叶片结构如叶片的厚度、蜡质层、叶表皮厚度和表皮毛等的敏感性也是不同的,分析时还是要综合多种反射光谱参数的结果<sup>[26]</sup>。本研究中,处理 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>和 T<sub>4</sub>的地下盐分含量较对照组和 T<sub>1</sub>低,处理 T<sub>2</sub>和 T<sub>3</sub>光合色素含量和光合速率较高,处理 T<sub>2</sub>与 T<sub>4</sub>的叶片水分含量较高,综合多种反射光谱参数的结果,处理 T<sub>2</sub>的地上垂柳生理状态最好。而处理 T<sub>4</sub>的地下土壤盐分含量与对照组相比处于较低水平,但由其地上叶片反射光谱参数反映出其叶片光合色素含量少,光合速率低,可能是由于秸秆填埋量过多,影响垂柳根部吸收土壤养分导致的。大量研究表明,盐胁迫与反射光谱具有一定的相关性,土壤盐分浓度过高会降低地上植物色素含量和净光合作用,抑制植物生长发育。如吴寿国等通过研究不同浓度海盐对绿竹叶片的反射光谱的影响发现,高盐胁迫会抑制绿竹叶片光合色素的合成,降低光能吸收能力,导致叶片发生光抑制,直接抑制绿竹的生长发育<sup>[35]</sup>。与室内设置不同盐浓度梯度的试验不同,野外试验不同处理下的土壤水盐,养分空气,温度等都不相同,地上植物的生理状况是土壤生长环境条件的综合体现,因此地下土壤盐离子浓度与地上植物的反射光谱相关性研究不适用于本

试验。

#### 4 结论

填埋一定量的秸秆作隔盐垫层可以改变地下土壤水盐的剖面分布特征。 $T_2$ 、 $T_3$ 和 $T_4$ 处理与对照组相比,20—80 cm 土层土壤含水量都显著提高,填埋的秸秆层起到了蓄水保墒的作用;都明显降低了0—80 cm 土层土壤盐分含量和盐溶质浓度,使根层土壤保持较低盐分环境,减轻了高盐胁迫对垂柳生长的抑制作用。 $T_1$ 由于填埋秸秆量过少,无显著蓄水控盐效果。 $T_2$ 、 $T_3$ 和 $T_4$ 处理都起到了蓄水控盐的效果,但三种处理之间无显著差别。

通过检测植物叶片反射光谱可以反映出地上植物生长及生理状况的变化。本研究表明,不同秸秆填埋量对地上植物叶片反射光谱影响是不同的,填埋一定量的秸秆作为隔盐垫层有助于改善垂柳的生理状况。本研究中填埋秸秆的4种处理, $T_2$ 的垂柳叶片光合色素含量最高,光合特性及营养状况最好,其他光谱参数结果都显著提高。 $T_3$ 显著提高垂柳叶片叶绿素含量和光合特性,但效果均不如 $T_2$ ,且营养状况差。 $T_4$ 处理类胡萝卜素含量与叶片水分含量均处于最高水平,但叶绿素含量、营养状态以及光合特性都显著降低。 $T_1$ 处理效果最差。

在地下填埋秸秆作隔盐层,会通过地下土壤水盐运移及微域生态系统环境的调节,影响到地上植物生长及生理状况。综合地下水盐分布与地上植物叶片反射光谱的结果, $T_2$ 是宁夏引黄灌区盐碱地改良中最适宜的秸秆填埋量。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Qadir M, Tubeileh A, Akhtar J, Larbi A, Minhas P S, Khan M A. Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification. *Land Degradation & Development*, 2008, 19(4): 429-453.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 曹帮华, 吴丽云, 宋爱云, 于学宁, 郝木征, 扈明明. 滨海盐碱地刺槐(*Robinia pseudoacacia*)混交林土壤水盐动态. *生态学报*, 2008, 28(3): 939-945.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] Sadegh-Zadeh F, Seh-Bardan B J, Samsuri A W, Mohammadi A, Chorom M, Yazdani G A. Saline soil reclamation by means of layered mulch. *Arid Land Research and Management*, 2009, 23(2): 127-136.
- [ 7 ] Zhao Y G, Pang H C, Wang J, Huo L, Li Y Y. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield. *Field Crops Research*, 2014, 161: 16-25.
- [ 8 ] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 黄玮. 秸秆深层覆盖对水分入渗及蒸发的影响. *中国水土保持科学*, 2006, 4(2): 34-38.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 张金珠, 王振华, 虎胆·吐马尔白. 具有秸秆夹层层状土壤—垂直入渗水盐分布特征. *土壤*, 2014, 46(5): 954-960.
- [ 11 ] 乔海龙, 刘小京, 李伟强, 黄玮, 李存桢, 李志刚. 秸秆深层覆盖对土壤水盐运移及小麦生长的影响. *土壤通报*, 2006, 37(5): 885-889.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Yazdanpanah N, Pazira E, Neshat A, Mahmoodabadi M, Sinobas L R. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (II): impact on nitrogen, phosphorous and potassium redistribution and on microbial respiration. *Agricultural Water Management*, 2013, 120: 39-45.
- [ 14 ] Youngs E G, Leeds-Harrison P B. Improving efficiency of desalinization with subsurface drainage. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2000, 126(6): 375-380.
- [ 15 ] 杨世琦, 王永生, 韩瑞芸, 谢晓军, 杨正礼. 宁夏引黄灌区秸秆还田对麦田土壤硝态氮淋失的影响. *生态学报*, 2015, 35(16): 5537-5544.
- [ 16 ] Wang S J, Chen Q, Li Y, Zhuo Y Q, Xu L Z. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum. *Resources, Conservation and*

- Recycling, 2017, 121: 82-92.
- [17] Qadir M, Schubert S, Ghafoor A, Murtaza G. Amelioration strategies for sodic soils: a review. *Land Degradation & Development*, 2001, 12(4): 357-386.
- [18] Peñuelas J, Filella I. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 1998, 3(4): 151-156.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *New Phytologist*, 1999, 143(1): 105-117.
- [22] 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.
- [23] Madeira A C, Mentions A, Ferreira M E, de Lourdes Taborda M. Relationship between Spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(5/6): 631-643.
- [24] 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, 97(12): 1971-1977.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indexes to assess carotenoids/chlorophyll *a* ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221-230.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, Filella I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2869-2875.
- [31] Horler D N H, Dockray M, Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 273-288.
- [32] Elvidge C D, Chen Z K. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(1): 38-48.
- [33] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(7): 1459-1470.
- [34] Boochs F, Kupfer G, Dockter K, Kühbauch W. Shape of the red edge as vitality indicator for plants. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(10): 1741-1753.
- [35] 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.
- [36] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 买买提·沙吾提, 桂东伟. 塔里木河中游绿洲盐漠带典型盐生植物光谱特征. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 607-617.
- [37] 彭涛, 李鹏民, 贾裕娇, 高辉远. 介绍两种无损伤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.