

滨海盐碱地隔盐改良对两种草本地被的光合特性影响

冷寒冰, 马利静, 秦 俊*

(上海植物园, 上海城市植物资源开发应用工程技术研究中心, 上海 200231)

摘 要: 在上海崇明岛瀛东村研究碎石铺设盐碱土改良措施对土壤 EC 值的影响, 以及土壤盐分变化对紫鸭趾草(*Setcreasea purpurea* B.K.Boom)和中华常春藤(*Hedera nepalensis* var.*sinensis*)两种植物光合特性的影响。结果表明:实施土壤改良措施后,不同处理间 EC 值差异逐渐显著。土壤 EC 值的变化对紫鸭趾草的净光合速率和蒸腾速率影响不大,而对中华常春藤影响显著。在光响应曲线和参数比较中,采用非直角双曲线模型模拟,光响应曲线的变化趋势基本一致;在同等光合有效辐射(PFD)时 P_n 值表现为 4 cm 铺设厚度>2 cm 铺设厚度>0 cm 铺设厚度。随着土壤盐分浓度降低,紫鸭趾草和中华常春藤的最大净光合速率(A_{max})、表观量子效率(AQY)、光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)均逐渐升高。紫鸭趾草的光合作用对土壤盐分具有较强的适应性,并对强光保持了很强的利用能力,但对弱光的调节作用不显著,而中华常春藤适应性较弱,对强光的利用能力较低,但对弱光利用能力强。总之,两种植物的光合适应性均受到土壤盐分的影响,紫鸭趾草比中华常春藤适应性更强。在盐碱地植物应用中从光合特性考虑,紫鸭趾草更适应当地土壤,但通过碎石铺设盐碱土改良技术,降低土壤盐分浓度后,亦可提高植物对光环境的适应性。

关键词: 碎石铺设改良技术;土壤 EC 值;植物光合特性;光响应

中图分类号: Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)11-2136-06

Effects of Salt-isolation Treatments on Photosynthesis Characteristics of Two Herbaceous Ground Cover Plants in Coastal Saline-Alkaline Land

LENG Han-bing, MA Li-jing, QIN Jun*

(Shanghai Botanical Garden, Shanghai Engineering Research Center of Sustainable Plant Innovation, Shanghai 200231, China)

Abstract: The effect of amelioration methods of stone paving on soil EC value had been studied in Yingdong Village on Shanghai Chongming Island, which also affected photosynthetic characteristics of *Setcreasea purpurea* B.K.Boom and *Hedera nepalensis* var.*sinensis*. In this study, we used stone paving measure to reduce soil salinity and EC values. The different treatments showed significant difference. The influence of soil EC value changes on the net photosynthetic rate and transpiration rate of *Setcreasea purpurea* B.K.Boom was not distinguished as opposed to *Hedera nepalensis* var.*sinensis*. The light response curves and several parameters of photosynthesis were measured, and by nonrect-angular hyperbola model showed a similar trend under different EC values. P_n of two herbaceous ground cover plants under stone paving thickness for 4 cm>that under thickness for 2 cm>that under thickness for 0 cm at the same PFD was represented. The decreasing soil salinity influenced by soil amelioration caused the fact that maximum net photosynthetic rate, apparent quantum yield, light saturation point and light compensation point of two kinds of plants gradually increased, respectively. Compared to *Hedera nepalensis* var.*sinensis*, *Setcreasea purpurea* B.K.Boom showed the stronger adaptability of its photosynthesis to soil salinity and it maintained the significant ability to use strong light, but had insignificant ability to use weak light. Whereas *Hedera nepalensis* var.*sinensis* showed the opposite results that the ability of using strong light was less than that of using weak light. Consequently, photosynthetic adaptability of *Setcreasea purpurea* B.K.Boom was better than *Hedera nepalensis* var.*sinensis*. Affected by soil salinity, *Setcreasea purpurea* B.K.Boom was more adapted to local soil. The amelioration methods could help reducing soil salinity and also enhance the adaptability of plants to light environment.

Keywords: amelioration methods of stone paving; soil EC value; plant photosynthesis; response of net photosynthetic rate

收稿日期: 2012-04-19

基金项目: 上海市科委重大攻关项目(11dz1211404, 10dz1200905); 上海市绿化和市容管理局重大项目(G102407)

作者简介: 冷寒冰(1983—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为植物生理生态学。E-mail: 008slhb@163.com

* 通信作者: 秦 俊 E-mail: qinjun03@126.com

盐碱地是指土壤中含有过量可溶性盐类的土地,不适合植物尤其是农作物的生长^[1]。在全球的干旱和半干旱地区,约有50%的灌溉土地受到盐碱化的影响,区域内的非灌溉土地同样会发生盐碱化^[2]。高浓度的盐分会对栽植的植物产生影响,抑制了植物的生长和发育,并引起代谢失调、光合作用受阻、呼吸作用改变、蛋白质合成降低且分解增加、有毒物质积累^[3],严重的会造成植物萎蔫、中毒和烂根死亡,所以采用水利改良、化学改良、生物改良和物理改良等方法为植物生长创造良好水、盐、肥、气环境^[4]。

上海市崇明县滨海地区新围垦的土地盐分含量高,肥力低,难以作为农业用地^[4]。土壤高浓度盐分是崇明沿海地区影响树木光合作用的最重要的生态因子。紫鸭趾草和中华常春藤是应用广泛的强适性草本植物,为了丰富崇明岛植物种类,引入新品种,深入了解它们光合作用对土壤盐环境的反应,成为生理生态研究的重要内容之一。紫鸭趾草和常春藤光合方面的研究均不多,夏江宝等^[5]测定了不同水分梯度下常春藤等多种藤本植物的光合日变化和光响应过程;陈柯等^[6]人对中华常春藤等三种藤本植物进行光响应曲线、温度响应曲线和相对湿度响应曲线的测定,研究分析光强、温度和相对湿度对3种藤本光合特性的影响。

本实验通过铺设不同厚度碎石的盐碱土改良技术造成土壤电导率(土壤EC值)差异,研究不同土壤盐分条件下2种草本光合作用的差异以及对光强变化的响应和光响应特征参数的变化规律,以期研究盐碱地抗盐生理机制、降低土壤盐碱、提高植物生态适应性提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验地位于上海崇明县陈家镇瀛东村(31°27'N, 121°45'E),该地气候温和,四季分明,日照充足,属亚热带海洋性气候。供试土地为滨海盐碱土,pH值为7.92,EC值789 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,容重1.36 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质12.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮0.09%,碱解氮19.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷71.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾42.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

植物材料采用紫鸭趾草(*Setcreasea purpurea* B.K. Boom)多年生实生苗和中华常春藤(*Hedera nepalensis* var. *sinensis*)多年生扦插苗。田间试验地在自然土壤中埋入碎石层,碎石层底层距地面的施工深度为25 cm,碎石直径约为2 cm,试验设置3个碎石铺设处理,即0 cm铺设厚度(A1)、2 cm铺设厚度(A2)和4

cm铺设厚度(A3)。

每个处理1个小区,小区为1.5 m×5 m,小区内用砖分隔,3次重复。于2011年3月中旬进行田间定位试验,分别选择大小和长势一致的中华常春藤和紫鸭趾草进行种植。每个小区中华常春藤的种植面积为1.5 m×1.5 m,株行距为20 cm×30 cm;紫鸭趾草的种植面积为1.5 m×1.5 m,株行距为20 cm×20 cm。自植物种植日起,每45 d左右取小区土壤测定0~20 cm耕层土壤的EC值,即2011年4月29日、6月20日、8月3日、9月23日、10月28日5次取样,观察不同处理区EC值的变化情况,并于10月份选择晴朗天气进行光合光响应测定。

土壤EC值采用(土水体积比1:5)电导法测定,使用型号为DDS-307电导率仪,单位是 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

1.2 光合生理指标和光响应测定

2011年10月选择无雨、晴朗的天气,使用Li-6400便携式光合作用测定系统(Licor Inc., Lincoln, US-A),测定光合作用与蒸腾作用生理参数,每个处理3次重复。

取植株健康叶片,于08:00—11:30由Li-6400红蓝光源(Li-6400-02B)提供不同的光合有效辐射:2100、1800、1500、1200、1000、800、600、500、400、300、200、150、100、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,测定不同光强所对应的净光合速率。测定时设置叶温为18℃,气源CO₂浓度为400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,相对湿度为40%~60%。

1.3 计算及分析

绘制光合速率对光合有效辐射的光响应曲线,采用非直角双曲线模型进行模拟^[7-8]:

$$P_n = \frac{AQY \cdot PAR + A_{\max} - \sqrt{(AQY \cdot PAR + A_{\max})^2 - 4 \cdot AQY \cdot PAR \cdot A_{\max} \cdot k}}{2k} - R_{day}$$

式中: P_n 为净光合速率, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, PAR 为光合有效辐射, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; AQY 为表观量子效率, $\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$; $A_{\max}$ 为最大净光合速率, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; k 为光响应曲线曲角; R_{day} 为暗呼吸速率, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

模型参数用SPSS进行方差分析,Duncan法(取显著度为0.05)进行多重比较。

用Microsoft Excel 2007对数据进行整理和作图,用SPSS Statistics 17.0进行正交处理和曲线的模拟。

2 结果与讨论

2.1 不同改良措施下各月份土壤EC值差异比较

崇明生态发展面临的主要问题是盐碱土的改良,滨海地区新围垦的土地盐分含量高,肥力低。采用了

不同厚度的碎石铺设,结合人工灌溉进行土壤改良^[9],一方面使土壤中的盐分沿着土壤毛细管下渗,另一方面切断盐分上升通道,阻止土壤盐分向上迁移,控制地下水位上升速度,防止地表土壤积聚返盐^[10],从而降低土壤 EC 值。

如表 1 所示,土壤隔离经过 4 个月,不同处理间 EC 值差异逐渐显著。4 月份各处理间的土壤 EC 值差异性不大,范围在 450~500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间;6 月份由于长期天气炎热,蒸发积盐,又无有效降水淋沥盐分,造成土壤返盐,含盐量明显增加,总体土壤 EC 值偏高,处理间差异性不明显;8 月份盐分较 6 月份明显下降,其中 4 cm 铺设厚度显示出较好的防盐效果,与其他 2 种处理的土壤 EC 值差异显著($P<0.05$),EC 值分别为 0、2 cm 铺设厚度的 64.50%和 75.89%;9 月、10 月份碎石铺设对降低土壤盐分显示出了明显的作用,且碎石层加厚更有利于防止地表积盐,各处理间 EC 值差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同改良措施下两种植物光合速率与蒸腾速率对比

由图 1 可以看出,随着碎石铺设处理和 EC 值的变化,紫鸭趾草的净光合速率和蒸腾速率虽然有所升降,但经过方差分析,各处理之间变化未达到显著水平($P>0.05$)。中华常春藤在经过碎石铺设改善 EC 值

后,其 P_n 值和 Tr 值逐渐上升,各处理之间净光合速率差异显著,A1 的 P_n 值为 $2.53 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比 A2 和 A3 降低了 44.88%和 60.59%,蒸腾速率则表现出更明显的差异性,A1 的 Tr 值为 $0.55 \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比 A2 下降了 53.39%,比 A3 下降了 69.61%。说明经过碎石铺设,土壤 EC 值的变化对常春藤的光合特性产生了显著的影响,而对紫鸭趾草影响不显著。

盐分胁迫对非盐生植物的光合作用是抑制的,并且降低程度与盐浓度呈正相关,植物在土壤盐分过多的条件下,植物叶片气孔收缩,限制了 CO_2 向叶绿体的输送和叶片水分的蒸发,减少了植物光合作用中 CO_2 的获得,从而抑制了叶片的光合作用和蒸腾作用^[11-12]。不同类型植物抗盐碱能力不同,光合能力下降与植物种类以及盐的种类有关^[13-15]。铺设碎石土壤改良措施有利于降低土壤盐分,从而减少对常春藤光合特性产生的不利影响。

2.3 不同土壤改良措施下两种植物的光响应曲线

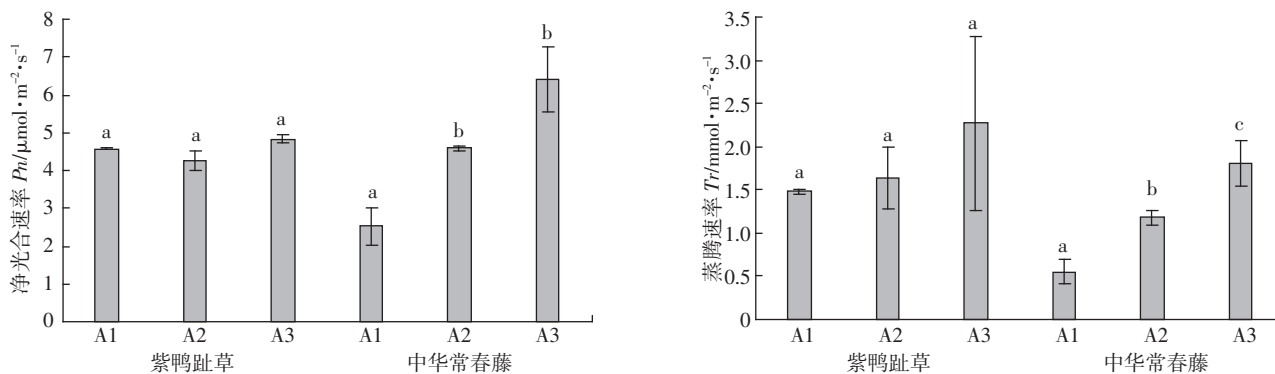
由图 2、图 3 可见,10 月份两种草本光响应曲线表现出不同土壤改良条件下净光合速率(P_n)随光合有效辐射(PFD)的变化趋势基本是一致的,在低 PFD 时 P_n 迅速增加,达到一定量后, P_n 增幅渐趋平缓甚至有下降趋势。采用非直角双曲线模型对植物的光响应曲线进行了模拟,能够较好地反映了叶片光合对光

表 1 不同监测月份的土壤 EC 值($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)

Table 1 Soil EC value in different monitored months

处理	4 月	6 月	8 月	9 月	10 月
0 cm 铺设厚度(A1)	496.33a	643.33a	353.00a	359.33a	250.36a
2 cm 铺设厚度(A2)	451.33a	594.33a	300.00a	230.33b	186.00b
4 cm 铺设厚度(A3)	473.83a	558.33a	227.67b	170.67c	157.43c

注:小写字母表示同一月份不同处理间差异显著($P<0.05$)。



不同小写字母表示同一植物不同处理间差异显著($P<0.05$)

图 1 不同 EC 值下两种植物净光合速率与蒸腾速率比较

Figure 1 Effect of soil EC value on P_n and Tr of two kinds of plant

的响应过程。

从 4 月份到 10 月份经过半年的土壤改良,EC 值从 $450\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右降低到 $200\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 左右,盐碱度大幅下降,但长时间的土壤盐碱已影响了植物的光合生理特性。10 月份,A1、A2 和 A3 的电导率分别达到 250.36 、 186.00 、 $157.43\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。在土壤盐碱度的影响下两种植物 P_n - PFD 曲线的高低呈相似变化规律,即在同等 PFD 时 P_n 值表现为 $4\ \text{cm}$ 铺设厚度 $>2\ \text{cm}$ 铺设厚度 $>0\ \text{cm}$ 铺设厚度(低盐度 $>$ 中盐度 $>$ 高盐度)。两种植物 P_n - PFD 曲线的高低变幅显示出较大的差异,反映出盐分对它们光能利用率影响的不同。从图 2、图 3 可以看出,当盐分较高时,中华常春藤表现出明显的光合生理不适,相较而言光合速率急剧下降,而紫鸭趾草则受影响较小,3 种处理的曲线比较接近;低盐度时两种植物均表现出较好的光能利用

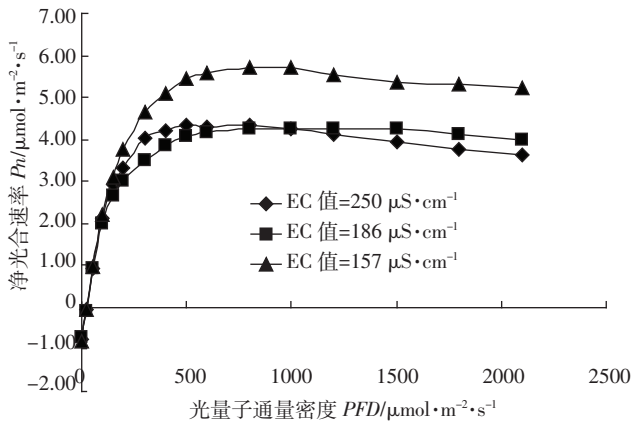


图 2 不同土壤改良措施下紫鸭趾草光响应过程

Figure 2 The response curves of net photosynthetic rate of *Setcreasea purpurea* B.K. Boom under different soil amelioration treatments

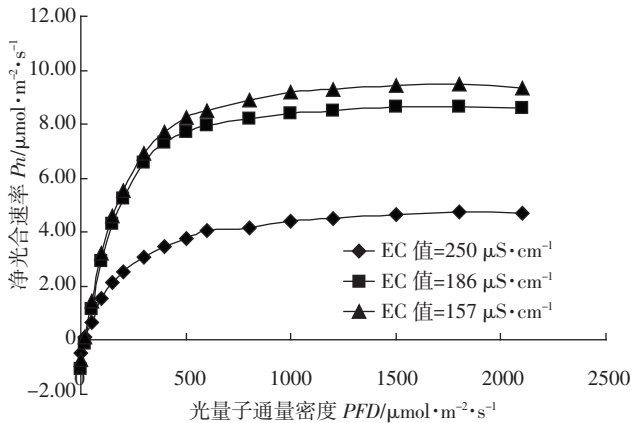


图 3 不同土壤改良措施下中华常春藤光响应过程

Figure 3 The response curves of net photosynthetic rate of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* under different soil amelioration treatments

率,最大净光合速率能够达到较高水平。可见碎石铺设的土壤改良法,能够有效降低盐碱地的盐含量,对植物生理光合特性产生了促进作用,增强植物的光合能力。

2.4 不同土壤盐分下两种植物叶片光合-光响应曲线特征参数

在一定的环境条件下,叶片的最大净光合速率($A_{\max}$)反映植物叶片的最大光合能力^[16]。表观量子效率(AQY),反映植物在弱光下吸收、转换和利用光能能力的指标^[17]。如表 2,紫鸭趾草和中华常春藤的 $A_{\max}$ 和 AQY 随着碎石厚度的减少和土壤盐分的增多均有所下降,但是紫鸭趾草各处理之间的差异并不具显著性,中华常春藤在 EC 值为 $250\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, $A_{\max}$ 和 AQY 与其他两个处理具显著差异。以降低幅度的平均值作为评价依据,对两种植物的抗盐适应性进行了比较,从 $A_{\max}$ 来看,紫鸭趾草平均降幅为 15.03% ,中华常春藤为 29.81% ;从 AQY 来看,仍然是紫鸭趾草平均降幅较少为 13.33% ,中华常春藤为 15.52% 。当植物受到盐分胁迫, $A_{\max}$ 和 AQY 依然能维持在较高水平,则表明其能有效地利用弱光及强光进行光合作用,对光的生态适应性强^[18]。可见在一定盐分范围内,较高的盐分浓度限制了中华常春藤光合潜力的发挥,其最大光合能力被抑制;并对弱光的利用能力产生显著的影响。紫鸭趾草相较中华常春藤而言,光合特性对盐碱土具有较强的适应能力。

暗呼吸速率(R_{day})反映植物在没有光照条件下的呼吸速率^[19]。中华常春藤各处理间显示出了显著的差异,受 $2\ \text{cm}$ 和 $4\ \text{cm}$ 铺设层的影响,其暗呼吸分别比无处理情况下升高了 48.98% 和 93.88% ,说明在一定的盐分浓度范围内,生理活性降低,使苗木呼吸减弱,可一定程度减少对光合产物的消耗,有利于过高盐浓度对苗木的不利影响。

光补偿点(LCP)是植物利用弱光能力大小的主要指标,该值越小表明利用弱光的能力越强。光饱和点(LSP)是植物利用强光能力大小的指标^[20-21]。紫鸭趾草在不同盐梯度下 LCP 无显著差异,而 LSP 随土壤盐分的增加,呈持续下降趋势,有无碎石处理差异明显。说明在一定的土壤盐分范围内,紫鸭趾草利用弱光的能力相对稳定,利用强光的能力在盐分浓度较大时会大幅降低。中华常春藤在 $0\ \text{cm}$ 和 $2\ \text{cm}$ 铺设厚度下,LCP 较 $4\ \text{cm}$ 铺设厚度连续降低,而 LSP 虽也有所下降,但差异性并不显著。说明中华常春藤对弱光的利用能力持续提高,对强光利用能力则显著降低。

表 2 不同 EC 值下两种植物叶片的光合生理参数(平均值±标准误差)

Table 2 Characteristic parameters of light response curves of two kinds of plant under different soil EC values(average value±standard error)

植物	EC/μS·cm ⁻¹	LSP/μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	LCP/μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	A _{max} /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	AQY/μmol·μmol ⁻¹	Rday/μmol·m ⁻² ·s ⁻¹
紫鸭趾草	250	331.8±65.2a	17.6±3.7a	3.97±0.10a	0.038±0.04a	-0.78±0.33a
	186	438.2±77.3ab	18.2±1.4a	3.99±1.03a	0.040±0.06a	-0.73±0.11a
	157	554.4±15.9b	19.6±6.1a	5.61±0.49a	0.045±0.08a	-0.81±0.24a
中华常春藤	250	789.6±7.3a	12.6±2.4a	4.10±0.55a	0.041±0.02a	-0.49±0.07a
	186	837.9±10.9a	12.6±0.3a	8.52±0.05b	0.057±0.01b	-0.73±0.02b
	157	915.6±80.0a	18.9±1.2b	8.99±0.18b	0.058±0.02b	-0.95±0.02c

注:A_{max}:最大净光合速率 Maximum net photosynthetic rate;AQY:表观量子效率 Apparent quantum yield;Rday:暗呼吸速率 Dark respiration rate;LCP:光补偿点 Light compensation point;LSP:光饱和点 Light saturation point。不同小写字母表示同一植物不同 EC 值下各处理间差异显著(P<0.05)。

两种植物对光环境的适应性均受到了土壤盐分的影响。紫鸭趾草和中华常春藤的 LSP 与 LCP 协同变化的不同,反映出它们对光环境的适应方式和适应性的差异。

3 结论

经过 4 个月隔离层的设置,不同土壤改良措施使得土壤 EC 值由较高盐浓度的无明显差异逐渐显示出显著的盐分下降趋势,改良效果明显。在土壤盐分逐渐降低后,中华常春藤的净光合速率和蒸腾速率均呈现出上升趋势,光响应曲线也表现出较高的光合能力,而紫鸭趾草则变化不甚明显,3 种处理的光响应曲线较为接近。两种植物对盐碱的适应性有所不同,铺设碎石土壤改良措施有利于降低土壤盐分,从而减少对常春藤光合特性产生的不利影响。总体而言,在各光合生理参数的比较中,紫鸭趾草除了光饱和点差异明显外,各处理间的其余参数变化不大,差异并不显著;中华常春藤的各参数差异明显,只有光饱和点无显著差异。这反映出它们光合特性对盐碱地环境适应方式的不同,紫鸭趾草更能适应较高浓度的土壤盐环境。因此,在盐碱地应用草本地被时,可采用碎石铺设等盐碱土改良技术,通过降低土壤盐浓度,提高植物对光环境的适应性,加强植物种类的推广应用。

参考文献:

[1] 王金才,尹莉.盐碱地改良技术措施[J].现代农业科技,2011(12):282-284.
WANG Jin-cai, YIN Li. Saline soil amelioration technique[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2011(12):282-284
[2] 王慧德.盐碱土在民勤的区域分布及改良利用意见[J].甘肃农业科技,1995(4):27-28.
WANG Hui-de. Saline-alkali soil distribution in Minqin district and view of improvement and utilization[J]. *Gansu Agricultural Sciences*,

1995(4):27-28.
[3] 李光道,白生才,张秀志,等.植物抗盐性研究综述[J].甘肃农业科技,2011(2):29-33.
LI Guang-dao, BAI Sheng-cai, ZHANG Xiu-zhi, et al. The review of plant salt resistance[J]. *Gansu Agricultural Sciences*, 2011(2):29-33.
[4] 张文俭,王磊,颜一青,等.不同农业耕作模式下崇明盐碱土壤低碳化改良效应的模型评价[J].农业环境科学学报,2010,29(5):1006-1014.
ZHANG Wen-jian, WANG Lei, YAN Yi-qing, et al. Assessment of different agricultural pattern for amelioration of salty soil by low carbon model in Chongming, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):1006-1014.
[5] 夏江宝,张光灿,许景伟.干旱胁迫下常春藤净光合速率日变化及其影响因子分析[J].水土保持通报,2010,30(3):1-6.
XIA Jiang-bao, ZHANG Guang-can, XU Jing-wei. Analysis of diurnal variation of net photosynthetic rate of *Hedera nepalensis* var. *sinensis* and impact factor under drought stress[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(3):1-6.
[6] 陈柯,王小德.常春油麻藤,中华常春藤和扶芳藤的光合特性比较分析[J].安徽农业大学学报,2008,35(2):196-199.
CHEN Ke, WANG Xiao-de. Comparative analysis on photosynthetic characteristics and shade tolerance between *Mucuna sempervirens*, *Hedera nepalensis* var. *sinensis* and *Euonymus fortunei*[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, 35(2):196-199.
[7] 张利平,王新平,刘立超,等.沙坡头主要建群植物油蒿和柠条的气体交换特征研究[J].生态学报,1998,18(2):133-137.
ZHANG Li-ping, WANG Xin-ping, LIU Li-chao, et al. Study on gas exchange characteristics of main constructive plants *A. ordosica* and *C. korshinskii* in Shapitou Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(2):133-137.
[8] 许红梅,高琼,黄永梅.黄土高原森林草原区 6 种植物光合特性研究[J].植物生态学报,2004,28(2):157-163.
XU Hong-mei, GAO Qiong, HUANG Yong-mei. Photosynthetic characteristics of six plant species in a forest steppe of the loess plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(2):157-163.
[9] Afifi M Y, Ahmed A T, Atiya N M. Effect of some management practices on regime of soils under irrigation with diluted sea-water[J]. *The Desert Institute Bulletin*, 1998, 38(1):413-424.

- [10] 耿美云, 刘慧民, 孙玉红. 天津市盐碱地区植物景观营造土壤改良措施[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(1): 140–144.
GENG Mei-yun, LIU Hui-min, SUN Yu-hong. Study on the soil improvement measure of the plant landscape construction in saline and alkaline area in Tianjin[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2007, 38(1): 140–144.
- [11] Iqbal M, Ashraf M. Changes in growth, photosynthetic capacity and ionic relations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) due to pre-sowing seed treatment with polyamines[J]. *Plant Growth Regulation*, 2005, 46: 19–30.
- [12] 张成军. 辽东栎林中四种木本植物幼苗对土壤干旱的生理生态响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.
ZHANG Cheng-jun. Ecophysiological responses to soil drought in four woody species seedling in *Quercus Liaotungensis* Forest [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2003.
- [13] 惠红霞, 许兴, 李守明. 盐胁迫抑制枸杞光合作用的可能机理[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 5–9.
HUI Hong-xia, XU Xing, LI Shou-ming. Possible mechanism of inhibition on photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 5–9.
- [14] Mickellber M V, Marler T F. Root zone sodium chloride influences photosynthesis, water relations, and mineral content of sapodilla foliage[J]. *Hort Science*, 1996, 31(2): 230–233.
- [15] 杜中军, 翟衡, 潘志勇, 等. 盐胁迫下苹果砧木光合能力及光合色素的变化[J]. 果树学报, 2001, 18(4): 200–203.
DU Zhong-jun, ZHAI Heng, PAN Zhi-yong, et al. Change of photosynthetic capability and pigment content of apple rootstocks under salt stress[J]. *Journal of Fruit Science*, 2001, 18(4): 200–203.
- [16] Iryna I T, Michael M B. Effect of delayed fruit harvest on photosynthesis' transpiration and nutrient remobilization of apple leaves[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(3): 441–450.
- [17] Li H S. Modern plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 125.
- [18] 韩刚, 赵忠. 不同土壤水分下4种沙生灌木的光合光响应特性[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4019–4026.
HAN Gang, ZHAO Zhong. Light response characteristics of photosynthesis of four xerophilous shrubs under different soil moistures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4019–4026.
- [19] Coley P D. Herbivory and defensive characteristics of tree species in a low land tropical forest[J]. *Ecological Monographs*, 1983, 53(2): 209–233.
- [20] Zhang S Y, Zhou Z F, Xia J B, et al. The responses of *Euonymus fortunei* var. *radicans* Sieb. leaf photosynthesis to light in different soil moisture [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(12): 2514–2521.
- [21] Wu W M, Li Z J, Luo Q H, et al. Effects of soil water stress on light response curves of photosynthesis of *Populus euphratica* and *Populus pruinosa*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(5): 30–35.