

滨海重盐碱地人工栽植柽柳生长动态及生态效应*

封晓辉^{1,2} 张秀梅¹ 刘小京^{1**} 程瑞梅³ 孙焕荣⁴

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022;
2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 北京 100091;
4. 河北省南皮县林业局 南皮 061500)

摘要 柽柳(*Tamarix chinensis*)是盐碱地土壤改良和植被构建的先导物种,但仅靠柽柳的自然扩散难以在滨海重盐碱地形成灌木优势群落,对盐碱地的改良作用不明显,因此探索重盐碱地人工栽植柽柳的生态效应具有重要意义。本研究以撂荒地作为对照,对不同树龄的人工柽柳群落的个体生物量、碳储量动态、植物物种组成及其重要值和土壤特性进行分析,以评估重盐碱地栽植柽柳的生态效应。结果显示:3年生、5年生和7年生柽柳个体单株生物量逐渐增加,群落的植被碳密度分别为4.78 t(C)·hm⁻²、5.56 t(C)·hm⁻²和6.89 t(C)·hm⁻²,而对照撂荒地碳密度只有0.98 t(C)·hm⁻²;与对照地相比,栽植柽柳显著降低了土壤表层的含盐量,对照地土壤0~10 cm的平均盐分含量高达10.53 g·kg⁻¹,而3年生、5年生和7年生0~10 cm土壤平均含盐量分别为3.35 g·kg⁻¹、1.86 g·kg⁻¹和5.54 g·kg⁻¹。栽植柽柳后土壤有机质和有效氮呈增高趋势,有效钾含量显著增加,7年生柽柳土壤0~5 cm和5~15 cm的有效钾含量分别比对照地高出65.59%和28.90%。随着柽柳树龄增加群落中草本植物的丰富度逐渐升高,对照地的草本物种只有8种,7年生柽柳群落达到15种;耐盐物种在群落中的重要值随着栽植的时间逐渐降低,盐地碱蓬的重要值由34.8下降到0.7,以种子兼营养繁殖的植物如獐毛和苦苣菜的优劣势逐渐增大。这证明,重盐碱地人工栽植柽柳可以快速构建灌木优势群落,固碳作用明显;同时栽植柽柳为生态系统提供了进展演替的动力,灌草结合的群落结构和稳定的群落环境不仅促进盐碱地土壤表层盐分含量的降低,也促进了物种多样性的增加和群落的进展演替,是提高滨海重盐碱地利用率的有效途径。

关键词 滨海重盐碱地 柽柳 碳密度 多样性 生态效应

中图分类号: S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2013)10-1233-08

Growth dynamics of *Tamarix chinensis* plantations in heavy-saline coastal lands and related ecological effects

FENG Xiao-Hui^{1,2}, ZHANG Xiu-Mei¹, LIU Xiao-Jing¹, CHENG Rui-Mei³, SUN Huan-Rong⁴

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences; Key Laboratory of Agricultural Water Resources of Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Forestry Bureau of Nanpi County, Hebei Province, Nanpi 061500, China)

Abstract *Tamarix chinensis*, a pioneering native salt-tolerant plant in abandoned coastal saline lands, has high potential as eco-engineering plant species for re-vegetation and soil quality improvement. However, field experiments on the effectiveness of *T. chinensis* in re-restoration of saline lands along the coastal areas of China have been largely lacking. *T. chinensis* was planted in 2005, 2007 and 2009 to assess the effectiveness of plants on vegetation and saline soil restoration in this study. The individual biomass, sequenced carbon amount, herb species diversity and soil characteristics of *T. chinensis* plantations with different planting years and of adjacent abandoned lands without *T. chinensis* were investigated. The results showed that *T. chinensis* grew well in the research area and with increasing individual biomass during the experimentation period. *T. chinensis* plantations produced significant ecological benefits which increased plot vegetation carbon density from 4.78 t(C)·hm⁻² in 3-year plots to 5.56 t(C)·hm⁻² in 5-year plots

* 国家科技支撑计划项目(2013BAC02B01)和中国科学院科技创新项目(KZCX-YW-359, KZCX-YW-447)资助

** 通讯作者: 刘小京(1966—), 男, 博士, 研究员, 研究方向为盐碱地水土资源高效利用。E-mail: xjliu@sjziam.ac.cn

封晓辉(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为盐碱地植被构建。E-mail: fxhcaf@163.com

收稿日期: 2012-11-04 接受日期: 2013-04-28

and then to $6.89 \text{ t(C)·hm}^{-2}$ in 7-year plots. On the average, there was only $0.98 \text{ t(C)·hm}^{-2}$ in abandoned lands without *T. chinensis*. Significant soil quality improvement was indicated by lower saltiness and higher organic matter and available N and K in *T. chinensis* plantation lands. Salt content in the 0–10 cm soil layer of abandoned lands was 10.53 g·kg^{-1} . It was 3.35 g·kg^{-1} in the 3-year plots, 1.86 g·kg^{-1} in the 5-year plots and 5.54 g·kg^{-1} in the 7-year plots with *T. chinensis*. Compare with abandoned lands, soil available K in the 0–5 cm and 5–15 cm soil layer in the 7-year plots respectively increased by 65.59% and 28.90%. In addition, *T. chinensis* played a significant “eco-engineering” role in terms of increasing volume and species of grass during *T. chinensis* plant development. Whereas only 8 grass species existed in the abandoned lands without *T. chinensis*, a total of 15 grass species existed in the 7-year plot with *T. chinensis* plantation. However, other important salt-tolerant species decreased in *T. chinensis* plots. Colon plants like *Aeluropus sinensis* and *Ixeris polycephala* became more dominant than seed plants such as *Suaeda salsa* after planting *T. chinensis*. This suggested that *T. chinensis* plant progressively alleviated salt stress in the coastal environments. The study demonstrated via field experiments that *T. chinensis* was effective in vegetation regeneration, soil enhancement and carbon sequestration in saline lands.

Key words Heavy-saline coastal land, *Tamarix chinensis*, Carbon density, Biodiversity, Ecological effect

(Received Nov. 4, 2012; accepted Apr. 28, 2013)

渤海湾西岸的滨海盐碱地由于土壤含盐高且地势低而排水不畅, 土壤脱盐困难, 大量重盐碱地长期处于撂荒状态^[1], 土地生产力低下。因此, 提高滨海重盐碱地的利用率是亟待解决的问题。研究表明, 栽植耐盐植物可以不同程度降低滨海盐碱地的土壤含盐量、增加养分含量, 显著改变群落结构且提高生物多样性^[2–3]。柽柳(*Tamarix chinensis*)作为典型的泌盐性盐生乡土树种, 在盐碱地道路绿化和土壤改良中得到广泛应用^[4]。但是仅依靠柽柳的自然扩散难以在重盐碱地中形成盖度较高的灌木优势群落, 对盐碱地的改良作用不明显, 因此有必要尝试人工栽植柽柳以促进盐碱地改良。同时, 盐碱地从草本群落变为灌草结合群落的过程也是固碳能力提高的过程, 其碳汇能力不可忽视。以往研究多注重柽柳在盐碱地道路绿化和土壤抑盐中的应用^[5–8], 目前尚少有对人工栽植柽柳的生物量和碳储量动态以及其对植物群落多样性影响方面的研究。本研究对滨海重盐碱地中不同树龄的人工柽柳林进行群落调查, 分析柽柳个体生长和群落的生物量和碳储量动态, 以及土壤和植物的动态变化, 以了解重盐碱地人工种植柽柳的生长动态以及对整个群落植物物种组成和土壤的影响, 为滨海重盐碱地的土壤改良、植被构建提供依据。

1 研究地概况与研究方法

试验地位于河北省海兴县中国科学院滨海盐碱地高效利用示范区。该区处于渤海湾西岸, 地势低洼平坦, 土壤为滨海盐土, 土壤盐分组成主要以氯化物为主, Cl^- 占阴离子总量的70%–80%, Na^+ 是主要的阳离子; 地下水位0.9–1.5 m, 地下水含盐量 $7\sim 27 \text{ g·L}^{-1}$ 。气候类型属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温 $12.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 1月平均气温 $-4.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 年平均降水量 582.3 mm , 主要集中在7–8月份。土壤中盐分含量有鲜明的季节特征: 春季由于蒸发量大、降水少, 为

蒸发积盐阶段; 夏季降水量增加, 土壤盐分经雨水淋洗下移, 处于脱盐阶段; 秋季由于地下水位低, 再次积盐; 冬季盐分运动基本停止^[1]。撂荒地中无灌木生长, 草本植物和裸地斑块相间, 主要植物有獐毛(*Aeluropus sinensis*)、白茅(*Imperata cylindrical*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)等, 总盖度约为0.65。

试验地为条状整理地块, 每块南北长500 m, 东西宽20 m, 柽柳分别以2005年、2007年和2009年各栽植一条地。采用“春季扦插, 雨季移苗”的方法, 每年3月份选择直径为0.8–1.2 cm的1年生柽柳枝条, 剪成长12 cm的插条, 扦插于塑料育苗袋中, 6月底雨季到来之前扦插苗长至高40 cm左右, 以株距1 m, 行距0.5 m栽植于试验地中, 每次栽植 1 hm^2 。栽植后无平茬、除草等管理措施。3年生柽柳群落的郁闭度80%左右, 5年生的郁闭度约90%, 7年生的郁闭度超过95%。

在不同树龄的柽柳群落中, 按照栽植的方格之字形路线调查每株柽柳的高度和地径(测量距地面5 cm的干基部)。计算平均高度和平均地径, 选择6株与平均高度和平均地径相近的标准株, 砍伐地上部分并挖根。按照叶、枝干和根分类, 称量鲜重。同时, 在每个树龄柽柳群落和对照撂荒地中各随机设置10个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的草本样方, 进行群落调查, 记录样方中各种草本植物的数量、高度和盖度, 并收割样方内的全部草本植物, 称鲜重。采用土钻, 按照0–10 cm、10–20 cm、20–30 cm和30–50 cm 4个土层钻取土样, 测定土壤盐分和水分含量, 重复3次; 土壤表层0–5 cm、5–15 cm采集土样, 风干, 测定土壤养分含量(包括有机质、全氮、有效磷和有效钾)。调查和采样时间为2011年9月28日至30日。柽柳和草本植物样品带回实验室, 在烘箱中 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重, 测定各部分生物量。不同柽柳器官的碳含量引用徐永荣等^[9]的研究结果, 即地上部分含碳率

44.3%, 根含碳率 42.6%; 草本植物碳含量参照温带地区草本植物的含碳率 35.0% 计算^[10]。以物种的重要值比较不同物种在群落中的优势度: 重要值=(相对盖度+相对频度+相对密度)/3 × 100^[11]。并对不同物种的重要值与土壤盐分、养分含量和栽植时间进行冗余分析(RDA), 以解释物种和环境之间的关系。

以上数据在 SPSS 17.0 中用 One Way ANOVA 进行方差分析, 以 LSD 多重比较法检验不同处理的差异显著性。用 CANOCO 4.0 进行 RDA 分析。采用 Sigmaplot 11.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 柽柳生长特征

柽柳的树高和地径随着树龄的增加而增加, 3 年生、5 年生和 7 年生的柽柳个体平均树高依次为 (150.35±29.71) cm、(176.49±25.29) cm 和 (201.90±33.12) cm; 平均地径依次为 (18.09±4.70) mm、(21.95±

4.29) mm 和 (26.96±7.75) mm。随着柽柳树龄的增加树高和地径的关系由直线转变为对数关系; 7 年生柽柳的树高和地径为对数关系, 这说明随着树龄增加柽柳株高的生长速度逐渐减缓, 径向生长加速, 生长由高生长转变为径向生长(图 1)。

2.2 柽柳群落的生物量和碳密度

柽柳不同器官生物量和所占比率如表 1。3 年生、5 年生和 7 年生柽柳个体的生物量逐渐增加。各器官生物量占个体总生物量的比率有较大变化, 其中叶的生物量比率基本不变, 保持在 12% 左右, 枝干的生物量比率则逐渐增大, 由 34.25% 升高到 46.27%, 根占的比率由 53.74% 下降到 41.29%, 地上部分生物量和根生物量之比由 0.87 升高到 1.42。这说明柽柳在前 3 年生长主要为根的生长, 而在 3 年之后地上部分径向生长加速, 生物量积累主要集中在枝干。同时随着树龄增大个体之间的生物量差异逐渐增大。

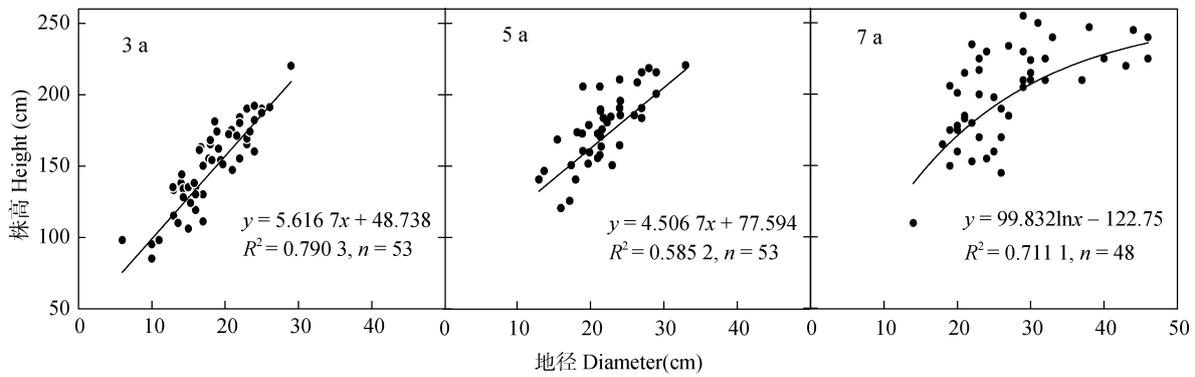


图 1 不同树龄柽柳地径与株高的关系

Fig. 1 Relationship between basal diameter and height of *Tamarix chinensis* with different planting years

表 1 不同树龄柽柳各部分生物量及其分配

Table 1 Biomass and its allocation in different parts of *Tamarix chinensis* with different planting years

项目 Item	3 a		5 a		7 a	
	生物量 Biomass (g)	比率 Percent (%)	生物量 Biomass (g)	比率 Percent (%)	生物量 Biomass (g)	比率 Percent (%)
叶 Leaf	77.67±32.22a	12.13	82.17±46.89a	10.70	124.24±53.82a	12.44
枝干 Branch and stem	215.40±61.72a	34.25	329.63±124.47ab	42.91	462.09±202.56b	46.27
根 Root	338.03±12.05a	53.74	356.32±26.73a	46.39	412.45±268.16a	41.29
地上部分 Above ground	293.07±92.67a	46.59	411.80±167.04ab	53.60	586.34±252.59b	58.70
整个株 Whole plant	629.01±105.65a	100.00	768.18±163.80ab	100.00	998.79±367.68b	100.00
地上与地下比 Above-ground to under-ground	—	87.00	—	116.00	—	142.00

不同柽柳群落中草本植物的生物量随着柽柳树龄增加而逐渐下降, 对照地、3 年生、5 年生和 7 年生柽柳群落草本植物生物量依次降低, 分别为 (2.81±3.44) t·hm⁻²、(3.21±1.03) t·hm⁻²、(3.12±1.09) t·hm⁻² 和 (3.08±1.30) t·hm⁻², 但差异不显著。对照地中的草本植物呈斑块状分布, 存在较多裸地, 整体

盖度小于人工栽植柽柳群落, 但对照地内的非裸地草本植物生物量高于柽柳群落中草本植物的生物量, 故其草本生物量标准差较大。

如表 2 所示, 对照撂荒地的碳密度平均只有 0.98 t(C)·hm⁻², 而栽植柽柳 3 年、5 年和 7 年后群落平均碳密度依次为 4.78 t(C)·hm⁻²、5.56 t(C)·hm⁻²、

表 2 不同树龄柽柳群落的碳密度及在柽柳植株各部分的分配

Table 2 Carbon density and its allocation in different parts of *Tamarix chinensis* communities with different planting years

树龄 Planting year	草本 Herb	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	柽柳 Tamarix	群落 Community
CK	0.98±1.20a	—	—	—	—	0.98
3 a	1.12±0.36a	0.46±0.19a	1.27±0.36a	1.97±0.11a	3.65±0.53a	4.78
5 a	1.09±0.38a	0.49±0.28a	1.95±0.73ab	2.02±0.16ab	4.46±0.97ab	5.56
7 a	1.08±0.46a	0.73±0.33a	2.73±1.20b	2.34±0.89b	5.81±2.24b	6.89

CK: 无柽柳荒地 wasteland without *Tamarix chinensis*; 下同 The same below.

6.89 t(C)·hm⁻², 3 年生、5 年生和 7 年生柽柳群落的碳密度为对照地的 4.87 倍、5.67 倍和 7.03 倍。与生物量对应, 柽柳不同部分的碳密度都有增加的趋势。

2.3 柽柳群落的土壤特征

秋季地表返盐时期, 土壤盐分含量在周年变化中具有一定代表性。对照地土壤 0~10 cm 的平均盐分含量高达 10.53 g·kg⁻¹, 而 3 年生、5 年生和 7 年生 0~10 cm 土壤平均含盐量分别为 3.35 g·kg⁻¹、1.86

g·kg⁻¹ 和 5.54 g·kg⁻¹。土壤表层盐分并没有随着栽植时间而逐渐降低, 5 年生柽柳群落土壤各层的含盐量最低。土壤水分含量随着深度增加有降低的趋势, 5 年生和 7 年生的表层土壤水分含量略高, 不同柽柳群落的土壤含水量之间无显著差异(图 2)。

如图 3 所示, 随着柽柳树龄增加土壤有机质、全氮和有效磷含量略有增加, 但各群落之间差异不显著; 土壤有效钾含量显著增加, 7 年生柽柳群落 0~5 cm 和 5~15 cm 土层的速效钾含量分别比对照地

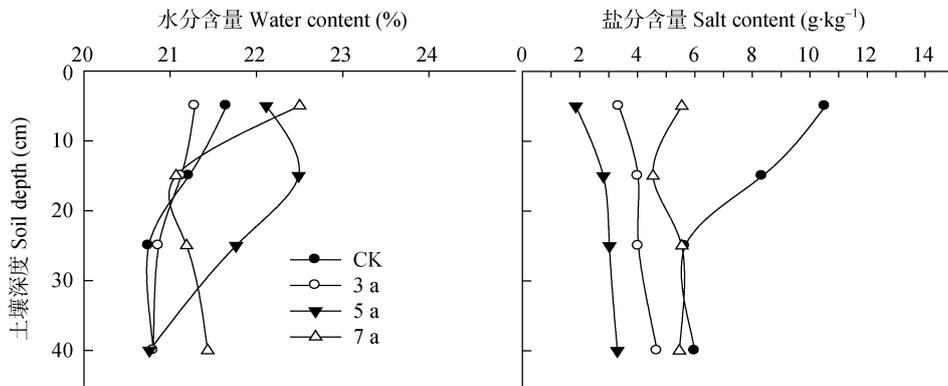


图 2 不同树龄柽柳群落不同土层的盐分含量和水分含量

Fig. 2 Soil salt content and water content of different soil layers in *Tamarix chinensis* communities with different planting years

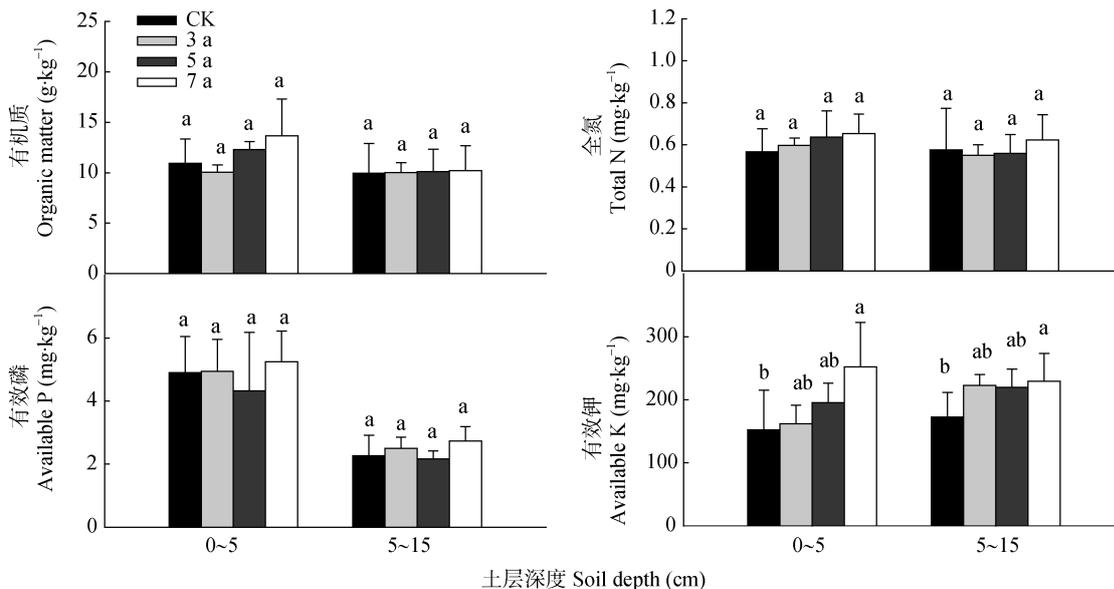


图 3 不同树龄柽柳群落土壤有机质、全氮、有效磷和有效钾含量

Fig. 3 Organic matter, total N, available P and available K contents in 0~5 cm and 5~10 cm soil layers of *Tamarix chinensis* communities with different planting years

高 65.59%和 28.90%。0~5 cm 中的养分含量增加幅度高于 5~15 cm, 柽柳对表层土壤养分有一定影响。

2.4 柽柳群落草本植物的动态

柽柳群落中草本植物共计 17 种, 分属 6 科, 17 属。其中菊科 7 属 7 种, 禾本科 6 属 6 种, 两个科所占比率超过物种总数的 2/3; 在生活型中, 有 11 种多年生植物, 3 种为 2 年生, 3 种为 1 年生。各物种的重要值如表 3。对照地只有 8 个草本物种, 优势种为盐地碱蓬和白茅; 3 年生柽柳群落共 10 种草本植物, 优势种为白茅、苦苣菜(*Plantago asiatica*)和獐毛; 5 年生柽柳群落共 12 种, 优势物种依次为獐毛、苦苣菜和白茅; 7 年生柽柳群落中草本共计 15 种, 优势种为

獐毛、苦苣菜。獐毛在不同群落中的重要值都较高, 且重要值随着栽植时间逐渐升高, 是栽植柽柳后的优势物种。随着柽柳树龄的增加, 獐毛、苦苣菜、狗尾草(*Setaria viridis*)的重要值呈增加趋势, 盐地碱蓬、白茅的重要值逐渐降低; 而蒙古鸦葱(*Scorzonera mongolica*)的重要值基本持平; 车前(*Plantago asiatica*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)和茵陈蒿(*Artemisia scoparia*)出现在 7 年生柽柳群落中。可见栽植柽柳有利于植物的定居, 增加了整个群落的物种多度。从草本植物的繁殖方式看, 以种子兼营养繁殖的多年生草本植物逐渐占据优势。

表 3 不同树龄柽柳群落中各草本植物的生活型、更新方式及重要值

Table 3 Life style, regeneration patterns and important values of the herb spices in *Tamarix chinensis* communities with different planting years

物种 Species	拉丁名 Latin name	生活型 Life style	更新方式 Regeneration pattern	重要值 Important value			
				对照 CK	3 a	5 a	7 a
阿尔泰狗娃花	<i>Heteropappus altaicus</i>	多年生 Perennial	种子 Seed	0	5.3	0	1.4
白茅	<i>Imperata cylindrical</i>	多年生 Perennial	根茎, 种子 Rhizomes, seed	36.1	21.1	17.7	8.1
稗草	<i>Echinochloa crusgali</i>	一年生 Annual	种子 Seed	0	0	1.2	0
车前	<i>Plantago asiatica</i>	二年生 Biennial	根茎, 种子 Rhizomes, seed	0	0	0	1
刺儿菜	<i>Cirsium setosum</i>	多年生 Perennial	根茎, 种子 Rhizomes, seed	0	0	0	1.2
鹅绒藤	<i>Cynanchum chinense</i>	多年生 Perennial	种子 Seed	0	0	1.8	4.7
二色补血草	<i>Limonium sinense</i>	二年生 Biennial	种子 Seed	1.3	2.7	3.6	0
狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	一年生 Annual	种子 Seed	1.8	4.2	11.4	9.3
碱菀	<i>Tripolium vulgare</i>	二年生 Biennial	种子 Seed	0	0	2.6	0.8
苦苣菜	<i>Ixeris polycephala</i>	多年生 Perennial	根茎, 种子 Rhizomes, seed	4.0	19.0	20.0	21.3
芦苇	<i>Phragmites australis</i>	多年生 Perennial	根茎, 种子 Rhizomes, seed	6.7	1.9	2.1	4.8
蒙古鸦葱	<i>Scorzonera mongolica</i>	多年生 Perennial	根茎, 种子 Root sucker, seed	10.7	10.0	10.2	12.2
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	多年生 Perennial	种子 Seed	0	0	0	0.9
茵陈蒿	<i>Artemisia capillaris</i>	多年生 Perennial	种子 Seed	0	0	0	0.9
星星草	<i>Puccinellia tenuiflora</i>	多年生 Perennial	种子 Seed	0	10.3	1.7	1.4
盐地碱蓬	<i>Suaeda salsa</i>	一年生 Annual	种子 Seed	34.8	6.6	3.2	0.7
獐毛	<i>Aeluropus sinensis</i>	多年生 Perennial	根茎, 种子 Rhizomes, seed	13.1	18.8	24.6	31.3

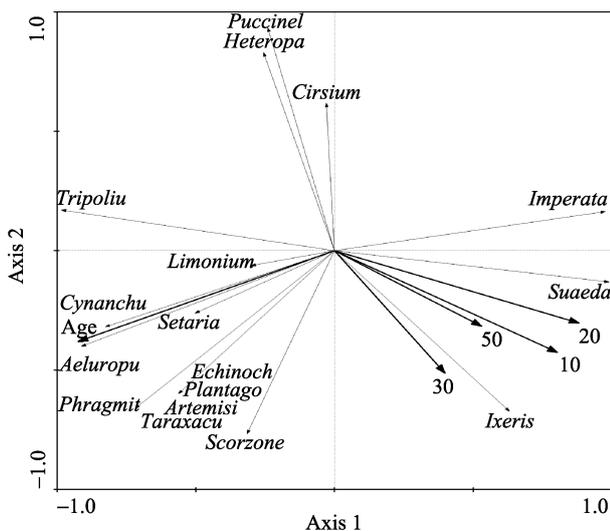


图 4 柽柳群落中草本植物重要值和环境因子间的 RDA 分析

Fig. 4 RDA analysis of species important value and the environmental factors in *Tamarix chinensis* communities

物种的重要值与土壤各层的含盐量、养分含量以及群落树龄之间的 RDA 分析表明, 物种重要值主要受群落树龄和土壤含盐量的影响。如图 4 所示, 横轴为第 1 轴, 解释方差为 0.883, 纵轴为第 2 轴, 解释方差为 0.090, 累积为 0.973。按照物种在排序轴中的位置和所指示方向可以划分为与盐分正相关、与时间正相关和不敏感 3 种类型, 分别对应耐盐、不耐盐和中性 3 种不同的耐盐特征。盐地碱蓬和白茅是耐盐性最强的植物, 蒙古鸦葱、阿尔泰狗娃花和星星草对盐分含量不敏感, 而车前、鹅绒藤、铁杆蒿等耐盐能力较差。

3 讨论

3.1 柽柳个体生长、生物量和群落碳储量动态

柽柳在栽植后的前两年生长迅速, 3 年生柽柳个体平均树高达到 150 cm, 除去栽植时原有的高度,

年均生长量达 40 cm。研究表明, 40 cm 的柽柳插穗春季扦插 100 d 后高度可达 80 cm^[12], 而平茬后的柽柳萌生新枝一年生长量可达 150 cm 以上, 地径可达 8 mm 以上^[13], 这种苗期的高速生长现象可能与柠条(*Caragana intermedia*)苗期的生长动态相似^[14]。柽柳的地径和树高的关系表明, 前 3 年柽柳高生长和径向生长同步, 但是 5 年生柽柳的树高与地径的线性关系方差解释率较低, 表明在 3 年后柽柳的径向生长与高生长的同步性降低, 而 7 年生的柽柳树高与地径呈对数关系, 表明柽柳的高生长基本停止, 生物量的增加主要以径向生长为主。由于柽柳为耐旱植物, 苗期根迅速生长以获取水分, 苗期根生长优先于枝干生长是适应干旱的策略^[15], 因此 3 年生柽柳个体根的生物量比率较大, 而 5 年生和 7 年生个体枝干的比率较大。栽植柽柳群落后郁闭度逐渐增高, 下层草本植物由于遮荫和竞争而生长受到抑制, 因此草本植物生物量有降低趋势, 但是降低趋势并不明显。

与其他植被相比, 7 年生柽柳群落的生物量与黄土高原栽植沙棘(*Hippophae rhamnoides*)的生物量相当^[16], 与温带落叶灌丛的碳密度 $6.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 接近^[17]。远高于黑河下游和天山南麓的天然柽柳群落生物量^[18-19], 这是由于西北内陆地区的柽柳为天然群落, 成簇状散布于沙漠中, 人工栽植的柽柳均匀分布在样地中, 群落的盖度和柽柳的密度较高, 故碳密度高。盐碱地栽植柽柳生物量与全球盐碱地的理论生产力 $310 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 相比也较高^[20]。说明在滨海重盐碱地人工柽柳群落的生物量和碳密度能够达到同区域植被碳密度的平均水平, 因此栽植柽柳具有一定的固碳增汇作用。

3.2 柽柳对土壤盐分和养分的影响

滨海盐碱地由于地下水水位高, 地表蒸发导致土壤表层积盐, 同时雨季淋盐作用强烈, 返盐和淋盐过程周期进行, 因此减少春季地表蒸发是降低土壤表层盐分的关键^[1]。栽植柽柳增加了地表覆盖, 降低了地表蒸发, 栽植柽柳后土壤盐分含量显著低于撂荒地, 盐分降低有利于耐盐性较差的物种进入群落, 进一步增加地表的覆盖度, 维持地表含盐量在较低水平。本研究中, 土壤采样时间在 9 月底, 经过雨季的淋洗柽柳群落中土壤的含盐量随着土壤深度加深而增加, 而对照撂荒地表层返盐显著, 柽柳群落的土壤表层含盐量显著低于对照。但是土壤表层盐分含量并没有随着栽植时间增加而逐渐降低, 5 年生柽柳的表层土壤盐分含量最低, 7 年生的土壤含盐量略高于 5 年生的表层土壤含盐量。这可能与土壤的本底盐有关, 是否由于柽柳的泌盐作用使地表盐分含量

在种植多年后增高尚需要进一步证明。研究表明, 美国西部干旱地区的柽柳群落土壤盐分含量有随着柽柳树龄增加而增加的趋势^[21]。这种盐分富集现象表现在干旱地区。

植物的枯枝落叶归还提高了土壤的养分含量, 土壤表层的有效钾含量显著升高。在新疆荒漠地区的研究表明, 柽柳的泌盐特性可导致灌丛下土壤盐分和有机质含量显著高于灌丛间^[7], 形成表层土壤的肥岛和盐岛效应^[22]。虽然栽植柽柳可促进表层土壤养分含量的积累, 但重盐碱土缺少有机质、氮和磷的固有特性并没有改变, 土壤仍然较贫瘠。

3.3 柽柳群落特征的变化

滨海重盐碱地植物群落是寡种植物群落, 物种饱和度和较低。有研究表明, 植被构建可以显著增加盐碱地植物群落的生物多样性^[3], 促进盐生群落向非盐生群落演替^[23], 同样, 植被破坏也是盐碱地逆行演替的主要原因^[24]。栽植柽柳后群落从草本变成灌木为主, 优势层片发生变化, 群落的垂直结构由单层成为上下两层, 这种灌草结合的结构较单层结构的群落有相对稳定的环境, 随着时间增加, 柽柳群落的郁闭度逐渐升高, 土壤盐分能保持在较低的水平, 耐盐能力较低的植物有机会在群落中定居, 植物的种类、数量和盖度显著高于对照撂荒地。植被和土壤之间相互作用是群落演替的动力, 在盐碱地中, 土壤盐分含量是群落演替的主导因子^[25], 虽然土壤盐分并不随着栽植时间的增加而逐渐降低, 但与撂荒地相比土壤盐分显著较低, 这是群落物种增加的重要原因之一。柽柳可以认为是重盐碱地植被演替的引擎物种^[26], 柽柳的栽植为群落进展演替提供动力。

由于盐生植物在含盐量较低的土壤中竞争能力急剧下降^[27], 栽植柽柳后耐盐性最强的盐地碱蓬的重要值显著下降, 由 34.8 下降到 0.7, 而獐毛和苦卖菜等以根茎繁殖的多年生草本植物优势度逐渐增加。一方面, 根茎繁殖的遗传生态位效应使多年生物种在群落中的优势逐年积累, 另一方面, 多年生草本植物在春季残存的茎叶和较早形成的地被物可以减少地表蒸发, 有效降低春季返盐期的盐分含量, 促进自身生长。松嫩平原的盐碱地进展演替中研究已证明, 随着进展演替的进行, 营养繁殖的物种逐渐占据主导地位^[28]。同样栽植柠条后山西大同的盐碱地群落中耐盐植物的数量急剧下降^[29]。植物和环境间的关系分析表明, 物种的优势度主要受到土壤盐分和栽植时间影响。本研究, 柽柳群落中的草本植物可以分为 3 类, 耐盐植物主要有盐地碱蓬、芦苇; 不耐盐的植物为狗尾草、车前; 对盐分含量不敏感

的有蒙古鸦葱等。

4 结论

由于栽植柽柳在群落中增加了灌木层, 群落结构的优化显著促进了群落的进展演替。柽柳群落的生物量逐年增加, 固碳作用明显, 3 年生、5 年生和 7 年生的柽柳群落碳密度依次为 $4.78 \text{ t(C)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $5.56 \text{ t(C)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.89 \text{ t(C)} \cdot \text{hm}^{-2}$, 而对照撂荒地的碳密度只有 $0.98 \text{ t(C)} \cdot \text{hm}^{-2}$; 栽植柽柳后土壤表层的含盐量显著降低, 土壤养分也有升高趋势, 其中土壤中有效钾含量显著增加; 稳定的群落环境促进了群落物种多样性增加; 盐生物种在群落中的优势度随着栽植时间逐渐降低, 而种子兼营养繁殖的多年生草本植物逐渐占据优势。可见柽柳为群落演替提供了动力, 柽柳可认为是滨海重盐碱地的“生态系统引擎”物种。这证明栽植柽柳是提高滨海重盐碱地利用率的有效途径。但是栽植柽柳后土壤盐分含量的周年动态与对照地之间的差异以及 7 年生柽柳土壤中表层的盐分增加原因尚不清楚, 因此应继续深入研究柽柳碳储量变化以及土壤盐分动态和群落多样性动态。

参考文献

- [1] 刘小京, 李向军, 陈丽娜, 等. 盐碱区适应性农作制度与技术探讨——以河北省滨海平原盐碱区为例[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 911-913
Liu X J, Li X J, Chen L N, et al. Study on the adaptive farming system in saline soils—A case study in saline area of strand plain in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 911-913
- [2] 单奇华, 张建锋, 阮伟建, 等. 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 6072-6079
Shan Q H, Zhang J F, Ruan W J, et al. Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 6072-6079
- [3] 单奇华, 张建锋, 沈立铭, 等. 林业生态工程措施对滨海盐碱地草本植物的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1411-1418
Shan Q H, Zhang J F, Shen L M, et al. Effects of forestry ecological engineering on herb community in coastal saline-alkali land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1411-1418
- [4] 赵可夫, 张万钧, 范海, 等. 改良和开发利用盐渍化土壤的生物学措施[J]. 土壤通报, 2001, 32(S1): 115-119
Zhao K F, Zhang W J, Fan H, et al. Biological measures for utilization and development of salinized soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(S1): 115-119
- [5] 关洪斌, 王晓兰, 鞠迪, 等. 柽柳对滨海盐渍土的改良作用及其应用[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(10): 918-921
Guan H B, Wang X L, Ju D, et al. Soiled modification and application of *Tamarix chinensis* on the saline soil[J]. Resource Development & Market, 2009, 25(10): 918-921
- [6] 侯本栋, 马风云, 吴海燕, 等. 黄河三角洲不同演替阶段湿地土壤线虫的群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(2): 202-206
Hou B D, Ma F Y, Wu H Y, et al. Characteristics of soil nematodes communities at different succession stages of wetland in the Yellow River delta, China[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2008, 14(2): 202-206
- [7] 雷金银, 班乃荣, 张永宏, 等. 柽柳对盐碱土养分与盐分的影响及其区化特征[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 73-78
Lei J Y, Ban N R, Zhang Y H, et al. Effects and partition characteristics of *Tamarix ramosissima* on nutrients and salt of saline-alkali soils[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(4): 73-78
- [8] 王玉珍, 刘永信, 魏春兰, 等. 6 种盐生植物对盐碱地土壤改良情况的研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(2): 951-957
Wang Y Z, Liu Y X, Wei C L, et al. Improvement of salt-affected soils with six halophytes[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(2): 951-957
- [9] 徐永荣, 张万均, 冯宗炜, 等. 天津滨海盐渍土上几种植物的热值和元素含量及其相关性[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 450-455
Xu Y R, Zhang W J, Feng Z W, et al. Caloric values, elemental contents and correlations between them of some plants on sea-beach salinity soil in Tianjin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 450-455
- [10] 郑唯婕, 包维楷, 辜彬, 等. 陆生高等植物碳含量及其特点[J]. 生态学杂志, 2007, 26(3): 307-313
Zheng W J, Bao W K, Gu B, et al. Carbon concentration and its characteristics in terrestrial higher plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(3): 307-313
- [11] 宋永昌. 植被生态学[M]. 第 2 版. 上海: 华东师范大学出版社, 2001: 45-46
Song Y C. Vegetation ecology[M]. 2nd ed. Shanghai: East China Normal University Press, 2001: 45-46
- [12] 郭亮, 王庆林. 柽柳盐碱地扦插育苗试验报告[J]. 华东森林经理, 2010, 24(2): 25-27
Guo L, Wang Q L. Cutting experiment of *Tamarix chinensis* Lour. on alkaline soil[J]. East China Forest Management, 2010, 24(2): 25-27
- [13] 付任胜, 管长志, 尹立荣, 等. 两个柽柳种生长发育特性及利用价值初步研究[J]. 天津农业科学, 2010, 16(3): 112-114
Fu R S, Guan C Z, Yin L R, et al. Primary research on growth and development of tow species of *Tamarix* and application[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2010, 16(3): 112-114
- [14] 朱元龙, 王桑, 林永刚, 等. 黄土高原丘陵区柠条根系生长发育特性研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(2): 232-237
Zhu Y L, Wang S, Lin Y G, et al. Development of *Caragana microphylla* seedling root system in hilly regions of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2): 232-237
- [15] 魏疆, 张希明, 马文东, 等. 甘蒙柽柳幼苗生长动态及其对沙漠腹地生境条件的适应策略[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 666-673
Wei J, Zhang X M, Ma W D, et al. Seedling growth dynamics of *Tamarix austromongolica* and its acclimation strategy in hinterland of desert[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(2): 666-673

- [16] 刘占德, 刘增文. 沙棘柠条的生物量及立地因子分析[J]. 西北农业学报, 1994, 3(2): 92-96
Liu Z D, Liu Z W. Study on biomass of *Hippophae rhamnoides* L. and *Caragana microphylla* L. on Loess plateau[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 1994, 3(2): 92-96
- [17] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 539-544
Hu H F, Wang Z H, Liu G H, et al. Vegetation carbon storage of major shrublands in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 539-544
- [18] 彭守璋, 赵传燕, 彭焕华, 等. 黑河下游柽柳种群地上生物量及耗水量的空间分布[J]. 应用生态学报, 2010, 20(8): 1940-1946
Peng S Z, Zhao C Y, Peng H H, et al. Spatial distribution of *Tamarix ramosissima* aboveground biomass and water consumption in the lower reaches of Heihe River, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 20(8): 1940-1946
- [19] 赵振勇, 王让会, 张慧芝, 等. 天山南麓山前平原柽柳灌丛地上生物量[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1557-1562
Zhao Z Y, Wang R H, Zhang H Z, et al. Aboveground biomass of *Tamarix* on piedmont plain of Tianshan Mountains south slope[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9): 1557-1562
- [20] Wicke B, Smeets E, Dornburg V, et al. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4(8): 2669-2681
- [21] Stromberg J C. Functional equivalency of saltcedar (*Tamarix chinensis*) and fremont cottonwood (*Populus fremontii*) along a free-flowing river[J]. Wetlands, 1998, 18(4): 675-686
- [22] 尹传华, 冯固, 田长彦, 等. 干旱区柽柳灌丛下土壤有机质、盐分的富集效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 263-265
Yin C H, Feng G, Tian C Y, et al. Enrichment effects of soil organic matter and salinity under the tamarisk shrubs in arid area[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(1): 263-265
- [23] 赵凌云, 黄明勇, 袁建军, 等. 泥质海岸生物护坡植物群落演替过程研究[J]. 天津农业科学, 2008, 14(3): 56-60
Zhao L Y, Huang M Y, Yuan J J, et al. Research on floral succession in plants protecting engineer of muddy sea wall[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2008, 14(3): 56-60
- [24] 王海军, 盛连喜, 陈鹏. 松嫩平原西部土壤盐渍化逆向演替的影响因子与调控系统[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2003, 35(3): 60-65
Wang H J, Sheng L X, Chen P, et al. Study on influencing factors and control system of reversal evolvement in Western Songnen Plain[J]. Journal of Northeast Normal University: Natural Science Edition, 2003, 35(3): 60-65
- [25] Karlin M S, Bachmeier O A, Dalmaso A, et al. Environmental dynamics in salinas grandes, Catamarca, Argentina[J]. Arid Land Research and Management, 2011, 25(4): 328-350
- [26] Jones C G, Lawton J H, Shachak M. Organisms as ecosystem engineers[J]. Oikos, 1994, 69(3): 373-386
- [27] Ungar I A. Are biotic factors significant in influencing the distribution of halophytes in saline habitats?[J]. The Botanical Review, 1998, 64(2): 176-199
- [28] 杨允菲, 郑慧莹. 松嫩平原碱斑进展演替实验群落的比较分析[J]. 植物生态学报, 1998, 22(3): 214-221
Yang Y F, Zheng H Y. Comparison analysis on the experimental communities during progressive succession on alkaline patches in the Songnen plain of China[J]. Journal of Plant Ecology, 1998, 22(3): 214-221
- [29] 张丽珍, 牛伟, 牛宇, 等. 柠条对盐碱地植被组成及土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4693-4699
Zhang L Z, Niu W, Niu Y, et al. Impact of *Caragana* Fabr. plantation on plant community and soil properties of saline-alkali wasteland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4693-4699

欢迎订阅《作物学报》

《作物学报》是中国科学技术协会主管、中国作物学会和中国农业科学院作物科学研究所共同主办、科学出版社出版的有关作物科学的学术期刊。前身可追溯到 1919 年创办的《中华农学会丛刊》。主要刊载农作物遗传育种、耕作栽培、生理生化、种质资源以及与作物生产有关的生物技术、生物数学等学科基础理论或实践应用性的原始研究论文、专题评述和研究简报等。办刊宗旨是报道本领域最新研究动态和成果, 为繁荣我国作物科学研究、促进国内外学术交流、加速中国农业现代化建设服务。读者对象是从事农作物科学研究的科技工作者、大专院校师生和具有同等水平的专业人士。

《作物学报》从 1999 年起连续 12 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”的资助。2006—2013 年连续 8 年获“中国科协精品科技期刊工程项目(B 类)”资助。从 2002 年起连续 11 年被中国科技信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号。2013 年被新闻出版广电总局评为“百强科技期刊”, 2011 年获“第二届中国出版政府奖期刊奖提名奖”, 2005 年获“第三届国家期刊奖提名奖”。2008 和 2011 年被中国科学技术信息研究所授予“中国精品科技期刊”称号。2009 年被中国期刊协会和中国出版科学研究所授予“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。据北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》(2004、2008 和 2011 年版)登载, 《作物学报》被列在“农学、农作物类核心期刊表”的首位。

《作物学报》为月刊, 定价 50 元/册, 全年 600 元。可通过全国各地邮局订阅, 刊号: ISSN 0496-3490, CN 11-1809/S, 邮发代号: 82-336。也可向编辑部直接订购。

地址: 北京市海淀区中关村南大街 12 号, 中国农业科学院作物科学研究所《作物学报》编辑部(邮编 100081)

电话: 010-82108548; 传真: 010-82105793; 网址: <http://zwx.chinacrops.org/>

E-mail: zwx301@caas.cn; xbzw@chinajournal.net.cn