

DOI: 10.5846/stxb201811262572

王世林, 曹文侠, 王小军, 李小龙, 王金兰, 刘玉祯, 辛雨琼. 火烧迹地柽柳灌丛资源岛特征及植被的自然恢复. 生态学报, 2020, 40(1): 284-294.

Wang S L, Cao W X, Wang X J, Li X L, Wang J L, Liu Y Z, Xin Y Q. Features of resource islands under *Tamarix ramosissima* shrubs and natural recovery of vegetation on the burned area in Jiuquan, Gansu Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 284-294.

火烧迹地柽柳灌丛资源岛特征及植被的自然恢复

王世林, 曹文侠*, 王小军, 李小龙, 王金兰, 刘玉祯, 辛雨琼

甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070

摘要:干旱半干旱地区灌丛资源岛特征及形成机制多有报道,但资源岛土壤对群落稳定性与火烧迹地植被的自然恢复作用尚不明确。以酒泉盐碱地柽柳灌丛地火烧 3 年后,自然恢复的柽柳(*Tamarix ramosissima*)及其冠下草本群落为研究对象,构建柽柳枯立株体量指数(SSI, Shrub Size Index)和恢复力综合指数,探讨了资源岛特征与植被恢复、冠下草本群落多样性的关系,量化不同大小柽柳灌丛的恢复力稳定性。结果表明:(1)在不同 SSI 的柽柳枯立株下土壤有机质和含水率均明显高于灌丛间地,形成了明显的资源岛特征。土壤有机质最大值出现在 0—10 cm 土层,中灌丛的肥力积聚效果最明显。(2)土壤主要以中性盐为主,在 0—40 cm 土层,灌丛区域土壤可溶性盐低于冠外,呈明显的盐谷特征,中灌丛的盐谷分布最为明显。(3)随着枯立株 SSI 的增大,柽柳新生枝条的数量及其高度均有所增大,冠下植物的高度、盖度、密度和地上植物量也明显高于灌丛间地,且灌丛越大恢复效果越明显。(4)灌下植物 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Pielou 指数随着枯立株 SSI 的增大均先降后升,多样性指数低,群落结构简单。(5)恢复力综合指数随着枯立株 SSI 的增大呈先升后降的趋势,当 SSI=52.17 时灌丛群落的稳定性最强。柽柳较小时主要是冠下草本植物的恢复维持群落稳定性,随着灌丛的增大逐渐以柽柳灌木的恢复来维持群落稳定性。柽柳灌丛形成的高养低盐的土壤环境对植物群落稳定性的维持和植被的恢复有促进作用,对荒漠生态系统火烧迹地植被恢复和生态保护具有重要意义。

关键词:柽柳;资源岛;植被恢复;群落多样性;恢复力稳定性;火烧迹地

Features of resource islands under *Tamarix ramosissima* shrubs and natural recovery of vegetation on the burned area in Jiuquan, Gansu Province, China

WANG Shilin, CAO Wenxia*, WANG Xiaojun, LI Xiaolong, WANG Jinlan, LIU Yuzhen, XIN Yuqiong

College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China

Abstract: The characteristics and formation mechanism of resource islands in arid and semi-arid regions were widely reported. However, the effect of resource islands on community stability and vegetation natural restoration on burned area was still unclear. We investigated restoration of *Tamarix ramosissima* and vegetation under the shrub canopies on burned area. The shrub size index (SSI) and composite resilience index were established to study relationships between resource islands, vegetation restoration, and diversity of vegetation under the canopies. We quantified resilience stability of shrubs with different SSI. The results indicated that: (1) soil organic matter and soil moisture content were obviously higher under and at the edge of canopies than those outside the canopies, which formed resource island. The maximum value of soil organic matter was found in 0—10 cm soil layer. The phenomenon of fertilizer accumulation was the most obvious in middle *T. ramosissima*. (2) Soil salinity was mainly composed of neutral salt. The soluble salt in the soil layer of 0—40 cm under canopies was significantly lower than that outside the canopies. It showed obvious characteristics of salt valley in soil under

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400306)

收稿日期:2018-11-26; 网络出版日期:2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caowx@gsau.edu.cn

shrubs. It was easy to observe this phenomenon for the middle shrubs. (3) With the increase of SSI of dead standing *T. ramosissima*, the number and height of branches increased, and the height, coverage, density, and biomass of vegetation under the shrubs were significantly higher than those outside the shrubs. The larger shrubs were, the better effect of the natural recovery was. (4) With the increase of SSI, Simpson index, Shannons-Wiener index, Margalef index, and Pielou index of vegetation under the canopies decreased firstly and then rose, with low diversity index and the simple community structure. (5) Composite resilience index showed a trend of firstly ascending and then descending with the increase of SSI. The value of community stability of *T. ramosissima* shrub was the highest when SSI was equal to 52.17. Community stability was mainly maintained by the restoration of herbaceous plants when shrubs were small on burned area. With the increase of SSI, community stability was maintained by the restoration of shrubs. The soil environment with high nutrient and low salt was formed from shrubs, which contributed to the restoration of vegetation. Resource island also played a positive role in maintaining the diversity and stability of plant communities. It was of great significance to vegetation recovery on burned area and ecological protection of desert ecosystem.

Key Words: *Tamarix ramosissima*; resource island; vegetation recovery; community diversity; resilience stability; burned area

柽柳(*Tamarix ramosissima*)是荒漠和盐碱地的优势灌木之一,能够形成遮阴环境庇护动植物^[1-2],拦截风中的尘土和种子,改变周围土壤的理化性质^[3-5],增加土壤微生物多样性^[6-7]等,将优势资源集中在灌木周围,形成资源岛^[8],亦称肥岛^[1,9]。资源岛现象是植物对土壤影响的一个典型案例,是土壤资源高度异质化的具体表现^[10]。目前,有关资源岛的研究主要集中在其形成机制与现象的描述^[1-12]。灌丛资源岛是在生物因素和非生物因素作用下形成的^[13],生物因素包括灌木的营养泵作用,动物在灌木下栖息留下的排泄物^[2],植物根系的更新等;非生物因素主要是指风蚀和水蚀^[14]。大量研究表明资源岛效应的普遍性,也证实了资源岛与灌木群落之间的正反馈作用^[11-12]。灌丛资源岛效应是荒漠植被与环境交流的枢纽,是荒漠植被在有限的养分资源和水分供应的生境中稳定存在的基础。

群落多样性和稳定性的概念、测度一直是生态学研究的重点。群落稳定性是指群落受外部干扰后保持和恢复到原有状态的能力^[15]。由于概念的宽泛和模糊使其测定困难重重,Pimm^[16]用抵抗力、恢复力、变异性和持久性进行解释,给群落稳定性的测度提供了思路。外部干扰分为非正常外力干扰(如火烧,人类活动、病虫害等)和环境因子驱动的正常波动干扰。因此,王国宏^[17]认为对于受环境因子正常波动干扰的群落而言,用持久性和变异衡量群落的稳定性,而受非正常外力干扰的群落而言,用抵抗力和恢复力表示稳定性更具实际意义。植物群落稳定性的测度也尚未有统一的方法,常见的测定方法有 Godron 稳定性测定法、演替比较结合法、综合评价法、变异系数法等^[18-21],主要是通过物种组成的变化,地上植物量、盖度、频度(相对频度)、密度等功能变量,结合遥感、模型或者构建评价体系等来度量群落稳定性。而灌丛能够拦截风中的尘土和种子并将其聚集在冠幅下,为种子的萌发和定植提供了有利条件^[22],提高了冠下植物的多样性,加速了植物物种的演替速率,增强了灌丛群落的稳定性,但是对冠下不同植物的生长影响差异较大^[23]。火烧属非正常外力干扰,是一种常见的营林措施,我国主要将林火当做灾害对待,但火烧干扰能够对植物群落重新“洗牌”,并且促进土壤碳^[24]、氮^[25]循环。因此,探究资源岛对灌丛群落稳定性的维持和火烧迹地的自然恢复的影响具有现实意义。大量的报道表明灌下土壤有机质(SOM, Soil Organic Matter)、氮、磷、钾等营养成分明显高于灌外^[9,26]。但火烧迹地资源岛土壤能否促进植被的自然恢复,与灌丛群落稳定性关系如何?有待进一步阐明。

火烧干扰对植被的“清零”,使得利用植物一段时间内功能变量的差异来测度群落恢复力更加方便和准确。本文以酒泉荒漠地区火烧迹地为对象,通过构建柽柳枯立株体量指数(SSI, Shrub Size Index)和群落恢复力综合指数(CRI, Composite Resilience Index),研究不同大小柽柳灌丛群落的稳定性及自然恢复,探讨资源岛对植被自然恢复的影响,为干旱地区林火管理和迹地恢复以及荒漠生态系统生态保护提供借鉴。

1 研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于甘肃省酒泉市肃州区漫水滩村(39°40′03.23″ N, 98°49′17.80″ E, 海拔 1385.7 m), 属大陆性干旱气候, 干燥寒冷, 降水缺乏, 年降雨量 87.7 mm, 年平均蒸发量 2140 mm, 超过年降雨量 24.4 倍。年日照总时数 ≥ 3300 h, 日照百分率为 72%。平均风速为 2.3 m/s, 最大可达到 26 m/s。年均温 7.3℃, 昼夜温差大, 全年 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 3461.9℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2954.4℃^[27], 无霜期 132 d, 夏季干热而较短促, 冬季寒冷而较漫长, 但春季升温迅速。

试验地处荒漠盐碱滩, 属疏勒河流域, 受水分及盐碱条件限制, 植被分布格局呈斑块状, 群落结构简单, 物种组成单一, 有植物 13 科 31 属 38 种。怪柳为建群种, 优势种为聚盐和泌盐的灌木或多年生草本植物, 如怪柳、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、小果白刺 (*Nitraria sibirica*)、黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 等。伴生种主要是聚盐、泌盐和避盐的一年或多年生草本植物, 如獐毛 (*Aeluropus sinensis*)、赖草 (*Leymus secalinus*)、刺儿菜 (*Cirsium setosum*)、碱蓬 (*Suaeda glauca*)、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 和藜 (*Chenopodium album*) 等。2014 年 3 月试验地发生火灾, 地上植被严重损坏几乎看不到活体植物。但是优势灌木怪柳遗留的资源岛土壤为植被快速恢复提供了适宜的土壤条件^[28], 同时优势物种怪柳等灌木的清除为其他植物, 特别是冠下草本植物的繁荣提供了机会。

1.2 怪柳枯立株的选择及大小划分

试验地降水缺乏, 怪柳枯立株几乎没有出现倒塌和腐烂现象反而保存完好, 以枯立株的冠幅和高度构建 SSI 准确并具有可操作性。2017 年 7 月对 500 m×500 m 火烧迹地进行植物群落特征调查, 选择 20 株大小不同的怪柳枯立株作为试验对象, 记录枯立株的高度、冠幅, 被选择的 20 株怪柳灌木周围 5 m 范围内均没有其他灌木。参考 Liu 等^[29]对柠条锦鸡儿灌木大小等级的划分, 构建 $SSI = \pi C_1 C_2 H / 4$ (C_1 、 C_2 为枯立株冠幅, H 为枯立株株高), 并进行大灌丛 ($SSI > 40$)、中灌丛 ($40 \geq SSI \geq 10$) 和小灌丛 ($10 > SSI$) 的划分(表 1)。

表 1 不同大小怪柳枯立株概况

Table 1 The state of *Tamarix ramosissima* with different size

项目 Item	小怪柳 Small shrubs						中怪柳 Middle shrubs			
高度 Heigh/m	1.07	1.24	1.63	2.21	2.26	2.24	2.21	2.38	2.51	2.71
冠幅 Canopy/m×m	1.80×1.40	1.59×1.41	1.46×1.47	2.17×2.18	2.39×2.38	2.58×2.31	2.80×2.18	2.31×2.99	2.69×3.11	2.52×3.43
灌丛体量指数 SSI	2.12	2.18	2.75	8.21	10.08	10.48	10.59	12.91	16.49	18.40
项目 Item	中怪柳 Middle shrubs						大怪柳 Large shrubs			
高度 Heigh/m	2.83	2.78	2.97	3.69	3.35	3.46	3.39	3.42	3.21	3.34
冠幅 Canopy/m×m	2.51×3.57	3.12×4.22	3.28×4.13	3.08×4.51	4.17×3.98	4.40×4.02	4.71×4.37	5.17×4.66	5.57×5.01	5.10×5.91
灌丛体量指数 SSI	19.92	28.75	31.60	40.26	43.67	48.11	54.80	64.71	70.35	79.14

SSI: 灌丛体量指数 Shrub size index

1.3 样品采集

测定怪柳枯立株根部的新生怪柳枝条数及其高度, 并在枯株冠下和冠外 4 个方向上进行样方 (0.5 m×0.5 m) 调查, 记录样方内物种数、株高、盖度、密度, 然后齐地面剪掉样方内所有植物, 称重并装入信封。随后, 用直径 3.5 cm 的土钻分别在不同大小怪柳群落中按怪柳冠下、冠缘、冠外的 4 个方向分 8 层 (0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60、60—80、80—100 cm) 取 1 m 深的土壤样品 (图 1), 相同深度土壤混合为一份样品。土样混合均匀并剔除植物根系和大块石头, 用自封袋装取 0.5 kg 带回实验室, 立即测其土壤含水量, 剩余土样自然风干测定 SOM。所有植物样品均在 80℃ 下烘干至恒重, 称重并计算地上植物量。

1.4 分析方法

1.4.1 冠下草本植物多样性测度

相对重要值 (P) = (相对密度 + 相对高度 + 相对盖度 + 相对地上植物量) / 4

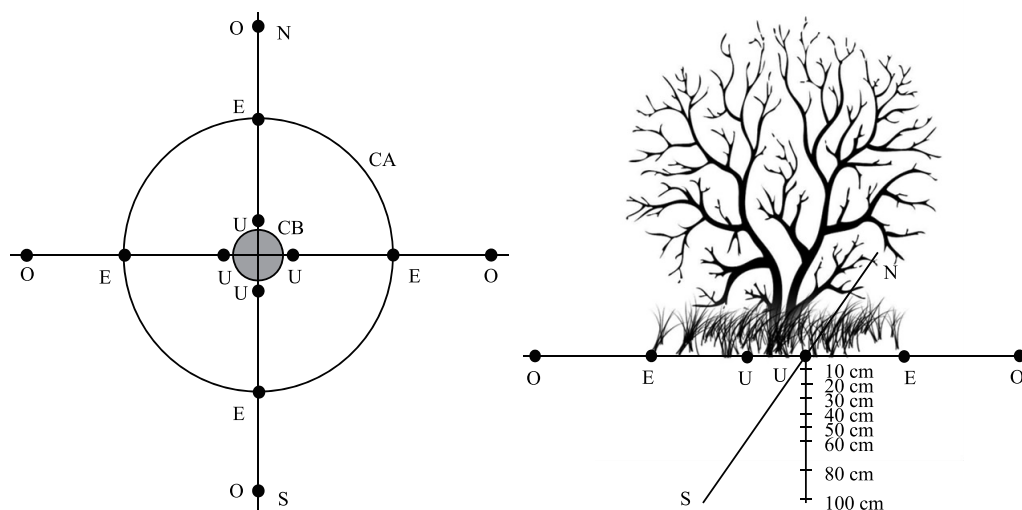


图1 单株柽柳灌丛周围采样点

Fig.1 Sampling points around individual *Tamarix ramosissima*

CA: 柽柳冠幅垂直投影 Vertical projection of *T. ramosissima* canopy; CB: 柽柳冠基垂直投影 Vertical projection of *T. ramosissima* crown base. O: 冠外采样点 Sampling point outside of canopies; E: 冠缘采样点 Sampling point edge of canopies; U: 冠下采样点 Sampling point under the canopies. North 和 South 分别表示北方向和南方向,左图为俯视图,右图为正视图

Margalef 丰富度指数: $R_m = (S - 1) / \ln N$

Simpson 优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2$

Shannon-Wiener 多样性指数: $H = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i)$

Pielou 均匀度指数: $E = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i) / \ln S$

式中, P_i 为种 i 的相对重要值, N 为样方中物种个体总数, S 为样方内物种数^[30-31]。

1.4.2 灌丛群落稳定性测度

在反映植被恢复、构建 CRI 和判断群落稳定性时,除了要关注草本植被的恢复,还要考虑柽柳灌木的恢复情况。柽柳根系发达,在火烧过后其根部并没有完全死亡,自然恢复过程中枯株的根部又重新长出新生枝条。参考张继义和赵哈林^[32]对恢复力稳定性测度方法,以火烧迹地柽柳新生枝条的数目及高度,冠下草本植物的密度、高度、盖度、地上植物量等 6 个指标经离差标准化后作为恢复力分指数 (RI , Resilience Index),将 RI 的算术平均值作为 CRI。CRI 是判断柽柳灌丛群落稳定性的指标, CRI 越大则恢复力越大,稳定性越强。

RI = 火烧迹地植被调查指标 (新生柽柳枝条数、高度,冠下植被密度、高度、盖度、地上植物量)

$$CRI = \sum_{i=1}^n RI/n, n=6$$

式中, RI 各指标数据均经过离差标准化处理,使 RI 和 CRI 均落在 $[0, 1]$ 内。

1.4.3 土壤理化分析

将采集回的土样在自然条件下风干后过筛 (1 mm 和 0.25 mm), 土壤 pH 值和可溶性盐用水土比 5:1 测定。土壤含水量的测定采用烘干恒重法, SOM 测定采用重铬酸钾外加热法。土壤可溶性总盐采用残渣烘干质量法, 土壤 pH 值采用 pH 计 (pHS-25, 中国上海仪电科学仪器股份有限公司) 测定^[33]。

1.4.4 数据处理

利用 SPSS 20.0 for Windows (IBM Corporation, Chicago, USA) 进行统计分析, 采用单因素方差分析法

(one-way ANOVA)对相同土层大、中、小灌丛的冠外、冠缘和冠下的土壤养分进行比较,显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。图表数据为平均值 $\pm$ 标准误,利用 ORIGIN 8.5(OriginLab Corporation, MA, USA)作图。

2 结果与分析

2.1 怪柳灌丛土壤资源岛特征

2.1.1 怪柳灌丛周围土壤水分特征

怪柳灌丛周围土壤含水量,水平分布上总体呈现冠下>冠缘>冠外的趋势,并且灌丛越大,灌丛区域(冠下和冠缘)土壤含水量越高。但是冠下和冠缘相同土层的含水量差异不显著,特别是在浅层(0—30 cm)土壤,部分冠缘土壤含水量大于相同土层冠下土壤含水量。垂直分布上,土壤含水量随着土层的加深而增大(表 2)。随着怪柳的发育,冠幅的增长,灌丛区域土壤含水量最低分别为 4.23%、5.34%和 5.76%,比相同深度的冠外土壤含水量提高了 7.73%、28.67%和 40.15%;灌丛周围土壤含水量最高分别是 18.68%、19.23%、23.97%。结果表明,荒漠生态系统怪柳灌丛群落的存在,明显提高了周围的土壤含水量,并且灌丛越大效果越明显。

表 2 不同大小下怪柳灌丛周围土壤含水率(平均值 $\pm$ 标准误)

Table 2 Soil moisture content around shrubs with different size (mean $\pm$ SE)/%

土层 Soil layer	小灌丛 Small shrubs			中灌丛 Middle shrubs			大灌丛 Large shrubs		
	冠外 Outside	冠缘 Edge	冠下 Under	冠外 Outside	冠缘 Edge	冠下 Under	冠外 Outside	冠缘 Edge	冠下 Under
0—10	4.10 $\pm$ 0.16c	4.23 $\pm$ 0.1c	6.15 $\pm$ 0.21a	4.15 $\pm$ 0.19c	5.34 $\pm$ 0.08ab	5.61 $\pm$ 0.28b	4.11 $\pm$ 0.35c	5.88 $\pm$ 0.07ab	5.76 $\pm$ 0.39ab
10—20	4.27 $\pm$ 0.08b	4.60 $\pm$ 0.49b	5.12 $\pm$ 0.58b	4.31 $\pm$ 0.24b	4.86 $\pm$ 0.76b	6.23 $\pm$ 0.52ab	4.56 $\pm$ 0.45b	8.50 $\pm$ 1.85a	6.80 $\pm$ 0.45ab
20—30	7.13 $\pm$ 0.14de	7.39 $\pm$ 0.14cd	5.87 $\pm$ 0.22e	6.91 $\pm$ 0.42d	8.07 $\pm$ 0.43bc	8.57 $\pm$ 0.42cd	7.56 $\pm$ 0.24e	11.46 $\pm$ 0.94a	9.56 $\pm$ 0.16b
30—40	10.72 $\pm$ 0.27b	8.61 $\pm$ 0.24b	10.19 $\pm$ 0.01b	7.12 $\pm$ 0.24b	8.95 $\pm$ 1.05b	9.49 $\pm$ 0.71b	9.89 $\pm$ 0.61b	13.67 $\pm$ 1.4a	14.66 $\pm$ 1.65a
40—50	10.64 $\pm$ 0.63a	12.14 $\pm$ 0.51a	12.3 $\pm$ 0.98a	10.04 $\pm$ 0.62a	12.24 $\pm$ 0.65a	11.27 $\pm$ 0.49a	9.91 $\pm$ 0.82a	13.46 $\pm$ 0.81a	12.98 $\pm$ 1.49a
50—60	13.43 $\pm$ 0.50bc	14.63 $\pm$ 0.77bc	15.49 $\pm$ 0.81ab	10.47 $\pm$ 0.41bc	13.55 $\pm$ 0.79c	14.15 $\pm$ 0.32ab	13.04 $\pm$ 0.44b	15.98 $\pm$ 0.4a	16.34 $\pm$ 1.02a
60—80	14.94 $\pm$ 2.39bc	14.64 $\pm$ 0.57bc	17.27 $\pm$ 0.07ab	13.95 $\pm$ 0.79c	14.79 $\pm$ 0.68c	15.85 $\pm$ 1.06ab	15.24 $\pm$ 0.76bc	18.04 $\pm$ 0.5ab	19.25 $\pm$ 0.83a
80—100	18.23 $\pm$ 1.52b	18.68 $\pm$ 0.16b	18.61 $\pm$ 0.51b	19.04 $\pm$ 1.42b	19.23 $\pm$ 0.75b	18.70 $\pm$ 2.16ab	19.15 $\pm$ 1.24b	23.97 $\pm$ 1.42a	21.41 $\pm$ 1.75ab
平均 Average	10.43 $\pm$ 1.79	10.56 $\pm$ 1.88	11.38 $\pm$ 1.90	9.50 $\pm$ 1.81	10.88 $\pm$ 1.76	11.23 $\pm$ 1.65	10.43 $\pm$ 1.79	13.87 $\pm$ 1.99	13.35 $\pm$ 2.01

同行不同小写字母表示相同土层大、中、小灌丛的冠外、冠缘和冠下土壤含水量差异显著($P < 0.05$)

2.1.2 怪柳灌丛周围土壤有机质空间分布

对怪柳灌丛周围 SOM 分析可知,灌丛周围出现了明显的资源岛特征(图 2)。灌丛间地(0—1 m)SOM 含量介于 0.54—1.21 g/kg,灌丛下方(冠下和冠缘)SOM 含量介于 0.56—2.95 g/kg。相同土层冠外、冠缘、冠下 SOM 含量差异明显主要出现在 0—40 cm 土层,其中差异最大出现在 0—10 cm 土层,SOM 含量最高也出现在 0—10 cm 土层。在 0—10 cm 土层,小灌丛冠缘和冠下的 SOM 比冠外提高了 10.43%和 82.61%,中灌丛冠缘和冠下的 SOM 比冠外提高了 29.57%和 133.04%,大灌丛冠缘和冠下的 SOM 比冠外提高了 13.91%和 82.52%,中灌丛冠下和边缘 0—10 cm SOM 大于小灌丛和大灌丛,这与恢复力稳定性的结果相一致。垂直方向上,SOM 含量随着土层的加深逐渐降低。

2.1.3 怪柳灌丛周围土壤 pH 值和可溶性盐分布

灌丛周围的土壤盐分和 pH 出现了明显的空间异质性分布。灌丛间地表土(0—20 cm)的 pH 值介于 7.96—8.01,而灌丛区域表土(0—20 cm)的 pH 值介于 7.91—8.19(图 3)。小灌丛冠下和冠缘 0—50 cm 土壤 pH 值显著高于冠外,呈现明显的“岛”状特征,但冠缘和冠下相同土层土壤 pH 值差异不明显,50—100 cm 土壤也呈“岛”状分布,但差异不明显。中灌丛 0—100 cm 土壤 pH 值呈现冠缘>冠外>冠下的趋势,且 0—40 cm 土壤之间差异显著。大灌丛 0—50 cm 土壤 pH 值呈现冠下>冠外>冠缘的趋势,且 0—30 cm 差异显著。在垂直方向上,土壤 pH 值随着土层的加深而逐渐减小。随着灌丛的增大,灌丛区域土壤 pH 值总体上呈现小灌丛>大灌丛>中灌丛的特征。

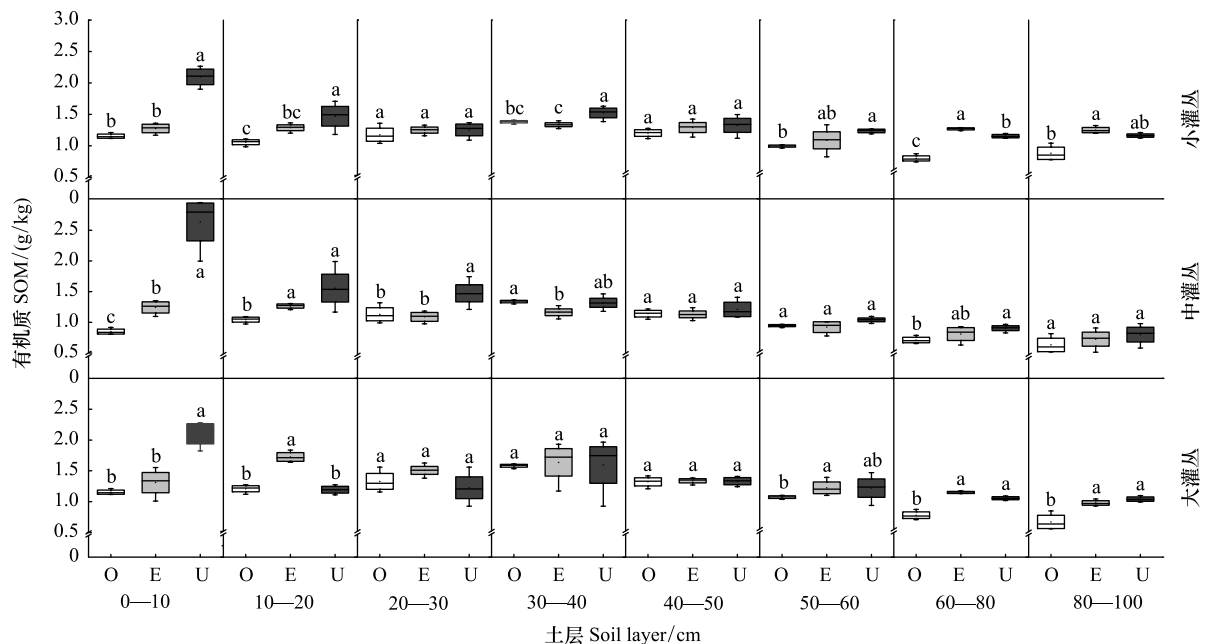


图2 不同大小柽柳灌丛周围土壤有机质分布

Fig.2 Spatial distribution of soil organic matter around *Tamarix ramosissima* with different size

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter. O: 冠外采样点 Sampling point outside of canopies; E: 冠缘采样点 Sampling point edge of canopies; U: 冠下采样点 Sampling point under the canopies. 不同小写字母表示相同土层冠外、冠缘和冠下土壤有机质含量差异显著 ($P < 0.05$)

土壤 pH 值的变化与土壤盐分密切相关,灌丛间地表土(0—20 cm)的可溶性盐含量介于 7.92—8.03 g/kg,灌丛区域表土(0—20 cm)的可溶性盐含量介于 2.47—5.25 g/kg(图 3)。柽柳周围土壤(0—100 cm)可溶性盐含量与土壤 pH 值呈现迥然不同的分布结果,大、中、小柽柳灌丛周围土壤可溶性盐分布呈现盐谷现象。且 0—40 cm 土层显著差异,0—10 cm 差异最大。在 0—10 cm 土层,小灌丛冠缘和冠下的可溶性盐比冠外降低了 37.98%和 53.55%,中灌丛冠缘和冠下的可溶性盐比冠外降低了 65.88%和 57.53%,大灌丛冠缘和冠下的可溶性盐比冠外降低了 49.16%和 46.70%,在 0—30 cm 土壤可溶性盐出现中灌丛<小灌丛<大灌丛的趋势,表明了柽柳灌丛能够抑制浅层土壤的可溶性盐,且中灌丛的抑盐效果最明显。水平方向上,小灌丛在 0—40 cm 土壤可溶性盐冠下大于冠缘,在 50—100 cm 则是冠缘大于冠下;中灌丛则是冠下大于冠缘;大灌丛在 0—60 cm 为冠缘大于冠下,在 60—100 cm 则是冠下大于冠缘,表明土壤可溶性盐含量的变化随灌丛大小的变化而变化。垂直方向上,土壤可溶性盐出现底聚现象,这与灌丛周围土壤 pH 值的变化截然相反。

2.2 火烧迹地柽柳及其冠下植被的自然恢复

2.2.1 柽柳及其冠下植被自然恢复特征

火烧迹地自然恢复 3 年后对植被恢复情况进行调查,发现柽柳自身和其冠下植被均得到了很好的恢复。由图 4 可知,大柽柳的新生枝条数及其高度明显高于小柽柳。由图 4 可知,灌丛下方草本植物的恢复明显优于灌丛间地。大、中、小灌丛冠下植物的密度比冠外分别提高了 34.26%、48.46%和 44.03%,高度比冠外分别提高了 126.32%、208.94%和 321.84%,盖度比冠外分别提高了 190.91%、210.36%和 218.18%,地上植物量比冠外分别提高了 467.77%、552.98%和 636.20%,即冠下植物的高度、盖度、密度和地上植物量明显高于灌丛间地,且随着灌丛的增大而增大,但大、中、小灌丛之间差异不明显。

2.2.2 柽柳冠下植被的群落多样性

随着柽柳的发育,Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数均具有类似的变化趋势,总体上呈现先降后升的趋势(图 5),这与 CRI 随 SSI 的变化截然相反。Simpson

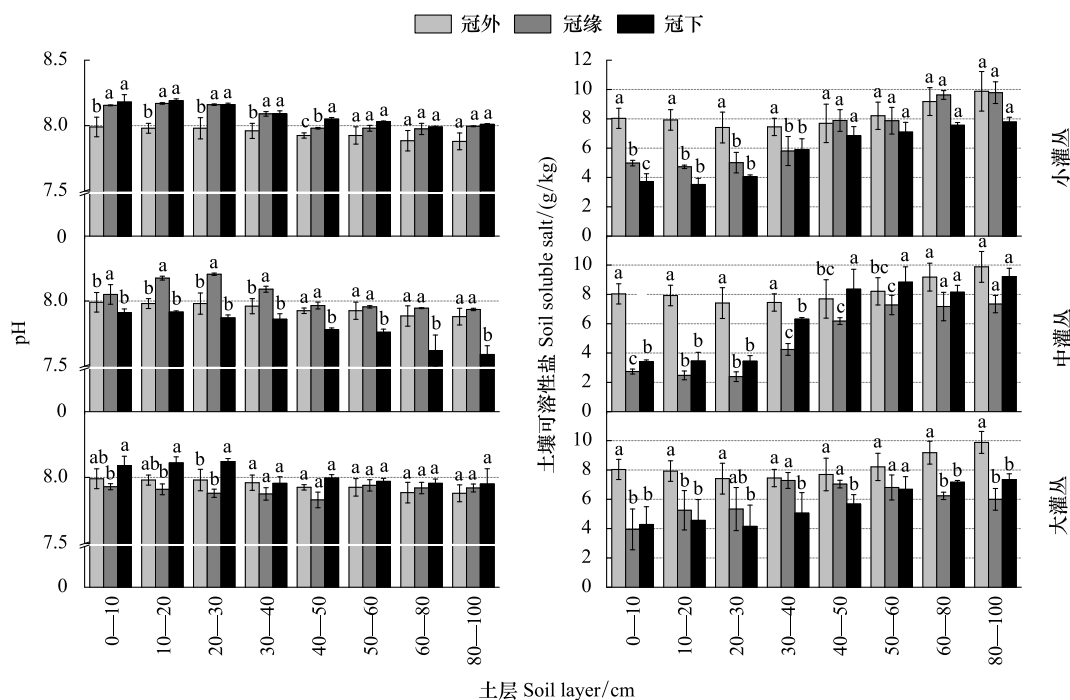


图3 不同大小柽柳灌丛周围土壤 pH 和可溶性盐分布

Fig.3 Spatial distribution of soil soluble salt and pH around *Tamarix ramosissima* with different size

不同小写字母表示相同土层冠外、冠缘和冠下土壤 pH 值和可溶性盐含量差异显著 ($P < 0.05$)

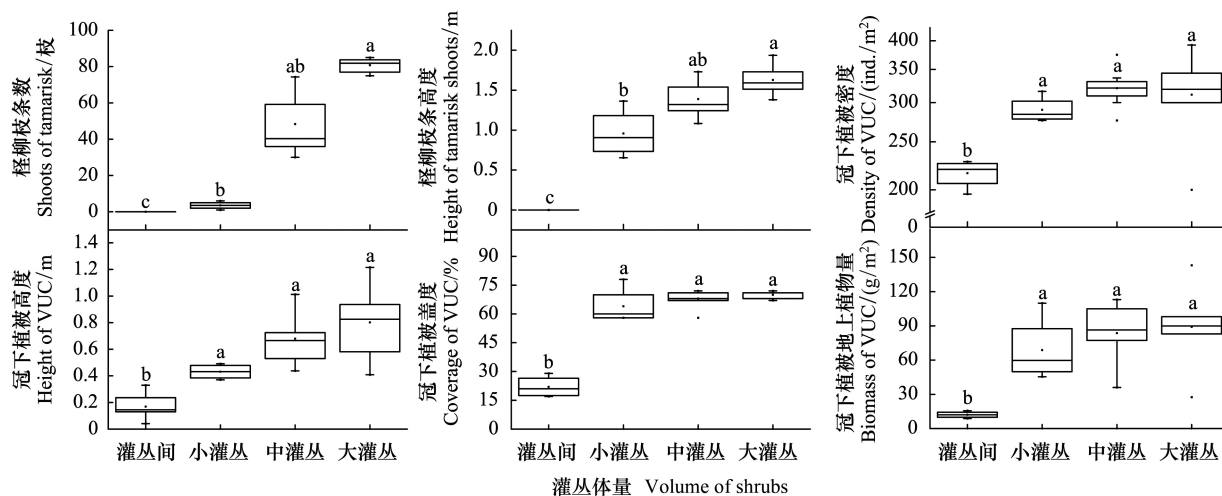


图4 不同大小柽柳灌丛群落恢复情况

Fig.4 Restoration of *Tamarix ramosissima* shrub communities with different size

VUC: 冠下植被 Vegetation under the canopies; 不同小写字母表示灌丛间和大、中、小柽柳灌丛恢复特征差异显著 ($P < 0.05$)

优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数分别在 0.45—0.78、0.65—1.56 之间变化,当 SSI 分别为 66.95 和 51.47 时出现最小值。Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数分别在 0.25—0.99、0.91—0.98 之间变化,当 SSI 为 65.38 和 44.12 时出现最小值。说明在火烧迹地自然恢复 3 年后,柽柳及其冠下植被组成的群落结构仍极为简单,几乎为单优势群落,且灌丛间地的植物多样性最为丰富。

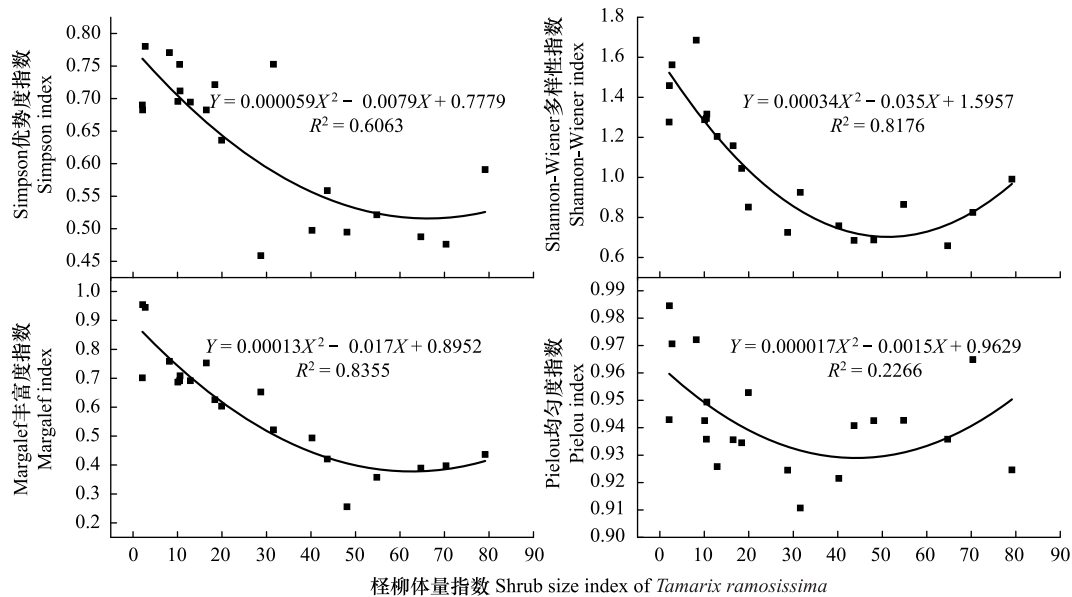


图5 不同大小柽柳灌丛群落多样性指数

Fig.5 Community diversity index of *Tamarix ramosissima* shrub communities with different size

2.3 柽柳灌丛群落的恢复力稳定性

CRI 随 SSI 呈单峰变化,灌丛间地的恢复力最弱,随着柽柳的增大恢复力逐渐增强,当 SSI 为 52.17 时, CRI 出现最大值,随后恢复力逐渐减弱,但是在不同的发育阶段每个功能变量对群落稳定性的影响却不相同(图 6)。当柽柳灌丛较小时,冠下草本植被的密度和地上植物量指标分别占 CRI 的 41.13% 和 23.08%;随着柽柳灌丛的继续发育,冠下植被的密度、盖度对 CRI 的影响最大,占 20.64% 和 19.74%;当柽柳发育的一定阶段,火烧迹地柽柳根部的新生枝条及其高度对 CRI 的影响最大,分别占 23.54% 和 19.18%。从火烧迹地柽柳灌丛恢复情况来看,柽柳根部新生枝条的数量随着灌丛的发育占 CRI 的 6.68%、12.86% 到 23.54%,新生枝条的高度随灌丛的发育对 CRI 的影响为 12.76%、19.05% 到 19.18%。而柽柳冠下植被的密度对 CRI 的影响随着灌丛的发育则不断降低,由 41.13%、20.64% 到 14.61%,冠下植被地上植物量的变化趋势与密度变化趋势相一致。综上可知,柽柳灌丛较小时,火烧迹地植被以冠下草本植物的恢复为主;而当柽柳较大时,则以柽柳自身的恢复为主。表明在火烧干扰下,小柽柳灌丛主要依靠冠下草本植物的恢复维持着群落的稳定性,而大柽柳灌丛主要依靠柽柳植株的恢复维持着群落的稳定性。

3 讨论

3.1 柽柳灌丛资源岛特征

荒漠生态系统中水盐是影响植物生长的最重要的因素^[20],灌丛区域土壤含水量明显高于冠外,并且灌丛越大效果越明显。灌丛除了形成遮阴环境减少冠下土壤水分的蒸发外,其根系还能吸收地下水并且在夜间释放到浅层土壤,即提水效应^[34-35]。灌丛周围 SOM 明显大于冠外,最大值出现在 0—10 cm 土层。这是一个普遍现象,很多研究表明不仅灌丛区域 SOM 高于灌丛间地,速效养分和全效养分也呈这种分布特征^[5,9,12]。这与凋落物的回归和根系的更新有关^[36],凋落物落在土壤表层进行分解使冠下 0—10 cm SOM 含量最高。中灌丛适度的遮阴作用促进了冠下草本植物的生长,地上植物量大于小灌丛和大灌丛,使得积肥效果最佳。

荒漠盐碱地区限制植物生长的另一个重要因素就是土壤盐分,灌丛间地表层土壤(0—20 cm)的 pH 值介于 7.91—8.19,可溶性盐含量介于 7.92—8.03 g/kg,属于重度盐渍化和碱化土壤,只有耐盐植物才能生长良好^[37]。在 0—40 cm 土层,大、中、小柽柳灌丛周围土壤可溶性盐分布呈现明显的盐谷现象(图 3)。这个结果

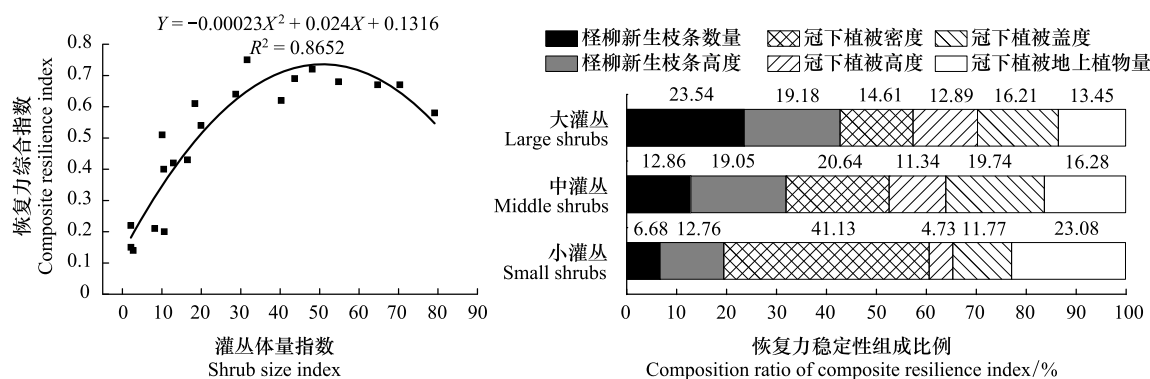


图6 不同大小柽柳灌丛恢复力稳定性及其组成比例的变化

Fig.6 Resilience stability and composition ratio of *Tamarix ramosissima* shrub communities with different size

与李从娟等^[38]研究结果相似,他们认为梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的树干径流将盐分带走,在根部附近形成低盐环境^[39]。但还有很多报道发现在灌丛主干附近会富集更多的盐分形成盐岛^[11,40],张立华等^[41]认为这种差异与盐生植物的不同耐盐机理有关,柽柳、盐穗木(*Halostachys caspica*),红砂(*Reaumuria songarica*)等都是泌盐植物,其径流液中盐分较高^[38]从而形成盐岛。盐随水动,冠外土地裸露水分蒸发速率快,使冠下水分向冠外扩散,盐分也随之迁移,形成盐谷;柽柳叶片和树干表面附着盐分,研究表明树干径流液中可溶性盐含量显著高于雨水^[38],径流液把盐分带到灌木主干附近土壤,且植物需要蒸腾,根系需要吸水,导致土壤可溶性盐随水分向植物根部迁移,这些都是形成盐岛的重要因素。因此,这些不同的研究结果与生境的不同有很大关系,同时,植物对离子的选择性吸收也影响着土壤盐分的分布,到底哪个途径占主导因素有待进一步研究。而pH值出现岛状分布,与可溶性总盐含量的分布特征截然不同,说明试验地土壤可溶性盐主要以中性盐为主,因为pH值的大小与碱性离子分布一致。值得注意的是这里的土壤资源岛现象并不是指灌下土壤水分、养分、盐分和pH均大于灌外,而是灌下的土壤微环境更适合植物的生长,这也是干旱半干旱地区灌木被称为庇护植物的重要原因。

3.2 枯立株周围植被恢复特征及群落多样性

柽柳越大根系越发达,利用地下水能力越强。不同体量柽柳灌丛的新生枝条的数目和高度差异不明显,可能与地下水位较低(试验地地下水位深3.4 m)和火烧强度有关系,火烧强度较弱并不能烧死灌木($SSI > 2.12$)。柽柳作为庇护植物,对冠下草本植物的生长影响甚大^[42]。枯立株冠下和冠缘草本植物的恢复显著优于冠外,这与灌丛土壤含水率、SOM和盐分的分布是一致的,表明了资源岛对植被恢复的促进作用。总体上,荒漠植物群落结构简单,柽柳冠下植被物种组成为2—5种,Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Margalef丰富度指数和Pielou均匀度指数均偏低且呈现先降后升的趋势。这可能与土壤盐碱化程度有关,随着灌丛的增大冠下表土(0—30 cm)的可溶性盐含量逐渐增大,并且表土的pH值也是随着灌丛增大而协同变化,pH值的变化与土壤碱性盐离子分布是一致的,而碱性盐离子(如 CO_3^{2-} 和 HCO_3^-)对植物的伤害显著大于中性离子^[37]。但多样性变化趋势与种源聚集效应并不冲突,灌丛区域草本植物的密度显著高于灌丛间地(图4),可能是灌木拦截风中的种子并将其聚集在灌丛区域^[43],导致冠下土壤种子库高于冠外。

3.3 柽柳灌丛群落稳定性

柽柳灌丛体量大小基本可以体现资源岛的形成时间,探究不同大小柽柳灌丛群落的稳定性,实则是研究不同形成时间的资源岛土壤对灌丛群落稳定性的影响。选择火烧迹自然恢复的植被更加符合稳定性的定义——受到外力干扰下,群落恢复到原来水平的能力,并且林火的清除作用也使得统计和计算更加方便和准确。柽柳群落CRI随着柽柳的发育呈现先升后降的趋势,可以从柽柳自身及其冠下植被的恢复来进行解释。当柽柳很小时,柽柳根系利用到地下水能力较弱,形成的肥岛特征还不明显,且抵抗火烧干扰的能力弱,从而

使其恢复非常缓慢,这时主要以冠下草本植物的恢复为主。结果表明小柽柳冠下植被恢复力占恢复力综合指数的 80.76%,且其中密度和地上植物量分别占 41.13%和 23.08%(图 6),这也可能与土壤种子库和资源岛土壤密切相关^[43]。随着灌丛的增大,恢复力稳定性也逐渐增大,这主要与柽柳灌木的恢复有关。随着柽柳的生长,利用地下水的能力增强^[34],并且火烧只能烧死地上枝干,柽柳近地面及浅土层根部能够生长出新的枝条。因此大柽柳新生枝条的恢复能占恢复力综合指数的 42.72%,冠下植被的密度和地上植物量反而降低到了 14.61%和 13.65%,说明此时主要是柽柳自身的恢复为主,并且柽柳又会形成遮阴环境庇护土壤动物和微生物,凋落物返还促进冠下植物的生长,形成良性循环^[14,42]。但当 SSI 大于 52.17 时,恢复力稳定性又逐渐降低。这可能是由于灌丛太大,即使形成了很好的资源岛土壤,也因郁闭度大限制了冠下草本植物的生长。

综上所述,酒泉盐碱地柽柳灌丛地火烧 3 年后植被得到了很好的恢复,这与柽柳形成的资源岛土壤有很大关系。柽柳能够积聚土壤水分和养分,抑制土壤可溶性盐,庇护冠下植物的生长,促进了火烧迹地植被的自然恢复,但影响植被自然恢复的因素众多,与资源岛间的定量关系有待进一步研究。

4 结论

在西北荒漠火烧迹地灌丛植被的自然恢复过程中,无论是柽柳新生枝条的数目和灌丛高度,还是冠下草本植物的盖度、密度、高度和地上植物量,均随柽柳枯立株体量的增大而增大,火烧前灌丛体量是影响植被恢复效果的主要因素。柽柳冠下草本植物多样性随枯立株的增大呈先降后升的趋势,与柽柳灌丛群落的稳定性变化相反,恢复力综合指数随柽柳的生长先升后降,且当体量为 52.17 时柽柳群落稳定性最高,而多样性较低。当群落受到外力破坏(如火烧),小柽柳群落主要以冠下草本植物的恢复维持群落稳定性,而大柽柳群落主要以灌木的恢复来维持群落稳定性,这与柽柳灌丛群落形成的资源岛特性相关。荒漠灌丛区域(冠下和冠缘)土壤水分和有机质显著高于冠外,而可溶性盐低于冠外,这种“高养低盐”的土壤资源岛特征是促进火烧迹地植被自然恢复的重要因素。

参考文献 (References):

- [1] Zhao H L, Liu R T. The “bug island” effect of shrubs and its formation mechanism in Horqin Sand Land, Inner Mongolia. *Catena*, 2013, 105: 69-74.
- [2] Xu W X, Liu W, Yang W K, Tang C W, David B. *Rhombomys opimus* contribution to the “fertile island” effect of tamarisk mounds in Junggar Basin. *Ecological Research*, 2012, 27(4): 775-781.
- [3] Iwaoka C, Imada S, Taniguchi T, Du S, Yamanaka N, Tatenos R. The impacts of soil fertility and salinity on soil nitrogen dynamics mediated by the soil microbial community beneath the halophytic shrub tamarisk. *Microbial Ecology*, 2018, 75(4): 985-996.
- [4] Li X Q, Xia J B, Zhao X M, Chen Y P. Effects of planting *Tamarix chinensis* on shallow soil water and salt content under different groundwater depths in the Yellow River Delta. *Geoderma*, 2019, 335: 104-111.
- [5] Zhou Y, Boutton T W, Wu X B. Woody plant encroachment amplifies spatial heterogeneity of soil phosphorus to considerable depth. *Ecology*, 2018, 99(1): 136-147.
- [6] Garcia D E, Lopez B R, De-Bashan L E, Hirsch A M, Maymon M, Bashan Y. Functional metabolic diversity of the bacterial community in undisturbed resource island soils in the southern Sonoran Desert. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(5): 1467-1477.
- [7] Ochoa-Hueso R, Eldridge D J, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Bowker M A, Gross N, Le Bagousse-Pinguet Y, Quero J L, García-Gómez M, Valencia E, Arredondo T, Beinticenco L, Bran D, Cea A, Coaguila D, Dougill A J, Espinosa C I, Gaitán J, Guuroh R T, Guzman E, Gutiérrez J R, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jeffries T, Linstädter A, Mau R L, Moneris J, Prina A, Pucheta E, Stavi I, Thomas A D, Zaady E, Singh B K, Maestre F T. Soil fungal abundance and plant functional traits drive fertile island formation in global drylands. *Journal of Ecology*, 2018, 106(1): 242-253.
- [8] Carrillo-García Á, Bashan Y, Bethlenfalvai G J. Resource-island soils and the survival of the giant cactus, cardon, of Baja California Sur. *Plant and Soil*, 2000, 218(1/2): 207-214.
- [9] Rong Q Q, Liu J T, Cai Y P, Lu Z H, Zhao Z Z, Yue W C, Xia J B. “Fertile island” effects of *Tamarix chinensis* Lour. on soil N and P stoichiometry in the coastal wetland of Laizhou Bay, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 864-877.
- [10] 王世林, 曹文侠, 王小军, 李文, 李小龙, 王金兰. 河西走廊荒漠盐碱地人工柽柳林土壤水盐分布. *应用生态学报*, 2019, 30(8): 2531-2540.
- [11] Yin C H, Feng G, Zhang F S, Tian C Y, Tang C X. Enrichment of soil fertility and salinity by tamarisk in saline soils on the northern edge of the

- Taklamakan Desert. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(12): 1978-1986.
- [12] Anthelme F, Dangles O. Plant-plant interactions in tropical alpine environments. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(5): 363-372.
- [13] Burke I C, Lauenroth W K, Vinton M A, Hook P B, Kelly R H, Epstein H E, Aguiar M R, Robles M D, Aguilera M O, Murphy K L, Gill R A. Plant-soil interactions in temperate grasslands. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1/2): 121-143.
- [14] 陈广生, 曾德慧, 陈伏生, 范志平, 耿海东. 干旱和半干旱地区灌木下土壤“肥岛”研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2295-2300.
- [15] Hurd L E, Mellinger M V, Wolf L L, McNaughton S J. Stability and diversity at three trophic levels in terrestrial successional ecosystems. *Science*, 1971, 173(4002): 1134-1136.
- [16] Pimm S L. The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 1984, 307(5949): 321-326.
- [17] 王国宏. 再论生物多样性与生态系统的稳定性. *生物多样性*, 2002, 10(1): 126-134.
- [18] 黄祥童, 王绍先, 黄炳军, 尹航, 崔凯峰, 赵伟, 范宇光, 顾德峰. 珍稀植物对开蕨与其伴生物种的联结性及群落稳定性. *生态学报*, 2015, 35(1): 80-90.
- [19] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. *林业科学*, 2000, 36(5): 28-32.
- [20] 王恒方, 吕光辉, 周耀治, 曹靖. 不同水盐梯度下功能多样性和功能冗余对荒漠植物群落稳定性的影响. *生态学报*, 2017, 37(23): 7928-7937.
- [21] 张明霞, 王得祥, 彭舜磊, 黄雅昆, 张岗岗. 秦岭松栎混交林群落的稳定性. *生态学报*, 2015, 35(8): 2564-2573.
- [22] Fujita T, Yamashina C. Do consumer-mediated negative effects on plant establishment outweigh the positive effects of a nurse plant? *Ecology and Evolution*, 2018, 8(7): 3702-3710.
- [23] 安超平, 王兴, 宋乃平, 周娟, 随金明. 荒漠草原中间锦鸡儿林土壤养分效应对群落组分和多样性的影响. *西北植物学报*, 2016, 36(9): 1872-1881.
- [24] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 尹云锋, 谢锦升. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2015, 35(9): 2800-2809.
- [25] 王会来, 刘娟, 姜培坤, 周国模, 李永夫, 吴家森. 营林措施对森林土壤 N_2O 排放影响的研究进展. *土壤学报*, 2018, 55(1): 18-30.
- [26] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, Cross A F. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, 77(2): 364-374.
- [27] 王显国, 韩建国, 刘富渊, 仲勇. 刈割对紫花苜蓿生殖生育期的调控及对种子产量和质量性状的影响. *草地学报*, 2005, 13(4): 274-277.
- [28] Qu L Y, Wang Z B, Huang Y Y, Zhan Y X, Song C J, Ma K M. Effects of plant coverage on shrub fertile islands in the Upper Minjiang River Valley. *Science China Life Sciences*, 2018, 61(3): 340-347.
- [29] Liu R T, Liu J N, Zhao J, Xi W H, Yang Z M. Ground-active arthropod recovery in response to size of shrub plantations in a desertified grassland ecosystem. *Polish Journal of Ecology*, 2017, 65(3): 410-422.
- [30] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 58-67.
- [31] 马克平. 生物群落多样性的测度方法: $I\alpha$ 多样性的测度方法(上). *生物多样性*, 1994, 2(3): 162-168.
- [32] 张继义, 赵哈林. 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较. *生态学报*, 2011, 31(20): 6060-6071.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-188.
- [34] Xia J B, Zhao X M, Chen Y P, Fang Y, Zhao Z G. Responses of water and salt parameters to groundwater levels for soil columns planted with *Tamarix chinensis*. *PLoS one*, 2016, 11(1): e0145828.
- [35] 李唯, 倪郁, 胡自治, 李胜. 植物根系提水作用研究述评. *西北植物学报*, 2003, 23(6): 1056-1062.
- [36] Smyth C E, Titus B, Trofymow J A, Moore T R, Preston C M, Prescott C E. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing wood blocks in Canadian forests. *Plant and Soil*, 2016, 409(1/2): 459-477.
- [37] 刘太祥, 毛建华, 马履一, 刘洪庆. 中国盐碱滩地生态综合改良与植被构建技术. 天津: 天津科学技术出版社, 2011: 6-9.
- [38] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 王永东, 范敬龙. 树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制. *生态学报*, 2012, 32(15): 4819-4826.
- [39] Li C J, Li Y, Ma J. Spatial heterogeneity of soil chemical properties at fine scales induced by *Haloxylon ammodendron* (Chenopodiaceae) plants in a sandy desert. *Ecological Research*, 2011, 26(2): 385-394.
- [40] 尹传华, 冯固, 田长彦, 白灯莎, 张福锁. 塔克拉玛干沙漠边缘怪柳对土壤盐分分布的影响. *中国环境科学*, 2007, 27(5): 670-675.
- [41] 张立华, 陈沛海, 李健, 陈小兵, 冯亚. 黄河三角洲怪柳植株周围土壤盐分离子分布. *生态学报*, 2016, 36(18): 5741-5749.
- [42] Mihoč M A K, Giménez-Benavides L, Pescador D S, Sánchez A M, Cavieres L A, Escudero A. Soil under nurse plants is always better than outside: a survey on soil amelioration by a complete guild of nurse plants across a long environmental gradient. *Plant and soil*, 2016, 408(1-2): 31-41.
- [43] Wang Y C, Ooi M K J, Ren G H, Jiang D M, Musa A, Miao R H, Li X H, Zhou Q L, Tang J, Lin J X. Species shifts in above-ground vegetation and the soil seed bank in the inter-dune lowlands of an active dune field in Inner Mongolia, China. *Basic and Applied Ecology*, 2015, 16(6): 490-499.