

DOI: 10.5846/stxb201306041326

马全林, 卢琦, 魏林源, 靳虎甲. 干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征. 生态学报, 2015, 35(7): 2285-2294.

Ma Q L, Lu Q, Wei L Y, Jin H J. Varying characteristics of soil seed banks during the succession process of *Nitraria Tangutorum* vegetation in an arid desert area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2285-2294.

干旱荒漠白刺灌丛植被演替过程土壤种子库变化特征

马全林^{1,2,*}, 卢琦¹, 魏林源², 靳虎甲²

1 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

2 甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地, 兰州 730070

摘要: 土壤种子库是反映气候与土地利用变化的指示器,也是荒漠植被更新与恢复的基础。典型荒漠白刺灌丛植被广泛分布于我国西北绿洲边缘地带,对保护绿洲免受风沙危害发挥着重要作用。但是,对干旱荒漠白刺灌丛植被土壤种子库仍未见研究报道。应用空间代替时间的方法,选择石羊河下游白刺灌丛植被演替的初始阶段、稳定阶段、衰退阶段与严重衰退阶段样地,研究了白刺灌丛植被演替过程的土壤种子库物种组成、时空分布和数量变化特征。结果表明:石羊河下游白刺灌丛植被演替过程中,土壤种子库共出现 9 科 18 种植物,其中草本植物占到 55%—80%,是白刺灌丛植被土壤种子库的主体。不同演替阶段土壤种子库密度以稳定阶段最高,达到 660.7 粒/m²,是初始阶段、衰退阶段和严重衰退阶段的 5.6、14.5 倍和 6.2 倍。不同沙堆部位,土壤种子库密度以迎风坡中部与背风坡中部最高,分别达到 329 粒/m²和 309 粒/m²;沙堆土壤种子库密度是堆间地的 1.9 倍,土壤种子库主要分布于灌丛沙堆上。不同演替阶段土壤种子库间的相似性系数均在 0.6 以下,除稳定阶段外,其他阶段间均属于中等相似水平;土壤种子库与地上植被的相似性系数均在 0.5 以上,达到中等相似或极相似水平。该研究进一步证明了灌丛沙堆和土壤种子库在白刺灌丛植被中的重要性,也说明人为干扰损害了白刺灌丛地下潜在植被及其恢复潜力。因此,需要开展人工种子库或人工植被建设以控制干旱荒漠白刺灌丛沙堆活化,并实现退化白刺灌丛植被恢复。

关键词: 石羊河下游; 白刺灌丛植被; 灌丛沙堆; 土壤种子库; 相似性

Varying characteristics of soil seed banks during the succession process of *Nitraria Tangutorum* vegetation in an arid desert area

MA Quanlin^{1,2,*}, LU Qi¹, WEI Linyuan², JIN Hujia²

1 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 State Key Laboratory Breeding Base of Gansu Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China

Abstract: The seed bank is the collection of viable seeds present on or within the soil at any given time. Soil seed bank is an important indicator in response to changes in land utilization and climate, and also forms the basis for desert vegetation restoration and development. *Nitraria* vegetation is typical of desert vegetation and with nebkhas is widely distributed along the periphery of oasis in the arid regions of Northwest China, playing an important role in desertification control around oases. In recent decades, *Nitraria* vegetation in the oasis-desert ecotone has been seriously degraded due to the rapid decrease of the groundwater table caused by agricultural over development. However, there is little information regarding the change in characteristics of the soil seed bank of *Nitraria* nebkhas in arid desert areas. Using the method of substituting

基金项目: 国家 973 项目 (2012CB723203); 国家自然科学基金项目 (41061030, 31270754); 中国博士后科学基金项目 (20110490474, 2012T50162); 国家科技支撑计划 (2012BAD16B0203)

收稿日期: 2013-06-04; **网络出版日期:** 2014-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mql925@126.com

space for time, the species composition, distribution pattern and quantitative variation of soil seed banks of *N. Tangutorum* nebkhas in initial, stable, degraded and severely degraded stages were studied in the lower reaches of the Shiyang River. Results showed that the soil seed bank of *N. Tangutorum* nebkha in the lower reaches of the Shiyang River was composed of 18 species, belonging to 9 families. Herb species accounted for 55%—80% and were the main body of soil seed banks. The soil seed density of the stable stage was 660.7 seeds/m², and was the highest, being 5.6, 14.5 and 6.2 times greater than those measured in the initial stage, degraded stage and severely degraded stage, respectively. The soil seed density of the degraded stage was 45.7 seeds/m², and was the lowest, only accounting for 38.9%, 6.9% and 42.5% of those measured in the initial stage, stable stage and severely degraded stage, respectively. The soil seed density of the *N. Tangutorum* population at the different succession stages was also significantly different, showing a decreasing trend after the initial increase. The soil seed density of *N. Tangutorum* population at the stable stage reached 9.33 seeds/m². The soil seed density in different positions of *N. Tangutorum* nebkhas was significantly different and was mainly distributed in the central parts of the windward and leeward slopes of *N. Tangutorum* nebkhas, with seed densities of 329 seeds/m² and 309 seeds/m², respectively. The mean soil seed density of the nebkhas was 1.9 times that in the depressions within the nebkhas. Similarity coefficients of soil seed banks between the different succession stages were less than 0.6, which were recognized as having a moderate similarity level except for the stable stage which showed a low similarity coefficient. There were more common species which accounted for over 65% of vegetation above ground and the soil seed bank. Similarity coefficients between vegetation above ground and the soil seed bank were more than 0.5, which showed a moderate to extreme similarity level, and demonstrated a decreasing trend after the initial increase. The findings have proven the importance of soil seed banks and *Nitraria* nebkhas in *Nitraria* vegetation and also suggest that human disturbance has impacted potential underground vegetation and its restoration capacity. Therefore, man-made soil seed banks or vegetation construction should be adopted to contain *Nitraria* nebkhas activation and restore degraded *Nitraria* vegetation in arid desert areas.

Key Words: the lower reaches of the Shiyang River; *Nitraria* vegetation; nebkhas; soil seed bank; similarity

土壤种子库是反映气候与土地利用变化的指示器,预示着将来与环境变化有关的植被变化,在连接过去、现在和将来的植物种群、群落结构与动态中起着重要的生态作用,也是荒漠植被更新与恢复的基础^[1-2],因此研究土壤种子库特征可为揭示植被退化/恢复演替机理提供重要依据。白刺灌丛(*Nitraria* spp.)是我国干旱荒漠植被的重要建群种之一,广泛分布于西北沙漠地区,其抗旱耐瘠薄,特别喜沙埋,埋后枝节生出不定根与新植株,拦阻并积聚风沙逐渐形成丘状沙堆,在保障干旱荒漠区生态安全中发挥着极其重要的作用^[3-6]。石羊河下游民勤县天然白刺灌丛植被面积达到 15.2 万 hm²,占该区域天然灌木林的 31.6%,是阻止腾格里和巴丹吉林两大沙漠合拢,保障民勤绿洲生态安全的首要生态屏障。但是,受农业大规模用水引起的地表水大幅度减少与地下水位降低的影响,白刺灌丛植被出现了不同程度退化,并相继发生了沙堆的风蚀、流动,严重影响和削弱了白刺灌丛植被的生态屏障作用^[6-9]。关于白刺灌丛植被的退化与恢复已成为干旱区生态研究的热点之一,已开展了白刺灌丛植被退化原因、恢复技术以及土壤呼吸、风蚀等退化特征研究,但对作为潜在植被的地下土壤种子库物种组成、演变规律以及影响因素等尚未见报道^[6,9-10]。

本研究采用空间代替时间的方法,在石羊河下游选择不同演替阶段的白刺灌丛植被,研究了其土壤种子库的物种组成、数量特征及其与地上植被的关系,以揭示干旱荒漠白刺灌丛演替过程中土壤种子库的变化规律,探讨白刺灌丛植被的自我修复能力,为退化白刺灌丛植被的恢复提供理论与技术支撑。

1 研究区概况

研究区选择地处于干旱荒漠区的甘肃省民勤县(38°05′—39°06′ N, 103°02′—104°02′ E),其属于我国典型的绿洲型荒漠地区,东、西、北三面被腾格里沙漠与巴丹吉林沙漠包围,气候属温带荒漠气候,多年平均气温

7.6 °C,降水量 113.2 mm,蒸发量 2604.3 mm;全年盛行西北、西北偏西风,平均风速 2.5 m/s,大风日数 26.3 d,沙尘暴日数 25.0 d,扬沙日数 37.5 d,浮尘日数 29.7 d(民勤治沙综合试验站 1961—2011 年气象统计资料)。土壤多为风沙土,养分贫瘠且风蚀严重。地表水资源由 20 世纪 50 年代的 5.731 亿 m³减少到本世纪初期的 1.0 亿 m³左右。地下水位由 1961 年的 2.2 m 下降到 2001 年的 18.4 m,每年以 0.50—0.71 m 的速度下降。2008 年实施石羊河流域综合治理工程后,通过增加石羊河下泄流量和关井压田等措施的实施,缓解了地下水位下降。固沙植被中,乔木胡杨(*Populus euphratica*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)已全部枯死,灌木梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、红柳(*Tamarix* spp.)和白刺(*Nitraria* spp.)出现严重衰败^[8]。水资源的减少,植被的退化使研究区成为全国浮尘、扬沙和沙尘暴发生最严重地区之一,也成为我国沙尘暴的主要策源地之一。

2 研究方法

2.1 样地设置

以唐古特白刺(*Nitraria Tangutorum*)荒漠灌丛植被为研究对象,根据白刺灌丛植被生长及灌丛沙堆形态和结皮状况,采用空间代替时间序列的方法,选择石羊河下游民勤县红土井、青土湖、三角城、沙井子白刺灌丛沙堆样地分别代表白刺灌丛植被演替的初始阶段、稳定阶段、衰退阶段和严重衰退阶段^[10]。其中,三角城衰退阶段和沙井子严重衰退阶段样地位于绿洲边缘,受绿洲地下水过度利用的严重人为干扰影响。

2.2 土壤种子库取样、萌发与鉴定

2010 年 7 月(荒漠植物开花、结实期),在白刺灌丛植被不同演替阶段样地,选择平均大小的沙堆 5 个,每个沙堆沿西北—东南走向(研究区主风向),在沙堆迎风坡脚、迎风面中部、顶部、背风面中部、背风坡脚和堆间地使用专制取样框采集土壤样品,采样框大小 25 cm×25 cm。由于沙漠地区种子库主要分布于表层土壤,因此采样深度仅设置 0—5 cm^[2]。

为缩短萌发培养时间,提高种子萌发率,土壤种子库样品用 0.2 mm 的小网土壤筛进行浓缩处理^[2]。浓缩样品充分混匀后平铺于高 25 cm,半径 20 cm 的圆形花盆(底部装有 120 °C 高温处理的沙丘沙),厚度为 1—2.5 cm,上盖保护性纱网防止外来种子污染,在简易温室中进行萌发培养^[2]。用洒水壶适时浇水保持土壤湿润,逐日观察记录种子萌发情况,对萌发的不同幼苗进行标记,待能鉴别出植物种后除去,萌发培养持续 1 月时间。

2.3 白刺灌丛植被及沙堆调查

在不同演替阶段样地,间隔 200 m 设置 30 m×30 m 大样方 3 个,调查白刺灌丛植被组成与数量特征,测定样方内每个白刺灌丛沙堆的长轴、短轴、高度以及白刺灌丛高度、枝条长度和生物量等。同时,在每个大样方内设置 1 m×1 m 的小样方 5 个,调查草本植物的组成与数量,并统计地上植被种类组成及其密度、盖度等。

不同演替阶段样地植被盖度以及白刺灌丛沙堆长轴、短轴、高度及其覆盖度、生物量总体差异显著。其中,白刺灌丛沙堆长轴、短轴、高度均以衰退阶段最大,初始阶段最小,沙堆大小总体随白刺灌丛植被演替过程逐渐增大,但严重衰败阶段沙堆因风蚀活化而变小。沙堆灌丛覆盖度、单位面积生物量以及群落盖度以稳定阶段最大,严重衰退阶段最小,随白刺灌丛植被演替过程呈先增大后降低趋势(表 1)。

2.4 白刺灌丛植被区土壤调查

在不同演替阶段样地,调查沙堆结皮覆盖面积比例,挖取 3 个 0—100 cm 土壤剖面,每 20 cm 为一层测定土壤容重、水分与粒度组成。在沙堆迎风坡脚、迎风面中部、顶部、背风面中部、背风坡脚和堆间地,测定 0—5 cm 表层土壤的容重、水分与粒度特征。

白刺灌丛植被不同演替阶段 0—5 cm 土壤物理性状与沙堆结皮差异明显。其中,沙堆结皮经历形成、发展与破损的演变过程,结皮厚度、覆盖度和生物结皮比例呈现先增加后减少的趋势。表层土壤容重、沙粒成分随演替过程呈先减小后增大趋势;土壤水分、粘粒与粉粒成分呈先增大后减小趋势(表 2)。

表 1 不同演替阶段白刺灌丛植被与沙堆基本特征

Table 1 Main characteristics of *Nitraria* vegetation and nebkhas at the different succession stages

阶段 Stages	地点 Sites	长轴 Long axis/m	短轴 Short axis /m	高度 Height/m	覆盖度 Coverage/%	生物量 Biomass/ (kg/m ²)	群落盖度 Community coverage/%
初始阶段 Initial stage	红土井	2.27±0.27c	2.01±0.33b	0.49±0.07b	57.86±6.53a	0.71±0.12ab	37.6±14.8b
稳定阶段 Stable stage	青土湖	5.59±0.41bc	3.33±0.28b	0.85±0.08ab	65.80±5.89a	1.83±0.98a	64.7±3.7a
衰退阶段 Degraded stage	三角城	9.65±1.98a	6.18±1.37a	0.96±0.12ab	32.89±5.68b	0.62±0.11ab	32.4±3.5bc
严重衰退阶段 Severely degraded stage	沙井子	6.42±0.59b	4.50±0.45ab	1.25±0.28a	20.50±3.33b	0.20±0.03b	23.5±6.5c

不同字母间表示差异显著

表 2 白刺灌丛植被不同演替阶段沙堆表层土壤特征

Table 2 Topsoil characteristics of *Nitraria* nebkhas at the different succession stages

阶段 Stages	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	含水率 Soil water content /%	粘粒含量 Clay content /%	粉粒含量 Silt content/%	沙粒含量 Sand content/%	结皮状况 Crust status
初始阶段 Initial stage	1.47±0.06a	0.73±0.29a	0.79±0.10c	3.67±0.32c	95.54±0.41a	沙面流动,形成小面积 物理结皮
稳定阶段 Stable stage	1.42±0.05a	0.75±0.09a	2.91±0.67b	8.31±1.82b	88.78±2.49a	沙面固定,以生物结皮 为主
衰退阶段 Degraded stage	1.35±0.06a	0.62±0.09a	4.37±0.82a	17.81±4.45a	77.81±5.22b	以生物结皮为主,结皮 出现破损
严重衰退阶段 Severely degraded stage	1.41±0.07a	0.36±0.03a	2.84±0.13b	7.14±0.37b	90.02±0.48a	沙面流动,保留小面积 生物结皮

白刺灌丛沙堆不同部位 0—5 cm 土壤粒度组成均以沙粒成分为主,且各部位间沙粒含量差异不显著。土壤容重以堆顶部最大,除堆间地外,与其他沙堆部位无显著差异。土壤水分、粘粒含量和粉粒含量以堆间地最大,与沙堆各部位差异显著,但坡脚、迎风坡中部、堆顶部与背风坡间无显著差异(表 3)。

表 3 白刺灌丛沙堆不同部位表层土壤特征

Table 3 Topsoil characteristics at the different positions of *Nitraria* nebkhas

阶段 Stages	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	含水率 Soil water content /%	粘粒含量 Clay content/%	粉粒含量 Silt content/%	沙粒含量 Sand content/%
迎风坡脚 Foot of the windward slope	1.39±0.09ab	1.91±0.34b	3.95±0.66ab	14.56±2.68ab	81.49±3.16ab
迎风坡中部 Centre of the windward slope	1.40±0.08ab	0.66±0.08c	2.41±1.14b	6.84±3.16b	90.75±4.25a
堆顶部 Nebkhas crest	1.44±0.13a	0.82±0.19c	2.47±1.47b	7.03±4.08b	90.50±5.52a
背风坡中部 Centre of the leeward slope	1.37±0.07ab	0.50±0.10c	2.53±0.89b	6.96±1.82b	90.51±2.63a
背风坡脚 Foot of the leeward slope	1.35±0.08ab	1.63±0.33b	4.01±1.09ab	12.57±3.45ab	83.42±4.30ab
堆间地 Interspace between nebkhas	1.29±0.16b	3.56±0.65a	5.49±0.88a	22.19±5.05a	72.32±5.95b

2.5 数据分析

应用 Excel 和 SPSS16.0 软件完成数据处理和统计分析,采用 LSD 最小显著差数法对白刺灌丛植被、土壤

与沙堆特征及其土壤种子密度进行显著性分析(取显著度 0.05)。

根据土壤种子库萌发计数计算白刺灌丛植被土壤种子库密度、多样性指数以及相似性系数。土壤种子库密度用单位面积土壤内所含有的活力种子数量来表示(粒/m²)。土壤种子库物种多样性采用最常用的 Simpson 和 Shannon-Wiener 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数测度^[11]。不同演替阶段土壤种子库、土壤种子库与地上植被相似性采用 Jaccard 相似性系数测度,当 Jaccard 相似性系数达到 0.00—0.25 时为极不相似,0.25—0.50 时为中等不相似,0.50—0.75 时为中等相似,0.75—1.00 时为极相似^[12]。

3 结果分析

3.1 土壤种子库的物种组成变化

石羊河下游白刺灌丛植被土壤种子库共记录到 9 科 18 种植物,其中初始阶段、稳定阶段、衰退阶段与严重衰退阶段分别记录到 9 科 14 种、6 科 9 种、7 科 13 种和 8 科 10 种植物。种子库物种组成中,藜科 6 种,菊科 3 种,禾本科 2 种,蒺藜科 2 种,蓝雪科、豆科、百合科、柽柳科和蓼科各 1 种(表 4)。白刺种群种子库密度以稳定阶段最高,达到 9.33 粒/m²,且随白刺灌丛植被演替过程呈先增加后降低的趋势,这与地上白刺种群数量及其生长状况相一致(表 1,表 4)。草本植物画眉草、苦豆子和半灌木红砂种子在不同演替阶段均有分布,在维持白刺灌丛群落稳定性中具有重要作用。1 年生植物沙米是流动沙丘的指示植物,伴随白刺灌丛退化及裸沙斑块的出现,在衰退阶段开始出现。多年生草本植物沙葱仅在初始阶段出现,而盐爪爪仅在稳定阶段出现。显然,土壤种子库物种组成及其种子库密度大小反映了白刺灌丛地上植被物种组成及其种群数量。

表 4 白刺灌丛植被不同演替阶段土壤种子库的物种组成及其密度

Table 4 Species composition and seed density of soil seed bank at the different succession stages of *Nitraria* vegetation(粒/m², mean±SE)

植物 Species	科 Family	初始阶段 Initial stage	稳定阶段 Stable stage	衰退阶段 Degraded stage	严重衰退阶段 Severely degraded stage
物种数 Species number		14	9	13	10
1 年生草本 Annual herb					
五星蒿 <i>Bassia dasyphylla</i>	藜科 Chenopodiaceae	0.67±0.18	0	0.67±0.18	0.67±0.18
沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	藜科 Chenopodiaceae	0	0	0.67±0.18	1.33±0.18
虫实 <i>Corispermum patelliform</i>	藜科 Chenopodiaceae	32.00±6.33	0	0.67±0.18	0
盐生草 <i>Halogeton glomeratus</i>	藜科 Chenopodiaceae	7.33±1.58	3.33±0.84	0	72.63±14.25
刺蓬 <i>Salsola ruthenica</i>	藜科 Chenopodiaceae	2.00±0.44	0	0.67±0.18	0.67±0.18
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	禾本科 Gramineae	45.33±9.86	496.7±134.8	2.67±0.57	21.33±4.81
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>	菊科 Compositae	0.67±0.18	0	0	2.00±0.44
蒿 <i>Artemisia</i> spp.	菊科 Compositae	2.00±0.55	0	0.67±0.18	0
多年生草本 Perennial herb					
黄花补血草 <i>Limonium aureum</i>	蓝雪科 Plumbaginaceae	0	0	0.67±0.18	5.33±1.14
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	豆科 Leguminosae	6.67±1.53	0.67±0.18	17.33±3.64	1.33±0.33
隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科 Gramineae	8.00±2.12	143.33±54.22	0	0
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	4.67±0.96	0.67±0.18	0.67±0.18	0
沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	百合科 Liliaceae	0.67±0.18	0	0	0
半灌木 Semi-shrub					
沙蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	菊科 Compositae	2.00±0.44	4.67±1.11	12.33±3.97	0
红砂 <i>Reaumuria songarica</i>	柽柳科 Tamaricaceae	1.33±0.37	0.67±0.18	0.67±0.18	0.67±0.18
盐爪爪 <i>Kalidium foliatum</i>	藜科 Chenopodiaceae	0	1.33±0.37	0	0
灌木 Shrub					
白刺 <i>Nitraria Tangutorum</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	4.00±0.88	9.33±1.93	6.67±1.36	1.33±0.32
沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	蓼科 Polygonaceae	0	0	1.33±0.37	0

3.2 土壤种子库的生活型变化

石羊河下游白刺灌丛植被土壤种子库出现 1 年生草本、多年生草本、半灌木和灌木植物,未见乔木、藤本植物(表 4)。其中,草本植物是土壤种子库的主体,初始阶段、稳定阶段、衰退阶段和严重衰退阶段,所占物种总数比例分别达到 78.6%、55.6%、69.2% 和 80.0%。多年生草本植物所占物种总数比例仅稳定阶段达到 33.3%,其他阶段均未达到 1/3。而半灌木、灌木植物所占物种总数比例也以稳定阶段最高,达到 44.4%,其他阶段均未达到 1/3(图 1)。显然,伴随白刺灌丛植被的演替过程,土壤种子库中 1 年生草本植物占物种总数比例呈先减少后增加的趋势,而多年生草本、半灌木、灌木植物占物种总数比例呈先增加后减少的趋势。

3.3 土壤种子库的密度变化

白刺灌丛植被不同演替演替阶段的土壤种子库密度大小明显不同。其中,稳定阶段最大,达到 660.7 粒/ m^2 ,是初始阶段、衰退阶段和严重衰退阶段的 5.6、14.5 倍和 6.2 倍;衰退阶段最小,仅为 45.7 粒/ m^2 ,占到初始阶段、稳定阶段和严重衰退阶段土壤种子库密度的 38.9%、6.9% 和 42.5%(图 2)。

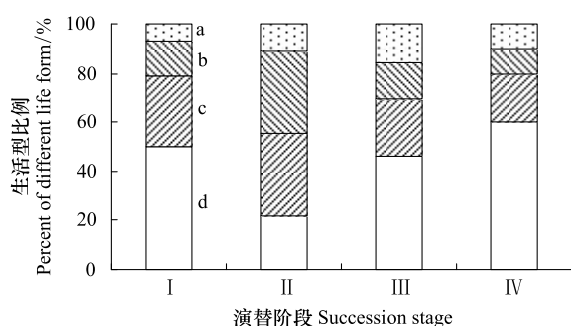


图 1 白刺灌丛植被不同演替阶段土壤种子库生活型谱

Fig.1 Life form spectrum of soil seed banks at the different succession stages of *Nitraria* vegetation

a: 灌木 Shrub; b: 半灌木 Semi-shrub; c: 多年生草本 Perennial herb; d: 1 年生草本 Annual herb; I: 初始阶段 Initial stage; II: 稳定阶段 Stable stage; III: 衰败阶段 Degraded stage; IV: 严重衰败阶段 Severely degraded stage

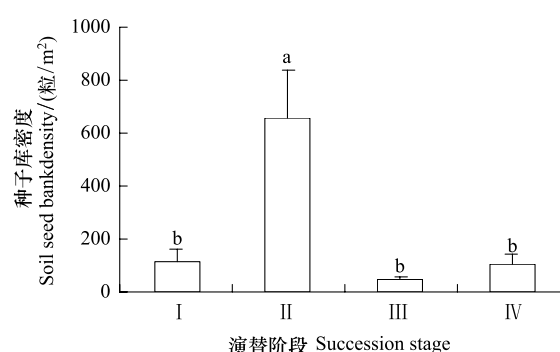


图 2 白刺灌丛植被不同演替阶段土壤种子库密度

Fig.2 Seed bank density at the different succession stages of *Nitraria* vegetation

I: 初始阶段 Initial stage; II: 稳定阶段 Stable stage; III: 衰败阶段 Degraded stage; IV: 严重衰败阶段 Severely degraded stage

白刺灌丛沙堆不同部位的土壤种子库密度大小也明显不同。其中,迎风坡中部与背风坡中部最大,分别达到 329 粒/ m^2 、309 粒/ m^2 ,与迎风坡脚、背风坡脚和堆间地差异显著,但与沙堆顶部差异不显著;迎风坡脚与背风坡脚土壤种子库密度分别达到 106 粒/ m^2 和 100 粒/ m^2 ,与沙堆顶部和堆间地无显著差异(图 3)。显然,白刺灌丛植被土壤种子库主要分布在灌丛沙堆上,沙堆平均土壤种子库密度达到 211 粒/ m^2 ,是堆间地的 1.9 倍。

3.4 土壤种子库的物种多样性变化

白刺灌丛植被演替过程中,土壤种子库的物种多样性呈先降低后增加再降低的趋势。其中,初始阶段土壤种子库的 Simpson、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数最高,具有较高的物种多样性;衰退阶段土壤种子库种子数量少,但是物种组成多,也具有较高的物种多样性;而稳定阶段与严重衰退阶段土壤种子库物种多样性指数相近,土壤种子库物种多样性较低

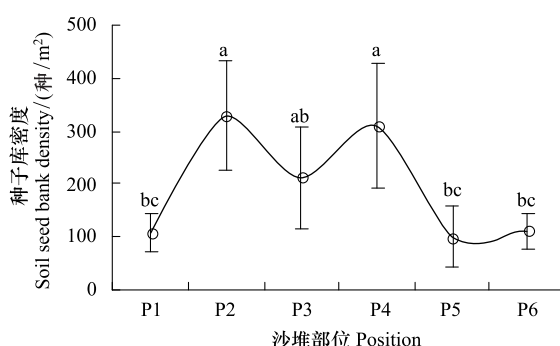


图 3 白刺灌丛沙堆不同部位的土壤种子库密度

Fig.3 Seed bank density at the different positions of *Nitraria* nebkhas

P1: 迎风坡脚 foot of the windward slope; P2: 迎风坡中部 centre of the windward slope; P3: 堆顶部 nebkhas crest; P4: 背风坡中部 centre of the leeward slope; P5: 背风坡脚 foot of the leeward slope; P6: 堆间地 interspace between nebkhas

(表 5)。

表 5 白刺灌丛植被不同演替阶段土壤种子库的物种多样性

Table 5 Species diversity of soil seed bank at the different succession stages of *Nitraria* vegetation

阶段 Stages	种子数 Seed number/ (粒/m ²)	Simpson 多样性指数 Simpson diversity index	Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index	Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index
初始阶段 Initial stage	117.3	0.77	2.64	0.69
稳定阶段 Stable stage	660.7	0.52	1.30	0.41
衰退阶段 Degraded stage	45.7	0.75	2.43	0.66
严重衰退阶段 Severely degraded stage	107.3	0.50	1.47	0.46

3.5 土壤种子库的相似性

白刺灌丛植被演替过程中,初始阶段与其他阶段的土壤种子库相似性系数均超过 0.5,处于中等相似水平。稳定阶段土壤种子数量大,但物种组成数少,与衰退阶段、严重衰退阶段土壤种子库的相似性属于中等不相似水平。而衰退阶段与严重衰退阶段白刺灌丛退化,相似性系数达到 0.53,也处于中等相似水平(表 6)。

表 6 白刺灌丛植被不同演替阶段土壤种子库的相似性系数

Table 6 Similarity coefficients of soil seed banks between the different succession stages of *Nitraria* vegetation

阶段 Stages	初始阶段 Initial stage	稳定阶段 Stable stage	衰退阶段 Degraded stage	严重衰退阶段 Severely degraded stage
初始阶段 Initial stage	1			
稳定阶段 Stable stage	0.53	1		
衰退阶段 Degraded stage	0.59	0.38	1	
严重衰退阶段 Severely degraded stage	0.50	0.36	0.53	1

3.6 土壤种子库与地上植被的关系

白刺灌丛植被土壤种子库与地上植被的共有物种数多,所占地上植被、种子库物种的比例均超过 65%。其中,初始阶段共有物种数达到 12 种,占土壤种子库物种数的 80.0%,占地上植被物种数的 66.7%;稳定阶段达到 8 种,占种子库物种数的 88.9%,占地上植被物种数的 88.9%;衰退阶段达到 12 种,占种子库物种数的 92.3%,占地上植被物种数的 75.0%;严重衰退阶段达到 7 种,占种子库物种数的 77.8%,占地上植被物种数的 77.8%。

白刺灌丛植被演替过程中,土壤种子库与地上植被的相似性系数呈先增大后减小的趋势,其中稳定阶段的相似性系数最高,达到 0.80,属于极相似水平;初始阶段、衰退阶段与严重衰退阶段也分别达到 0.57、0.71 和 0.64,属于中等相似水平(图 4)。显然,石羊河下游白刺灌丛植被土壤种子库与地上植被的相似性高,土壤种子库较好地反映了地上植被。

4 讨论

土壤种子库是指一定面积土壤中有生活力或发芽力种子的集合,包括短暂土壤种子库和持久土壤种子库^[13,14]。在我国干旱荒漠区,7 月进入雨季,荒漠植物已处于旺盛生长期,此时测得的土壤种子库可认为持久土壤种子库,可以反映群落的演替趋势。不同的植被生态系统,种子在土壤中分布层次不同,土壤种子库的取样层次与深度不同^[8,15]。对于干旱荒漠生态系统土壤种子库,表层 5 cm 之下已经很少有种子,因此本研究仅采集表层 0—5 cm 土壤样品研究白刺灌丛植被的土壤种子库^[8,15-17]。

土壤种子库是植被更新与恢复的基础,只有具有丰富种子库的退化生态系统,在较短的时间内能够实现

恢复^[8]。不同生态系统土壤种子库的种类组成与数量差异显著,森林、草地的种子库组成偏复杂,种类较多,而荒漠区的土壤种子库组成比较简单^[8,14-22]。地处干旱荒漠区的石羊河下游白刺灌丛植被土壤种子库物种组成数共计 18 种,种子库密度介于 45.7—660.7 粒/m²,总体高于干旱、极端干旱地区沙漠^[19-20],低于半干旱、半湿润地区沙漠^[21-22]。与腾格里沙漠南缘和科尔沁沙漠地区相比^[21,23],干旱荒漠区白刺灌丛植被土壤种子库组成相对简单,种子库密度与多样性指数较低,与典型干旱、极端干旱区的研究结论相似^[9,24-25],这与白刺灌丛植被群落组成相对单一和种子植物相对较少密切相关,但根本上还是恶劣干旱、风蚀沙埋生境影响的结果。

土壤种子库与地上植被的关系研究是土壤种子库

研究的热点内容之一,可认识控制植被物种组成的机理,掌握群落的恢复力,控制外来物种,恢复群落多样性,评价干预效果等,已在不同生态系统开展了大量研究^[26-29]。前期研究发现森林生态系统土壤种子库与地上植被具有较低相似性,均值达到 31%;草地生态系统具有较高相似性,均值达到 54%;湿地生态系统具有中等相似性,均值达到 47%;一年生植物为主导的群落土壤种子库与地上植被的相似性高^[30-32]。本研究发现石羊河流域白刺荒漠灌丛土壤种子库与地上植被的相似性高,其中稳定阶段相似性系数达到 0.80,属于极相似水平;初始阶段、衰退阶段与严重衰退阶段也分别达到 0.57、0.71 和 0.64,属于中等相似水平,与前期同类研究结果一致。同时,土壤种子库与地上植被的相似性受演替阶段、干扰和环境条件等的影响。Kalamees、Leck 等研究发现草地系统土壤种子库与地上植被的相似性随演替时间降低,在演替后期阶段地上植被物种组成以长命植物为主,但是种子库由短命植物占主导,相似性降低^[33-35]。放牧等干扰活动驱动所有生态系统物种组成变化,其中森林与湿地生态系统土壤种子库与地上植被相似性随干扰时间降低,草地生态系统随干扰时间增加^[31-32,36-37]。本研究区地处石羊河下游,白刺灌丛荒漠植被没有受到放牧等直接干扰,但是受到水资源过度开发利用的间接干扰,地表水大幅度减少和地下水位下降加速了白刺灌丛沙堆的衰退,降低了土壤种子库与地上植被的相似性,使得石羊河流域白刺灌丛植被土壤种子库与地上植被相似性随演替过程呈现先增大后减小趋势,这与前期研究有所不同。

灌丛沙堆是灌丛植被阻挡风沙流的产物,常作为干旱区土壤风蚀和土地退化的标志,间接反映了沙漠化的进程^[38-39];同时灌丛沙堆具有明显的“肥岛”效应,是水分、养分的汇集区^[39-40],具有重要的研究价值。李秋艳和方海燕研究发现泡泡刺灌丛沙堆土壤种子密度从灌丛下到灌丛间地逐渐减少,而且大部分种子分布在灌丛沙堆,几乎没有种子分布在灌丛间地^[41];Fuentes 等发现智利常绿有刺灌木丛下的土壤种子数量是灌丛间地的 10 倍^[42];Russell 和 Schupp 发现桃花心木灌丛下的土壤种子数量是灌丛间地的 4 倍^[43]。本研究发现白刺灌丛植被土壤种子也主要分布于灌丛沙堆上,灌丛沙堆土壤种子数量是灌丛间地的 1.9 倍,从而说明灌丛沙堆也是种子的汇集区,其对种子的保存与扩散具有重要的作用。灌丛及其生长状况、沙源和风力强度是控制沙堆形成与发育的主要因素。其中,沙堆迎风坡植被盖度高,为气流减速区,表现为风蚀;顶部为气流加速区,表现为强烈侵蚀;背风坡为气流减速区,表现为堆积^[44-45]。从而在沙堆不同部位形成了微环境,迎风坡沙堆表层沉积物粒径相对较粗,而背风坡相对较细^[46]。本研究发现白刺灌丛沙堆迎风坡与背风坡土壤种子数量大,与迎风坡和背风坡底差异显著,但是迎风坡、背风坡和顶部差异不显著,这与李秋艳和方海燕对泡泡刺灌丛沙堆种子库的研究结论一致,说明迎风坡与背风坡环境差异并未影响种子库数量^[41]。显然,灌丛沙堆不同部位种子库可能受植被、风力、风蚀沙埋以及采样时间和深度等多种因素的影响,目前对这方面的研究较为

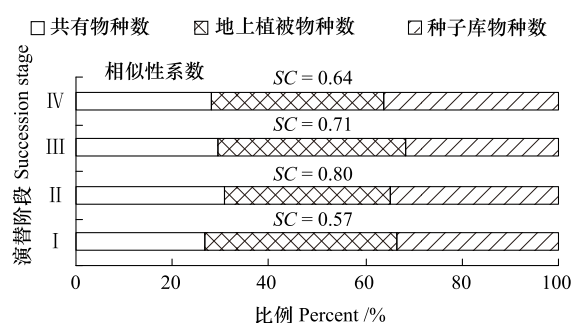


图4 白刺灌丛植被不同演替阶段土壤种子库与现有地上植被的关系

Fig.4 Relationship between the standing vegetation and soil seed bank at the different succession stages of *Nitraria* vegetation

I: 初始阶段 Initial stage; II: 稳定阶段 Stable stage; III: 衰退阶段 Degraded stage; IV: 严重衰退阶段 Severely degraded stage

薄弱。

土壤种子库组成、大小及其分布受植被、种子大小、繁殖方式和外部因素水分、地形、风速、动物与昆虫采食等的综合影响^[8,47-48]。在白刺灌丛植被演替的初始阶段,灌丛沙堆最小,沙漠化程度最轻,地表沙物质组成粒度粗,适宜隐子草、沙葱等多年生植物生长,但随细沙物质堆积增多,就会逐渐退出白刺灌丛。在白刺灌丛植被演替的衰败阶段,随裸沙斑块形成,沙米种子出现,标志沙漠化程度加重。生物土壤结皮是判断风蚀程度的重要指标,其通过阻止种子进入土壤和改变降水入渗及其再分配,影响土壤种子库组成与结构^[47,49]。在石羊河下游白刺灌丛演替过程中,灌丛沙堆的稳定主要表现为结皮的形成与逐渐加厚,限制了以分蘖扩张为生存对策的白刺灌丛的发展;灌丛沙堆的衰败表现为结皮破损与瓦解,促进沙米、黄花补血草等草本植物的发展。

干旱荒漠白刺灌丛植被演替受到自然与人为等多种因素的影响,其中干旱区地下水位变化直接影响天然植被的生长发育,当潜水位下降到一定深度,灌丛难以从土壤中吸收到足够的水分,植被就会衰退死亡,从而加速灌丛沙堆的衰亡^[50]。本研究区域白刺灌丛植被的衰退过程主要受农业生产活动的严重干扰引起,沙漠边缘大面积农田的开垦和地下水的过度开采导致地下水位快速下降,绿洲边缘地下水位达到 20 m 以下,从而破坏了适宜白刺灌丛生长的生态水文条件,这是引起白刺灌丛衰退的主要原因^[4-6,10]。因此,本研究区白刺灌丛植被演替过程,特别是后期阶段是一种人为干扰下的退化演变过程,土壤种子库物种组成简单,种子库密度较低,退化白刺灌丛植被的自我恢复能力不足。为控制沙堆活化需要开展人工种子库或人工植被建设,以促进耐旱植物种群的发展,是该区域白刺灌丛植被恢复和沙漠化治理的有效途径。

5 结论

石羊河下游白刺灌丛植被演替过程中,土壤种子库共出现 9 科 18 种植物,包括一年生草本、多年生草本、半灌木和灌木植物,其中草本植物比例达到 55%—80%,是白刺灌丛植被土壤种子库的主体。不同演替阶段,土壤种子库密度以稳定阶段最高,达到 660.7 粒/m²,是初始阶段、衰退阶段和严重衰退阶段的 5.6、14.5 倍和 6.2 倍,初始阶段、衰退阶段和严重衰退阶段间差异不显著。白刺灌丛植被土壤种子库主要分布于灌丛沙堆,沙堆土壤种子库密度是堆间地的 1.9 倍,其中沙堆迎风坡中部与背风坡中部土壤种子库密度最高,分别达到 329 粒/m²和 309 粒/m²。不同演替阶段土壤种子库间的相似性系数均在 0.6 以下,除稳定阶段外,其他阶段间均处于中等相似水平;土壤种子库与地上植被的相似性系数均在 0.5 以上,达到中等相似或极相似水平。该研究结果进一步证明了灌丛沙堆在白刺灌丛植被中的重要性,也说明人为干扰损害了白刺灌丛地下潜在植被及其恢复潜力。

参考文献 (References):

- [1] Milberg P, Hansson M L. Soil seed bank and species turnover in a limestone grassland. *Journal of Vegetation Sciences*, 1993, 5(1): 35-42.
- [2] 李秋艳, 赵文智. 干旱区土壤种子库的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 350-358.
- [3] 李双福, 张启昌, 张启超, 宗成武, 田宪锋. 白刺属植物研究进展. *北华大学学报: 自然科学版*, 2005, 6(1): 78-81.
- [4] 孙祥, 于卓. 白刺根系的研究. *中国沙漠*, 1992, 12(4): 50-54.
- [5] 贾宝全, 蔡体久, 高志海, 丁峰, 张国忠. 白刺灌丛沙包生物量的预测模型. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 96-99.
- [6] 彭飞, 王涛, 刘立超, 黄翠华. 民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 593-599.
- [7] 刘建泉. 甘肃民勤西沙窝唐古特白刺群落的生态特性. *植物资源与环境学报*, 2002, 11(3): 36-40.
- [8] 杨自辉, 高志海. 荒漠绿洲边缘降水和地下水对白刺群落消长的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(6): 927-930.
- [9] 杜建会, 严平, 展秀丽, 俄有浩. 民勤绿洲白刺灌丛沙堆不同演化阶段表面抗蚀性及其影响因素. *应用生态学报*, 2008, 19(4): 763-768.
- [10] 靳虎甲, 马全林, 张有佳, 曾新德. 石羊河下游白刺灌丛演替发育过程的土壤呼吸及其影响因素分析. *中国沙漠*, 2012, 32(1): 140-147.
- [11] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I a 多样性的测度方法 (下). *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- [12] 沈蕊, 张建利, 何彪, 李峰, 张志明, 周睿, 欧晓昆. 元江流域干热河谷草地植物群落结构特征与相似性分析. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2821-2825.
- [13] 于顺利, 陈宏伟, 郎南军. 土壤种子库的分类系统和种子在土壤中的持久性. *生态学报*, 2007, 27(5): 2099-2108.
- [14] Coffin D P, Lauenroth W K. Spatial and temporal variation in the seed bank of a semiarid grassland. *American Journal of Botany*, 1989, 76(1): 53-58.

- [15] Marone L, Cueto V R, Milesi F A, de Casenave J L. Soil seed bank composition over desert microhabitats: patterns and plausible mechanisms. *Canadian Journal of Botany*, 2004, 82(12): 1809-1816.
- [16] Wang S M, Zhang X, Li Y, Zhang L, Xiong Y C, Wang G. Spatial distribution patterns of the soil seed bank of *Stipagrostis pennata* (Trin.) de Winter in the Gurbantonggut desert of north-west China. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(1): 203-222.
- [17] 马全林, 张德魁, 刘有军, 靳虎甲, 陈芳. 石羊河中游沙漠化逆转过程土壤种子库的动态变化. *生态学报*, 2011, 31(4): 989-997.
- [18] 张志权. 土壤种子库. *生态学杂志*, 1996, 15(6): 36-42.
- [19] Li N, Feng G, Tian C Y. Characteristics and dynamics of the soil seed bank at the north edge of Taklimakan desert. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(S1): 122-127.
- [20] 王增如, 徐海量, 尹林克, 李吉玫, 张占江, 李媛. 塔里木河下游荒漠化过程土壤种子库特征. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 885-889.
- [21] 赵丽娅, 李锋瑞, 张华, 王先之. 科尔沁沙地围封沙质草甸土壤种子库特征的研究. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 45-49.
- [22] 沈有信, 赵春燕. 中国土壤种子库研究进展与挑战. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 467-473.
- [23] 王刚, 梁学功. 沙坡头人工固沙区的种子库动态. *植物学报*, 1995, 37(3): 231-237.
- [24] 曾彦军, 王彦荣, 南志标, 卫东, 陈善科, 李保尔. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1457-1463.
- [25] 李吉玫, 徐海量, 张占江, 叶茂, 王增如, 李媛. 塔里木河下游不同退化区地表植被和土壤种子库特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3626-3636.
- [26] Carter C T, Ungar I A. Aboveground vegetation, seed bank and soil analysis of a 31-year-old forest restoration on coal mine spoil in southeastern Ohio. *American Midland Naturalist*, 2002, 147(1): 44-59.
- [27] Amiaud B, Touzard B. The relationships between soil seed bank, aboveground vegetation and disturbances in old embanked marshlands of western France. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2004, 199(1): 25-35.
- [28] Bossuyt B, Hermy M. Seed bank assembly follows vegetation succession in dune slacks. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(4): 449-456.
- [29] Kirkham F W, Kent M. Soil seed bank composition in relation to the above-ground vegetation in fertilized and unfertilized hay meadows on a Somerset peat moor. *Journal of Applied Ecology*, 1997, 34(4): 889-902.
- [30] Osem Y, Perevolotsky A, Kigel J. Similarity between seed bank and vegetation in a semi-arid annual plant community: the role of productivity and grazing. *Journal of Vegetation Science*, 2006, 17(1): 29-36.
- [31] Hopfensperger K N. A review of similarity between seed bank and standing vegetation across ecosystems. *Oikos*, 2007, 116(9): 1438-1448.
- [32] 李锋瑞, 赵丽娅, 王树芳, 王先之. 封育对退化沙质草地土壤种子库与地上群落结构的影响. *草业学报*, 2003, 12(4): 90-99.
- [33] Kalamees R, Zobel M. Soil seed bank composition in different successional stages of a species rich wooded meadow in Laelatu, western Estonia. *Acta Oecologica*, 1998, 19(2): 175-180.
- [34] Chambers J C. Seed and vegetation dynamics in an alpine herb field: effects of disturbance type. *Canadian Journal of Botany*, 1993, 71(3): 471-485.
- [35] Leck M A, Leck C F. A ten-year seed bank study of old field succession in central New Jersey. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 1998, 125(1): 11-32.
- [36] Chaideftou E, Thanos C A, Bergmeier E, Kallimanis A, Dimopoulos P. Seed bank composition and above-ground vegetation in response to grazing in sub-Mediterranean oak forests (NW Greece). *Plant Ecology*, 2009, 201(1): 255-265.
- [37] Chang E R, Jefferies R L, Carleton T J. Relationship between vegetation and soil seed banks in an arctic coastal marsh. *Journal of Ecology*, 2001, 89(3): 367-384.
- [38] Tengberg A. Nebkhas dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso. *Journal of Arid Environments*, 1995, 30(3): 265-282.
- [39] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望. *地理学报*, 2010, 65(3): 339-350.
- [40] Seifert C L, Cox R T, Forman S L, Foti T L, Wasklewicz T A, McColgan A T. Relict nebkhas (pimple mounds) record prolonged late Holocene drought in the forested region of south-central United States. *Quaternary Research*, 2009, 71(3): 329-339.
- [41] 李秋艳, 方海燕. 荒漠绿洲边缘区泡泡刺灌丛土壤种子库研究. *干旱区研究*, 2008, 25(4): 502-506.
- [42] Fuentes E R, Otaiza R D, Alliende M C, Hoffmann A, Poiani A. Shrub clumps of the Chilean matorral vegetation: structure and possible maintenance mechanisms. *Oecologia*, 1984, 62(3): 405-411.
- [43] Russell S K, Schupp E W. Effects of microhabitat patchiness on patterns of seed dispersal and seed predation of *Cercocarpus ledifolius* (Rosaceae). *Oikos*, 1998, 81(3): 434-443.
- [44] Brown G, Porembski S. The maintenance of species diversity by miniature dunes in a sand-depleted *Haloxylon salicornicum* community in Kuwait. *Journal of Arid Environments*, 1997, 37(3): 461-473.
- [45] 武胜利, 李志忠, 惠军, 肖晨曦, 孙秋梅. 灌丛沙堆表面压力分布特征的实验研究. *干旱区地理*, 2006, 29(6): 790-796.
- [46] 张萍, 哈斯, 岳兴玲, 庄燕美. 白刺灌丛沙堆形态与沉积特征. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 926-932.
- [47] Guo Q F, Rundel P W, Goodall D W. Horizontal and vertical distribution of desert seed banks: Patterns, causes, and implications. *Journal of Arid Environments*, 1998, 38(3): 465-478.
- [48] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, Wang X P, Kim K C. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(1): 1-16.
- [49] 苏延桂, 李新荣, 张景光, 杨丽雯. 生物土壤结皮对土壤种子库的影响. *中国沙漠*, 2006, 26(6): 997-1001.
- [50] 郑丹, 李卫红, 陈亚鹏, 刘加珍. 干旱区地下水与天然植被关系研究综述. *资源科学*, 2005, 27(4): 160-167.