

DOI: 10.5846/stxb201712112227

李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 靳长青, 陈彦云. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征与其土壤理化性质分析. 生态学报, 2019, 39(17): - .

Li G Q, Shao W S, Zhao P P, Jing C Q, Chen Y Y. Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in a desert steppe region. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): - .

## 荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征与其土壤理化性质分析

李国旗<sup>1,2,\*</sup>, 邵文山<sup>1,2,3</sup>, 赵盼盼<sup>1,2</sup>, 靳长青<sup>1,2</sup>, 陈彦云<sup>4</sup>

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 甘肃省武威市凉州区林业技术推广中心, 武威 733000

4 宁夏大学生命科学学院, 银川 750021

**摘要:** 土壤种子库作为地上植被更新的潜在种源, 在植被自然恢复和演替过程以及生态系统建设中起着重要作用。本文以宁夏盐池县荒漠草原区 4 种植物群落为研究对象, 通过对封育 16 年后植物群落土壤理化性质的变化与其土壤种子库的特征之间的关系探讨, 揭示荒漠草原植物群落的土壤种子库分布特征和演替趋势, 以及土壤质量的改变如何影响土壤种子库特征。研究结果表明: (1) 不同植物群落土壤种子库物种组成及种子密度不同, 同一物种在不同植物群落土壤种子库中出现时种子密度也存在差异; 禾本科、菊科、藜科植物种在 4 种植物群落土壤种子库中出现比例均较高, 分别占到 26.19%、21.43% 和 19.05%, 占总物种数的 66.7%; 灰绿藜、冰草、碱蓬在 4 种植物群落土壤种子库中均有出现。(2) 4 种植物群落土壤种子库中多年生植物和一年生植物种子居多, 灌木、半灌木植物种较少。(3) 4 种植物群落土壤种子库中物种数和种子密度均表现为: 芨芨草群落 > 苦豆子群落 > 油蒿群落 > 盐爪爪群落; 且随着土层的加深, 4 种植物群落土壤种子库中物种数和种子密度均呈递减趋势。(4) 4 种植物群落土壤种子库中 Shannon-Wiener 指数、Simpsin 指数、Pielou 指数和 Patrick 指数均表现为芨芨草群落 > 苦豆子群落 > 油蒿群落 > 盐爪爪群落。此外, 芨芨草群落土壤种子库与油蒿群落土壤种子库相似性最高, 油蒿群落与盐爪爪群落的最低。(5) 土壤种子库物种多样性特征指数与土壤 pH、含水量、碱解氮呈正相关, 与土壤电导率呈负相关, 其中土壤 pH 和电导率对种子库物种多样性的影响较大。荒漠草原封育以后, 土壤种子库中植物种数、种子密度和物种多样性均呈增加趋势, 且以多年生植物和一年生植物种子居多; 禾本科和豆科植物的物种数和种子密度大于菊科和藜科, 这表明围封后牧草品质改善, 植物群落正向演替。  
**关键词:** 土壤种子库; 土壤理化性质; 植物群落; 种子密度; 荒漠草原

## Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in a desert steppe region

LI Guoqi<sup>1,2,\*</sup>, SHAO Wenshan<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Panpan<sup>1,2</sup>, JIN Changqing<sup>1,2</sup>, CHEN Yanyun<sup>4</sup>

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 Forestry Technology Extension Center of Liangzhou district of Wuwei City in Gansu Province, Wuwei 733000, China

4 Life school of Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** The soil seed bank (SSB), as a potential provenance, plays an important role in the natural recovery and

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0504406); 国家自然科学基金项目(31540007); 宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXY-LXK2017B06)

**收稿日期:** 2017-12-11; **网络出版日期:** 2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoqilee@163.com

succession of vegetation and ecological restoration. In this study, four plant communities were evaluated in a desert steppe area in Yanchi County, Ningxia. We investigated the relationship between soil physical and chemical properties of plant communities fenced for 16 years to reveal the SSB distribution characteristics of the desert grassland community and succession trend and how changes in soil quality affect SSB characteristics. The results showed that (1) the species composition and seed density of SSBs in various plant communities were different, and the seed density of the same species was different in various plant communities. Moreover, the species proportion of four types of plant communities in SSB included Gramineae, Compositae, and Chenopodiaceae (26.19%, 21.43%, and 19.05%, respectively), accounting for 66.7% of the total species. (2) Many perennial and annual plant seeds, and few shrub and semi-shrub seeds were found in the SSBs of the four communities. (3) The species number and seed density in the SSBs of the four plant communities were as follows: *Achnatherum splendens* community > *Sophora alopecuroides* community > *Artemisia ordosica* community > *Kalidium foliatum* community; the species number and seed density showed a decreasing trend with soil depth. (4) Four indexes (ShannonWiener, Simpson, Pielou, and Patrick) indicated the same tendency, that is, *A. splendens* community > *S. alopecuroides* community > *A. ordosica* community > *K. foliatum* community. In addition, the SSB of *A. splendens* community had the highest similarity to that of *A. ordosica* community, but the SSB of *A. ordosica* community had the lowest similarity to that of *K. foliatum* community. (5) The soil species diversity index of SSB was positively correlated with soil pH, water content, and available nitrogen and negatively correlated with soil electrical conductivity. Soil pH and electrical conductivity had a significant effect on species diversity in the SSBs. After enclosure, the species number, seed density, and biodiversity of SSB increased, especially, those of the perennials and annuals; the species number and seed density of Gramineae and Leguminosae were both greater than those of Compositae and Chenopodiaceae. All the results indicated that fencing improved not only the grasses but also positive succession.

**Key Words:** soil seed bank; soil physical and chemical properties; plant community; seed density; desert steppe

土壤种子库 (Soil Seed Bank, SSB) 是指存在于土壤表面和土壤中的全部存活种子的总和<sup>[1]</sup>。土壤种子库是土壤中种子聚集和持续的结果<sup>[2]</sup>。土壤种子库也被称为潜种群阶段<sup>[3]</sup>, 是植被种群生活史的一个重要阶段, 也是植被种群定居、生存、繁衍和扩散的基础, 而且它的时空格局对植被的更新与恢复、生物多样性的维护、植被演替及扩散过程均有着举足轻重的作用<sup>[4-8]</sup>。土壤种子库是植被经历干扰后恢复的主要种质资源, 同时也在退化草地恢复与重建中扮演着重要角色, 而且能够反映种群对环境变化的响应<sup>[9]</sup>。植被演替的过程不仅包括地上植被组成及结构的变化, 也包括土壤种子库的数量和格局变化<sup>[10]</sup>。不同植物群落中土壤种子库的物种组成不同, 掌握这些土壤种子库中物种的动态, 不仅有助于了解在植物群落内部有重要限制作用的因子或过程<sup>[11-12]</sup>, 而且有利于对地上植被的演替及变化做出科学地预测, 从而为植被的恢复与治理提供参考。目前对土壤种子库特征与其土壤理化性质之间的关系的研究文献还相对比较少, 已有的研究结果认为土壤微环境能够显著影响土壤种子库的种子密度的分布格局<sup>[13-14]</sup>和物种的生活型特征<sup>[15]</sup>。自 2000 年以来, 宁夏在全区范围内实施了退耕还林还草工程、封山禁牧和全国唯一的省级防沙治沙综合示范区建设等林业生态工程, 取得了很好的效果。由于荒漠草原是宁夏草原的主体类型, 因此宁夏退牧还草的效果也主要取决于荒漠草原的恢复程度<sup>[13]</sup>。不同于典型草原的相对均质性, 荒漠草原的景观异质性非常明显。本文选取了荒漠草原区分属豆科、禾本科、菊科和藜科的苦豆子 (*Sophora alopecuroides*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 和盐爪爪 (*Kalidium foliatum*) 4 种具有代表性的植物群落进行了研究。本研究在盐池县沙边子方圆 5 km 范围内, 选取了 4 种土壤类型的封育草地, 旨在研究封育后土壤理化性质的改变是否会影响到土壤种子库的特征, 或者说土壤种子库的特征是否与土壤理化性质有关系? 通过分析 4 种植物群落土壤种子库特征及种子库物种多样性与土壤理化性质关系, 对调控改善土壤环境, 增强土壤种子库多样性等提供了理论依据, 也为草地经营管理提供了适当的管理措施参考。本研究也从不同角度反映了荒漠草原区植物群落的

分布特征,有助于揭示荒漠草原区植物群落演替及退化的机理,为荒漠草原区植被的恢复与治理提供了一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究试验区位于宁夏回族自治区东部盐池县(106°30′—107°47′E,37°04′—38°10′N)沙边子地区,该区域位于毛乌素沙地西南边缘,是典型的荒漠草原区,自然环境条件较为严酷。研究区的土壤类型主要为灰钙土(苦豆子和芨芨草群落)、风沙土(油蒿群落)和盐碱土(盐爪爪群落)。4种植物群落样地均为2001年封育的草场,围封前长期的过度放牧及其他人类活动干扰使草场发生了严重地退化,封育后植被有所恢复。苦豆子群落的围封面积较小有2 hm<sup>2</sup>,芨芨草群落、油蒿群落和盐爪爪的面积均在10 hm<sup>2</sup>以上。表1为研究区4种植物群落地上植被物种组成<sup>[16]</sup>。

表1 不同植物群落地上植被种类组成

Table 1 Species composition of aboveground vegetation in different plant communities

群落类型 Community type	物种组成 Species composition
苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	苦豆子( <i>S. alopecuroides</i> )、苦苦菜( <i>Herba Taraxaci</i> )、冰草( <i>Agropyron cristatum</i> )、碱蓬( <i>Suaeda glauca</i> )、灰灰菜( <i>Chenopodium album</i> )、百草( <i>Pennisetum flaccidum</i> )、西伯利亚滨藜( <i>Atriplex sibirica</i> )、芨芨草( <i>A. splendens</i> )、白刺( <i>N. tangutorum</i> )、西伯利亚廖( <i>Polygonum sibiricum</i> )、猪毛蒿( <i>Artemisia scoparia</i> )、针茅( <i>Stipa capillata</i> )、芦苇( <i>Phragmites australis</i> )、披针叶野决明( <i>Thermopsis lanceolata</i> )、鹅绒藤( <i>Cynanchum chinense</i> )
芨芨草 Community of <i>A. splendens</i>	芨芨草( <i>A. splendens</i> )、白刺( <i>N. tangutorum</i> )、百草( <i>P. flaccidum</i> )、冰草( <i>A. cristatum</i> )、猪毛蒿( <i>A. scoparia</i> )、野艾蒿( <i>Artemisa lavandulaefolia</i> )、黄蒿( <i>Artemisia annua</i> )、西伯利亚滨藜( <i>A. sibirica</i> )、灰灰菜( <i>C. album</i> )、阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )、西伯利亚廖( <i>P. sibiricum</i> )、苦马豆( <i>Sphaerophysa salsula</i> )、囊果碱蓬( <i>Suaeda physophora</i> )、碱蓬( <i>S. glauca</i> )
油蒿 Community of <i>A. ordosica</i>	油蒿( <i>A. ordosica</i> )、苦豆子( <i>S. alopecuroides</i> )、灰灰菜( <i>C. album</i> )、牛心朴子( <i>C. komarovii</i> )、西山委陵菜( <i>Potentilla sischanensis</i> )、百草( <i>P. flaccidum</i> )、丝叶山苦麦( <i>Ixeris chinensis</i> )、鳍蓟( <i>Olgaea leucophylla</i> )、冰草( <i>A. cristatum</i> )、碱蓬( <i>S. glauca</i> )
盐爪爪 Community of <i>K. foliatum</i>	盐爪爪( <i>K. foliatum</i> )、白刺( <i>N. tangutorum</i> )、碱蓬( <i>S. glauca</i> )

### 1.2 试验设计

于2015年7月下旬植物生长最旺盛的时期,选取围栏封育内以苦豆子、芨芨草、油蒿、盐爪爪为优势种的4种植物群落类型草地,在每种群落草地中布设5条“之”字型样线,每条样线上取6个1 m × 1 m的小样方,共计120个小样方进行植被调查,对植物群落物种数、物种组成、优势种盖度及总盖度等进行统计。植被调查结束后,在每个植物群落草地类型5条样线上的小样方内分别按0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm取土,将土样带回实验室,风干后过筛,进行土壤理化性质的测定。于2016年3月在每个植物群落中植被调查的小样方内,各随机选择10个小样方,用20 cm × 20 cm × 10 cm的自制取土器,分别取0—2 cm、2—5 cm、5—10 cm土层的土,将土样带回实验室,自然风干过筛处理,进行种子萌发试验<sup>[5,17]</sup>。

### 1.3 试验方法

本试验中种子库的鉴定采取种子过筛辨认和种子萌发试验鉴定相结合的方式。其中种子过筛辨认主要是肉眼可见部分种子,即通过与已知种子对比进行辨认;种子萌发鉴定是本试验种子鉴定主要的方法,即先用无种子的毛细沙做基质(120℃高温处理),将其置于花盆(40 cm × 30 cm × 15 cm)底部,约10 cm,再将土样过筛去除杂物后,均匀平铺在萌发用的花盆底部基质上(土层1—2 cm)。萌发时间为2016年5月到9月,开始萌发后可辨认的幼苗鉴定后去除;无法辨认的幼苗,保留生长直至鉴定出以后拔除。萌发2个月翻动土样,至9月连续4周没有幼苗萌发时结束试验,试验中为保持种子的萌发率,试验在温室大棚进行且每天依据土壤湿度浇水。此外为排除外来种子的干扰,试验设置了空白对照,即在试验地放置5个高温处理后的土样

花盆<sup>[5]</sup>。

#### 1.4 数据处理

物种多样性计算<sup>[18-21]</sup>:多样性指数是一种用简单的数值来表示群落内物种多样性程度的方法,以此可对群落或生态系统的稳定性进行判断。本试验中选择 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Patrick 丰富度指数,对地上植物群落和土壤种子库的物种多样性进行统计分析。

$$\begin{aligned} \text{Shannon-Wiener 样} & H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \\ \text{Pielou 均匀度指数:} & E = H / \ln S \\ \text{Patrick 丰富度指数} & R = S \end{aligned}$$

式中, $N$ 为物种的个体总数, $S$ 为物种的数目, $P_i$ 表示第*i*个物种占总物种数的比例(可代表相对盖度、相对密度等)。

相似性指数计算<sup>[2,22]</sup>:本研究采用 Sorensen 相似性系数计算地上植物群落间相似性、各群落土壤种子库与对应地上植物群落相似性及各群落土壤种子库间的相似性,由此推测荒漠草原区群落演替及变化特征和地上植被物种组成与土壤种子库的耦合关系。

$$S_c = 2w / (a + b)$$

式中, $S_c$ 为相似性系数, $w$ 为样地共有植物种数, $a$ 和**b**分别表示两样地中各自拥有的植物种数。

用 Excel 2007 软件进行数据录入整理、计算及部分图表制作,通过 SPSS 17.0 软件进行方差和显著性分析,用 Canoco 4.5 进行 RDA 分析和制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植物群落土壤种子库物种组成及密度

由表 2 可知,不同植物群落土壤种子库物种组成及种子密度不同,同一物种在不同植物群落土壤种子库中种子密度有所差异。4 种植物群落土壤种子库中总计出现 42 种植物,隶属于 12 科 35 属,其中禾本科、菊科、藜科植物种出现比例较高,分别占到 26.19%、21.43%和 19.05%,总计占总物种数的 66.67%;此外,灰绿藜、冰草、碱蓬在 4 种植物群落土壤种子库中均有出现。苦豆子群落土壤种子库中出现 23 种植物,种子密度达 4550 粒/ $m^2$ ,隶属于 5 科 19 属,其中禾本科和藜科物种数占主要优势,分别达到 39.13%和 30.43%,种子密度分别占 32.42%和 36.59%,地上优势种苦豆子在土壤种子库中密度为 525 粒/ $m^2$ ,占种子密度的 11.54%。芨芨草群落土壤种子库中出现 29 种植物,种子密度达 5350 粒/ $m^2$ ,隶属于 9 科 24 属,其中菊科、藜科、禾本科植物种较多,分别占总物种数的 24.14%、24.14%和 20.69%,占总物种数的 68.97%,种子密度分别占 17.66%、27.48%和 38.41%,达总量的 83.55%,而地上优势种芨芨草在土壤种子库中仅占 4.32%。油蒿群落土壤种子库中出现了 20 种植物,种子密度为 3860 粒/ $m^2$ ,隶属于 8 科 18 属,其中菊科、藜科、禾本科植物种占优,分别占总物种数的 30.00%、25.00%和 20.00%,占到总物种数的 75%,种子密度分别占 25.26%、36.53%和 24.61%,达总量的 86.40%,而优势种油蒿仅占 0.26%。盐爪爪群落土壤种子库中出现了 8 种植物,种子密度为 2250 粒/ $m^2$ ,分别隶属于 5 科 8 属,其中藜科植物种占优,达 37.50%,种子密度占 22.89%,十字花科盐芥种子密度较高,占总量的 60.89%,而优势种盐爪爪仅占 1.56<sup>[5]</sup>。

### 2.2 不同植物群落土壤种子库物种生活型特征

由表 3 可知,苦豆子群落中一年生植物有 11 种,一年、两年生植物 2 种,多年生植物 11 种,半灌木 1 种,其中猪毛蒿为多年生或一年、两年生植物,野艾蒿为多年生或半灌木植物;芨芨草群落中一年生植物有 11 种,一年或两年生植物 1 种,多年生植物 17 种,半灌木 2 种,其中野艾蒿和苦马豆为多年生或半灌木植物;油蒿群落中一年生植物有 8 种,一年、两年生植物 2 种,多年生植物 9 种,半灌木 1 种,灌木 1 种,其中猪毛蒿为多年生或一年、两年生植物;盐爪爪群落中一年生植物有 4 种,多年生植物 3 种,半灌木 1 种,灌木 1 种。4 种群落

表 2 土壤种子库物种组成及其密度  
Table 2 Species composition and seed density of soil seed bank

物种名称 Species name	科属 Family & genus	苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>		芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>		油蒿群落 Community of <i>A. orlosica</i>		盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	
		密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%	密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%	密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%	密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%
苦豆子 <i>S. alopecuroides</i>	豆科槐属	525	11.54	—	—	—	—	—	—
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	藜科藜属	815	17.91	825	15.42	1045	27.07	50	2.22
藜 <i>Chenopodium album</i>	藜科藜属	135	2.97	35	0.65	—	—	—	—
尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	藜科藜属	175	3.85	—	—	—	—	—	—
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	禾本科冰草属	175	3.85	400	7.48	155	4.02	55	2.44
西伯利亚滨藜 <i>Atriplex sibirica</i>	藜科滨藜属	180	3.96	110	2.06	—	—	—	—
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科狗尾草属	560	12.31	425	7.94	300	7.77	—	—
棒头草 <i>Polypogon fugax</i>	禾本科棒头草属	225	4.95	—	—	—	—	—	—
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	禾本科虎尾草属	190	4.18	—	—	—	—	—	—
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	藜科碱蓬属	115	2.53	140	2.62	70	1.81	430	19.11
蒙古虫实 <i>Corispermum mongolicum</i>	藜科虫实属	190	4.18	110	2.06	105	2.72	—	—
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	禾本科隐子草属	195	4.29	280	5.23	—	—	—	—
针茅 <i>Stipa capillata</i>	禾本科针茅属	45	0.99	—	—	—	—	—	—
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	禾本科芦苇属	45	0.99	—	—	—	—	—	—
野艾蒿 <i>Artemisa larandulaefolia</i>	菊科蒿属	250	5.49	390	7.29	—	—	270	12.00
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科蒲公英属	70	1.54	65	1.21	—	—	—	—
披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i>	豆科野决明属	115	2.53	25	0.47	—	—	—	—
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	菊科苦苣菜属	90	1.98	65	1.21	30	0.78	—	—
西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	蓼科蓼属	35	0.77	110	2.06	—	—	5	0.22
芨芨草 <i>A. splendens</i>	禾本科芨芨草属	10	0.22	225	4.21	—	—	—	—
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	菊科蒿属	325	7.14	—	—	810	20.98	—	—
刺藜 <i>Chenopodium aristatum</i>	藜科藜属	55	1.21	110	2.06	80	2.07	—	—
野燕麦 <i>Avena fatua</i>	禾本科燕麦属	30	0.66	—	—	—	—	—	—
蒺藜 <i>Tribulus terrester</i>	蒺藜科蒺藜属	—	—	45	0.84	220	5.70	—	—
猪毛菜 <i>Tribulus terrester</i>	蒺藜科蒺藜属	—	—	140	2.62	110	2.85	—	—
砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	豆科棘豆属	—	—	60	1.12	55	1.42	—	—

续表

物种名称 Species name	科属 Family & genus	苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>		芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>		油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>		盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	
		密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%	密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%	密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%	密度 Density/m <sup>2</sup>	组成 Composition/%
牛心朴子 <i>C. komarovii</i>	萝藦科鹅绒藤属	—	—	—	—	135	3.50	—	—
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	菊科狗娃花属	—	—	310	5.79	95	2.46	—	—
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	蔷薇科委陵菜属	—	—	45	0.84	85	2.20	35	1.56
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	禾本科赖草属	—	—	240	4.49	255	6.61	—	—
中华小苦荬 <i>Laeridium chinense</i>	菊科小苦荬属	—	—	60	1.12	15	0.39	—	—
白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i>	禾本科狼尾草属	—	—	485	9.07	240	6.22	—	—
菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>	旋花科菟丝子属	—	—	15	0.28	—	—	—	—
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	远志科远志属	—	—	165	3.08	—	—	—	—
火媒草 <i>Olgaea leucophylla</i>	菊科蝟菊属	—	—	10	0.19	15	0.39	—	—
银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	旋花科旋花属	—	—	245	4.58	—	—	—	—
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	菊科蒿属	—	—	45	0.84	—	—	—	—
苦马豆 <i>Sphaerophysa salsula</i>	豆科苦马豆属	—	—	170	3.18	—	—	—	—
地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	大戟科大戟属	—	—	—	—	30	0.78	—	—
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	菊科蒿属	—	—	—	—	10	0.26	—	—
盐爪爪 <i>K. foliatum</i>	藜科盐爪爪属	—	—	—	—	—	—	35	1.56
盐芥 <i>Thellungiella salsuginea</i>	十字花科盐芥属	—	—	—	—	—	—	1370	60.89

土壤种子库中多年生植物和一年生植物种子居多,灌木、半灌木植物种较少,苦豆子群落和芨芨草群落为草本植物群落,其种子库中基本为草本类植物种,出现的半灌木物种野艾蒿和苦马豆均为多年生或半灌木植物<sup>[5]</sup>。

表 3 土壤种子库物种生活型特征

Table 3 Life type characteristics of species in soil seed bank

项目 Project	一年生植物/种 Annual plants	一年或两年生 植物/种 Annual or biennial plants	多年生植物/种 Perennials	半灌木/种 Semi-shrub	灌木/种 Shrub
苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	11	2	11	1	—
芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>	11	1	17	2	—
油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>	8	2	9	1	1
盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	4	—	3	1	1

### 2.3 不同植物群落土壤种子库垂直分布特征

由图 1 可知,不同植物群落土壤种子库中物种垂直分布特征不同,同一物种在不同植物群落土壤种子库中种子垂直分布特征存在差异。4 种植物群落土壤种子库中物种总数在不同土层中物种数均表现为:芨芨草群落>苦豆子群落>油蒿群落>盐爪爪群落;4 种植物群落土壤种子库中随着土层的加深,物种数均呈递减趋势。此外,4 种植物群落土壤种子库在土壤表层(0—2 cm,下同),物种数均较多,其中油蒿群落和盐爪爪群落表层土中包含土壤种子库中全部物种。由表 4 可知,4 种植物群落土壤种子库中种子密度表现为:芨芨草群落>苦豆子群落>油蒿群落>盐爪爪群落,且随着土层的加深 4 种植物群落种子密度均呈递减趋势,这与物种数在土壤种子库的垂直分布特征一致。但在不同植物群落土壤种子库中种子密度随着土层加深递减趋势不同,芨芨草群落和油蒿群落不同土层种子密度间差异均显著( $P < 0.05$ );苦豆子群落和盐爪爪群落土壤表层种子密度与土壤亚表层(2—5 cm,下同)和土壤深层(5—10 cm,下同)差异显著( $P < 0.05$ ),而土壤亚表层和深层种子密度无显著性差异( $P > 0.05$ )。此外,不同植物群落土壤种子库在同一土层种子密度不同,土壤表层苦豆子群落种子密度最高,芨芨草群落次之,且苦豆子群落显著高于油蒿群落和盐爪爪群落( $P < 0.05$ );土壤亚表层中,芨芨草群落种子密度显著高于其他植物群落( $P < 0.05$ );土壤深层中,种子密度均相对较低,盐爪爪群落种子密度显著低于其他植物群落( $P < 0.05$ )<sup>[5]</sup>。

### 2.4 土壤种子库多样性和相似性特征

土壤种子库多样性、均匀度及丰富度是反映植物群落潜在种群稳定性的重要指标,对预测群落演替发展具有重要意义。由图 2 可知,不同植物群落多样性特征不同,4 种植物群落土壤种子库中 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 指数和 Patrick 指数均表现为芨芨草群落>苦豆子群落>油蒿群落>盐爪爪群落。植物群落土壤种子库间相似性是群落潜在发展及演替预测的重要依据。由表 5 可知,不同植物群落土壤种子库间相似性不同,芨芨草群落土壤种子库与油蒿群落土壤种子库相似性最高,苦豆子群落与芨芨草群落次之,油蒿

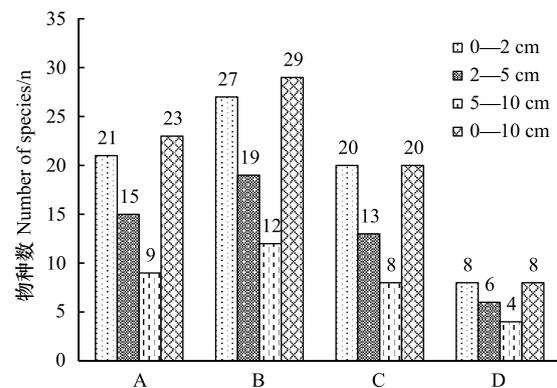


图 1 土壤种子库种子物种数垂直分布特征

Fig.1 Vertical distribution of species number in soil seed bank

A:苦豆子群落 (Community of *S. alopecuroides*), B:芨芨草群落 (Community of *A. splendens*), C:油蒿群落 (Community of *A. ordosica*), D:盐爪爪群落 (Community of *K. foliatum*)

群落与盐爪爪群落最低;芨芨草群落土壤种子库与其他 3 种群落土壤种子库相似性相对均较高,盐爪爪群落土壤种子库与其他植物群落土壤种子库相似性相对均较低。

表 4 土壤种子库种子密度垂直分布特征

Table 4 Vertical distribution of seed density in soil seed bank

项目 Project	0—2 cm/ (粒/m <sup>2</sup> )	2—5 cm/ (粒/m <sup>2</sup> )	5—10 cm/ (粒/m <sup>2</sup> )	0—10 cm/ (粒/m <sup>2</sup> )
苦豆子群落 Community of <i>S. alopecuroides</i>	3075±684Aa	950±105Bbc	530±77Ba	4550±711ab
芨芨草群落 Community of <i>A. splendens</i>	2795±460Aab	1940±265Ba	615±94Ca	5350±388a
油蒿群落 Community of <i>A. ordosica</i>	2185±317Abc	1105±185Bb	570±131Ca	3860±362b
盐爪爪群落 Community of <i>K. foliatum</i>	1330±384Ac	680±248Bc	240±45Bb	2250±576c

不同大写字母表示同一植物群落不同土层差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示不同植物群落同一土层差异显著 ( $P < 0.05$ )

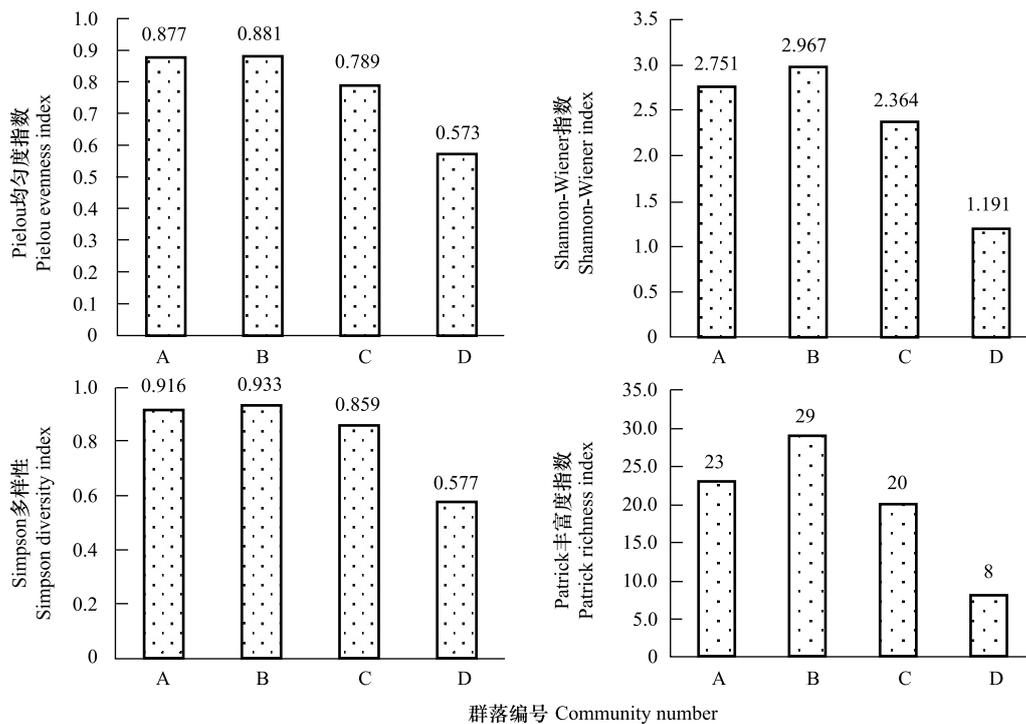


图 2 不同植物群落土壤种子库多样性特征

Fig.2 Diversity analysis of soil seed bank in different plant communities

表 5 不同植物群落土壤种子库相似性

Table 5 Similarity of soil seed bank in different plant communities

群落类型 Community type	苦豆子群落 (Community of <i>S. alopecuroides</i> )	芨芨草群落 (Community of <i>A. splendens</i> )	油蒿群落 (Community of <i>A. ordosica</i> )	盐爪爪群落 (Community of <i>K. foliatum</i> )
A	1.000			
B	0.577	1.000		
C	0.372	0.653	1.000	
D	0.323	0.324	0.286	1.000

## 2.5 土壤种子库物种多样性与土壤理化因子的 RDA 分析

为了更好的揭示土壤种子库与土壤环境因子之间的关系,采用冗余分析的方法进行排序,将不同群落多样性指数(Shannon-Wiener 指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Patrick 丰富度指数)作为响应变

量,土壤理化因子作为解释变量,利用冗余分析(Redundancy analysis, RDA),提取能明显影响土壤种子库变化的土壤理化因子指标。本研究中,经蒙特卡罗检验分析理化因子对土壤种子库的影响达到显著性( $P=0.034$ ),因此 RDA 排序图能很好的解释理化因子对土壤种子库物种多样性的影响。由表 6 可知,RDA 排序图的前 2 个排序轴特征值分别为 0.987 和 0.005,轴 1 和轴 2 物种关系的累计贡献率分别为 98.7 和 99.2,土壤种子库物种多样性与土壤理化因子 2 个排序轴的相关性分别为 0.996 和 0.999,故轴 1 可以较好地反应土壤种子库物种多样性与土壤理化因子的梯度变化特征。由图 3 可知,土壤种子库物种多样性特征指数与土壤 pH、含水量、碱解氮呈正相关,与土壤电导率呈负相关,其中土壤 pH 和电导率对种子库物种多样性的影响较大,土壤容重和全磷含量与种子库物种多样性的相关性相对较低。

表 6 土壤种子库物种多样性与土壤理化因子的 RDA 排序分析

Table 6 RDA sorting analysis of soil seed bank species diversity and soil physical and chemical factors

排序轴 Sorting axis	轴 1	轴 2
特征值 Eigenvalues	0.987	0.005
物种-环境相关性 Species-environment correlations	0.996	0.999
变量积累百分比物种数据 Cumulation percentage variance species date	98.7	99.2
物种-环境关系 Species-environment relationship	99.5	100.0
所有特征值之和 Sum of all eigenvalue	1.000	
所有典型特征值之和 Sum of all canonical eigenvalue	0.992	

### 3 讨论

#### 3.1 不同植物群落土壤种子库物种的特征

不同植被类型草地的土壤种子库差异较大,用不同的研究方法也会导致研究结果的不同<sup>[4,23]</sup>。Silvertown<sup>[24]</sup>研究表明,草地的土壤种子库密度范围在  $10^3-10^6$  粒/ $m^2$ ,本试验中土壤种子库的规模符合 Silvertown 的研究结果。4 种植物群落土壤种子库中禾本科、菊科、藜科植物种适应度相对较高,灰绿藜、冰草、碱蓬在荒漠草原区分布范围较广,均与其繁殖策略具有优势有关。此外,4 种植物群落土壤种子库中地上植物优势种的种子密度除苦豆子外,优势种在土壤种子库中占的比例均相对较低,这可能也与植物种的繁殖策略有关。

生活型是植物的一种生态分类单位,是其对生境条件长期适应后在外貌上表现出来的生长类型<sup>[25]</sup>。潘声旺等<sup>[26]</sup>对川渝地区乡土植物生活型构成与植被水土保持效应进行了研究,证明乡土植物生活型构成与植被的物种多样性有关,而且对改善生态性能至关重要。陈云等<sup>[27]</sup>对宝天曼自然保护区不同生活型物种与土壤相关性进行了分析,结果表明不同生活型的物种对土壤等资源的利用存在差异,而这种差异促进了物种的共存。目前有关土壤种子库中物种生活型的研究多局限于对其物种基本概况的描述,较少涉及研究土壤种子库与土壤等资源对地上植物群落结构的影响。本研究中 4 种植物群落土壤种子库中多年生和一年生植物种子比例居多,与研究区地上植被也多为多年生和一年生草本植物有关,在荒漠草原区多年生和一年生植物在生存生

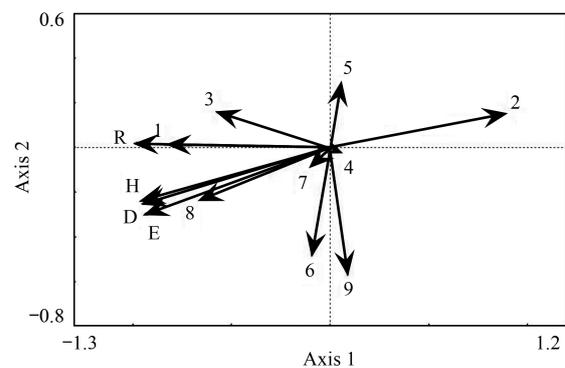


图 3 土壤种子库物种多样性与土壤理化因子的 RDA 排序图

Fig.3 RDA sorting map of soil seed bank species diversity and soil physical and chemical factors

理化因子 (Physical and chemical factors): 1 pH, 2 电导率 (Conductivity), 3 含水量 (Water content), 4 容重 (Bulk density), 5 有机碳 (Organic carbon), 6 全氮 (Total nitrogen), 7 全磷 (Total phosphorus), 8 碱解氮 (Alkali solution nitrogen), 9 速效磷 (Available phosphorus); 土壤种子库物种多样性 (Soil seed bank species diversity): 香农维纳指数 H (Shannon-Wiener index), Simpson 多样性 D (Simpson diversity index), Pielou 均匀度指数 E (Pielou evenness index), Patrick 丰富度指数 R (Patrick richness index)

长和繁殖上占优。在油蒿群落和盐爪爪群落中,虽然优势种灌木植物可产生大量的种子,但在荒漠草原区恶劣的环境条件不利于其种子结实,其繁殖方式以根茎繁殖为主。

土壤种子库具有明显的垂直分布特征,这种立体结构影响着种子库种子的萌发和留存,进而影响着原有植被的恢复与重建<sup>[28]</sup>。Bekker 等<sup>[29]</sup>提出在没有遭到破坏的土壤生境中,0—5 cm 土壤层中的种子垂直分布具有一定的数学模型。有研究表明<sup>[30]</sup>,土壤种子在土壤层中呈二项式分布或泊松分布。本研究中 4 种植物群落土壤种子库中随着土层的加深,物种数和种子密度均呈递减趋势,这与有关研究结果一致<sup>[11,31]</sup>,土壤种子库中种子的垂直分布可能与不同植物群落土壤环境不同有关,与种子大小及物种繁殖策略的不同有关,可能还与地上植被的覆盖及构建有关,灌木类群落土壤种子库种子受地上植被保护大多分布在土壤表层。而同一物种在不同植物群落土壤种子库的垂直分布,可能与土壤环境及物种在群落占据的地位不同有关。

对土壤种子库植物群落多样性特征的研究可以更好地认识群落的变化和发展,有利于退化荒漠草原的植被恢复<sup>[32]</sup>,研究表明土壤种子库对所有草地的生物多样性维持都具有重要意义,而在胁迫最严重的碱化草地上其种子密度最低<sup>[33]</sup>。本研究中 4 种植物群落土壤种子库中多样性指数、均匀度指数和丰富度指数均表现一致,说明 4 种植物群落潜在稳定性方面草本植物群落中芨芨草群落最稳定,灌木植物群落中油蒿群落相对更稳定。而物种多样性、均匀度、丰富度指数的变化趋势一致,这与包秀霞等<sup>[34]</sup>研究的土壤种子库物种多样性越高,物种丰富度越大,物种均匀性降低的结果相反,可能是因为包秀霞的研究区是在退化定居放牧区,本研究区在封育禁牧区。不同植物群落土壤种子库间相似性与土壤种子库中物种丰富度及物种繁殖策略有关,芨芨草群落土壤种子库与油蒿群落潜在发展趋势较为一致性,盐爪爪群落土壤种子库相对单一与其土壤本身条件限制有关,芨芨草群落土壤种子库物种数相对较丰富与其地上优势种芨芨草的构建有关,其地上部分结构有利于种子的储藏。

### 3.2 不同植物群落土壤种子库物种的特征与其土壤理化性质的关系

土壤环境因子对地上植被的生长、繁殖影响较大,而且进一步也可以影响土壤种子库,有关这方面的研究相对较少。埃及学者对沙丘土壤种子库的研究结果发现,沙丘的位置和方向对土壤种子库和种子萌发具有重要影响,而且种子的萌发受土壤理化性质的影响,微环境能显著影响土壤种子库的种子密度的分布格局<sup>[13]</sup>。王晓荣<sup>[35]</sup>对三峡库区消落带土壤理化性质和种子库优势物种分布关系进行了分析,结果发现:土壤容重、通气度对种子库物种储存、分布有一定影响,土壤 pH、全磷、速效磷及全钠等化学元素可解释不同月份种子库优势种的分布。翟付群等<sup>[15]</sup>对天津蓟运河故道消落带土壤种子库特征与土壤理化性质进行了分析,结果发现:土壤种子库特征和土壤理化性质间有重要关系,而适当地进行人为调控对土壤环境的改善及土壤种子库多样性的增加有积极作用。陈颖颖等<sup>[14]</sup>对提取非毛管孔隙、土壤含水量、全 N、全 P、有机质 5 个变量进行冗余分析,得出对土壤种子库影响较大的是非毛管孔隙度与土壤含水量。本研究中土壤 pH 和全盐对种子库物种多样性的影响最为显著,其次为含水量和碱解氮,这种影响可能与种子的储藏和萌发有关。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Roberts H A. Seed banks in soils. *Advances in Applied Biology*, 1981, 6: 1-55.
- [ 2 ] He M X, Lv L Y, Li H Y, Meng W Q, Zhao N. Analysis on soil seed bank diversity characteristics and its relation with soil physical and chemical properties after substrate addition. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0147439.
- [ 3 ] Harper J L. *Population Biology of Plants*. London: Academic Press, 1977.
- [ 4 ] 邓斌,任国华,刘志云,尚占环,裴世芳. 封育三年对三种高寒草地群落土壤种子库的影响. *草业学报*, 2012, 21(5): 23-31.
- [ 5 ] 邵文山. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤特性和种子库的研究 [D]. 宁夏大学, 2017.
- [ 6 ] 杨宁,付美云,杨满元,雷玉兰,邹冬生,林仲桂,赵林峰. 衡阳紫色土丘陵坡地不同土地利用模式下土壤种子库特征. *西北植物学报*, 2014, 34(11): 2324-2330.
- [ 7 ] Alvarez-Buylla E R, Martínez-Ramos M. Seed bank versus seed rain in the regeneration of a tropical pioneer tree. *Oecologia*, 1990, 84(3): 314-325.
- [ 8 ] 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.

- [ 9 ] 周华坤, 周立, 刘伟, 王启基, 赵伟, 周彦艳. 封育措施对退化与未退化矮蒿草草甸的影响. 中国草地, 2003, 25(5): 15-22.
- [ 10 ] 杨磊, 王彦荣, 余进德. 干旱荒漠区土壤种子库研究进展. 草业学报, 2010, 19(2): 227-234.
- [ 11 ] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 靳长青. 封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响. 草业学报, 2018, 27(6): 52-61.
- [ 12 ] 张玲, 方精云. 太白山土壤种子库储量与物种多样性的垂直格局. 地理学报, 2004, 59(6): 880-888.
- [ 13 ] Gad M R M, Kelan S S. Soil seed bank and seed germination of sand dunes vegetation in North Sinai-Egypt. *Annals of Agricultural Sciences*, 2012, 57(1): 63-72.
- [ 14 ] 陈颖颖, 吴自荣, 潘萍, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤种子库的萌发特征及其与土壤理化性质的关系. 土壤通报, 2016, 47(1): 92-97.
- [ 15 ] 翟付群, 许诺, 莫训强, 李洪远. 天津蓟运河故道消落带土壤种子库特征与土壤理化性质分析. 环境科学研究, 2013, 26(1): 97-102.
- [ 16 ] 邵文山, 李国旗, 陈科元, 赵盼盼. 荒漠草原 4 种常见植物群落土壤酶活性比较. 西北植物学报, 2016, 36(3): 579-587.
- [ 17 ] 李国旗, 李淑君, 蒙静, 武东波. 土壤种子库研究方法评述. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1721-1726.
- [ 18 ] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004.
- [ 19 ] Crist T O, Veech J A, Gering J C, Summerville K S. Partitioning species diversity across landscapes and regions: a hierarchical analysis of  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  diversity. *The American Naturalist*, 2003, 162(6): 734-743.
- [ 20 ] 黄金燕, 周世强, 谭迎春, 周小平, 王鹏彦, 张和民. 卧龙自然保护区大熊猫栖息地植物群落多样性研究: 丰富度、物种多样性指数和均匀度. 林业科学, 2007, 43(3): 73-78.
- [ 21 ] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [ 22 ] 刘瑞雪, 詹娟, 史志华, 陈龙清. 丹江口水库消落带土壤种子库与地上植被和环境的关系. 应用生态学报, 2013, 24(3): 801-808.
- [ 23 ] 尚占环, 龙瑞军, 马玉寿, 张黎敏, 施建军, 丁玲玲. 黄河源区退化高寒草地土壤种子库: 种子萌发的数量和动态. 应用与环境生物学报, 2006, 12(3): 313-317.
- [ 24 ] Sitvertown J W. *Introduction to Plantation Population Ecology*. London: Longman, 1982: 126-135.
- [ 25 ] 牛翠娟. 基础生态学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [ 26 ] 潘声旺, 袁馨, 雷志华, 胡明成. 乡土植物生活型构成对川渝地区边坡植被水土保持效益的影响. 生态学报, 2016, 36(15): 4654-4663.
- [ 27 ] 陈云, 袁志良, 任思远, 韦博良, 贾宏汝, 叶永忠. 宝天曼自然保护区不同生活型物种与土壤相关性分析. 科学通报, 2014, 59(24): 2367-2379.
- [ 28 ] 李洪远, 莫训强, 郝翠. 近 30 年来土壤种子库研究的回顾与展望. 生态环境学报, 2009, 18(2): 731-737.
- [ 29 ] Bekker R M, Bakker J P, Grandin U, Kalamees R, Milberg P, Poschlod P, Thompson K, Willems J K. Seed size, shape and vertical distribution in the soil: indicators of seed longevity. *Functional Ecology*, 1998, 12(5): 834-842.
- [ 30 ] Ambrosio L, Dorado J, Del Monte J P. Assessment of the sample size to estimate the weed seedbank in soil. *Weed Research*, 1997, 37(3): 129-137.
- [ 31 ] Ma M J, Zhou X H, Du G Z. Soil seed bank dynamics in alpine wetland succession on the Tibetan Plateau. *Plant and Soil*, 2011, 346(1/2): 19-28.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] Valkó O, Tóthmérész B, Kelemen A, Simon E, Miglécz T, Lukács B A, Török P. Environmental factors driving seed bank diversity in alkali grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 182: 80-87.
- [ 34 ] 包秀霞, 易津, 刘书润, 吉木色, 吉格吉德苏仁. 不同放牧方式对蒙古高原典型草原土壤种子库的影响. 中国草地学报, 2010, 32(5): 66-72.
- [ 35 ] 王晓荣. 三峡库区消落带土壤理化性质及种子库研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.