

纱网沙障对风蚀坑积沙区土壤种子库的影响

高海燕^{1,2}, 闫德仁^{1*}, 胡小龙^{1,2}, 袁立敏^{1,3}, 杨制国^{1,2}, 黄海广^{1,2}, 张胜男^{1,3}

(1. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 锡林郭勒盟 027300; 3. 沙地生物资源保护与培育国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:以浑善达克沙地固定沙丘风蚀坑积沙区为研究对象,依据固定沙丘活化形成风蚀坑积沙区的特点铺设纱网沙障,积沙区不同铺设方式下设计4 m×4 m 网格沙障(S1)和4 m 带状沙障(S2);积沙区不同空间位置下使用4 m×4 m 网格沙障铺设积沙区前段(L1)、积沙区中段(L2)和积沙区后段(L3)3个空间部位;以流动沙地为对照(CK),采用野外取样和温室内萌发的方法,探讨纱网沙障在积沙区不同铺设方式下及不同空间位置下对土壤种子库的影响。结果表明,1)不同处理下土壤种子库物种组成及种子密度不同,同一物种在不同处理的土壤种子库中出现时种子密度也存在差异;禾本科、藜科、菊科植物种在土壤种子库中出现比例均较高,分别占31.3%、25.0%和18.8%,占总物种数的75.0%;败酱科、豆科、毛茛科、唇形科、苋科在土壤种子库中均有出现。不同处理间S1物种种类最多,达12种,CK种类最少,仅有5种。2)风蚀坑积沙区经纱网沙障治理后,土壤种子库中植物物种数、种子密度和物种多样性均呈增加趋势;不同铺设方式下S1处理及不同空间位置下L2处理的1年生植物和多年生植物种子数均为最高。3)土壤种子库中Shannon-Wiener指数、Simpson指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数在不同空间位置下均表现为L2>L1>L3>CK;在不同铺设方式下均表现S1>S2>CK(Pielou均匀度指数除外)。此外,经过治理后,土壤种子库的恢复成效与沙化草地相近,与CK显著不同。设置纱网沙障改善了风蚀坑流动沙地土壤种子库结构,对快速恢复植被,促进流动沙地植被演替具有重要作用。

关键词:风蚀坑;纱网沙障;土壤种子库;浑善达克沙地

中图分类号:S288

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0093-09

Influence of Gauze Sand Barrier on the Change of Soil Seed Bank in Sand Accumulation Area of Wind Erosion Pit

GAO Hai-yan^{1,2}, YAN De-ren^{1*}, HU Xiao-long^{1,2}, YUAN Li-min^{1,3}, YANG Zhi-guo^{1,2},
HUANG Hai-guang^{1,2}, ZHANG Sheng-nan^{1,3}

(1. Inner Mongolia Academy of Forestry, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Duolunhunshandake Sand Ecosystem Research Station, Xilingol 027300, Inner Mongolia, China; 3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Sandy Land Biological Resources Conservation and Cultivation, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: As a potential source of natural vegetation renewal, soil seed bank plays an important role in the natural restoration, renewal and succession of vegetation. This study took the sand accumulation area of the fixed dune wind erosion pit occurring in the Otindag sandy land as the research object, two kinds of gauze (made from polyethylene, PE) sand barriers were set according the characteristics of the sand accumulation area of the wind erosion pit formed by the activation of fixed dunes: checkerboard type (S1) with a size of 4 m×4 m and striped type (S2) with a width of 4 m. Sand barriers were set up in different spatial positions

收稿日期:2022-06-17 修回日期:2022-08-12

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0031)。

第一作者:高海燕,硕士。研究方向:沙漠治理、土壤环境与资源微生物。E-mail:nmgghy1993@163.com

* 通信作者:闫德仁,博士,研究员。研究方向:沙漠治理。E-mail:nmgkkydr@163.com

of the sand accumulation area; the front (L1), middle (L2), and the rear (L3) sections of the sand accumulation area. The moving sand land (without setting PE gauze sand barrier) was used as the control. The methods of field sampling and germination measurement in the greenhouse were used to explore the effect of different laying methods and different setting spatial positions in the sand accumulation area. The results showed 1) the species composition and seed densities of soil seed banks were different under different treatments, and the seed densities of the same species were also different when they appeared in soil seed banks under different treatments. Gramineae, Chenopodiaceae and Compositae species were found high proportions in the soil seed bank, accounting for 31.3%, 25.0% and 18.8%, respectively, which accounted for 75.0% of the total species. Valerianaceae, Leguminosae, Ranunculaceae, Labiatae, Amaranthaceae all appeared in the soil seed bank. Among different treatments, the most species types (12) were found in S1, the least (only 5 species) in the control. 2) For different types of sand barriers, the number of plant species, seed density and species diversity in the soil seed bank showed increasing trends in S1 treatment. The seed numbers of annual plants and perennial plants were the highest in the S1 treatment and the L2 treatment under different spatial positions. 3) The Shannon-Wiener index, Simpson index, Pielou evenness index and Margalef richness index in the soil seed bank were in the order of $L2 > L1 > L3 > \text{control}$ under different spatial position treatments. Under different setting type, and they were in the order of $S1 > S2 > CK$ (except Pielou evenness index). In addition, after governance, the restoration effect of soil seed bank was similar to that of desertified grassland, but significantly different from that of the control. Setting sand barriers with PE gauze improves the structure of the soil seed bank in the wind erosion pit and plays an important role in the rapid restoration of vegetation and the promotion of vegetation succession in the moving sand.

Key words: wind erosion pit; gauze checkerboard sand barrier; soil seed bank; Otindag sandy land

土壤种子库是指存在于一定体积土壤中所有活性的、休眠及未休眠种子的总和^[1-2]。土壤种子库与植被存在着密切的关系,不仅是地上植被补充更新的源泉,而且也是维持植被物种多样性的一种能力,并在一定程度上反映植物群落中各种群的状况,甚至反映出植物群落的历史和未来^[3-4],同时也为地表植被群落更新、演替以及退化植被的恢复提供物质基础^[5-7]。因此,土壤种子库在生产实践及生态学理论上具有重要意义,历来为国内外学者所重视。目前,土壤种子库相关研究多集中在森林、草原、湿地等生态系统,而流动沙地治理后土壤种子库的变化研究相对较少。所以,在干旱、半干旱荒漠地区,对土壤种子库组成及格局变化进行研究,有助于对植物群落内部重要限制因子的理解,进而科学、准确预测地上植被恢复进程^[8-9]。

防沙治沙工程建设中沙障是最常用且有效的技术措施,尤其在流动沙地治理和植被恢复中具有重要作用。沙障类型主要采用柴、草、枝条、板条等材料直插在沙面上,或用黏土、卵石等在沙面上堆成土埂,起到降低风速、阻挡和固定流沙的作用。而纱网沙障是结合生物措施综合治理流动沙地设计的新型软体材料沙障,地面自然高度约 15 cm,透风率 40%~50%,属于疏透型沙障,可以有效避免传统材料沙障以人工施工为主、效率低、成本高、沙障间易

形成掏蚀凹面、种子不易保存等缺陷。根据闫德仁等^[10-12]对纱网沙障的研究,设置纱网沙障后,风速降低 26.7%~55.3%,输沙量降低 65.3%~96.7%,地表粗糙度由 0.024 cm 增加到 0.85~4.27 cm,沙障设置当年植被盖度由 5% 提高到 15%,第 2 年提高到 30%~45%。所以,铺设纱网沙障可实现流动沙地植被的快速重建。尽管纱网沙障具有良好的植被恢复效果,但纱网沙障对土壤种子库物种构成等方面的影响尚未可知,所以,本研究选择在风蚀坑积沙区铺设不同形状的纱网沙障,探讨纱网沙障的形状及铺设位置如何影响土壤种子库,了解土壤中植被恢复的潜在种源分布状况,为科学评价纱网沙障的植被恢复效果提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于浑善达克沙地多伦县大河口乡红花山村(116°48'E, 42°13'N),海拔 1 347 m,属大陆性气候,年平均降水量 386.2 mm,年蒸发量 1 761.0 mm,≥10℃ 的有效积温 1 970℃,无霜期 95 d,年日照数 3 142.7 h,年平均相对湿度 62%,年均气温 1.6℃,年平均风速 3.6 m·s⁻¹。本区除夏季出现偏东偏南风外,其他季节盛行西北风或西风。研究地土壤为固定沙丘活化后的流动风沙土,天然建群

植物主要有冰草(*Agropyron cristatum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、大针茅(*Stipa grandis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。

1.2 试验设计

1.2.1 纱网沙障铺设 采用直压立式纱网沙障固沙造林技术对风蚀坑积沙区进行治理,沙障材料为抗老化聚乙烯(Polyethylene,简称PE)环保纱网,网片宽度60 cm,网孔大小0.85~2.0 mm。铺设纱网沙障时间为2017年,沙障铺设位置及设计规格根据

研究地固定沙丘活化形成的风蚀坑特点而确定,在垂直主风向方向平铺,用圆头铁锹沿纱网中线位置下压,连续2次下压之间不留空隙,使网片两端向上翘起形成直立皱褶(图1),地面自然高度约15 cm^[13]。本研究设计沙障类型为带状和网格型2种。按照铺设形状在风蚀坑积沙区铺设4 m×4 m网格和宽度为4 m带状2种沙障,选取未治理流动沙地为对照(CK),并参照附近沙化草地(G),研究纱网沙障治理后对土壤种子库恢复的影响。

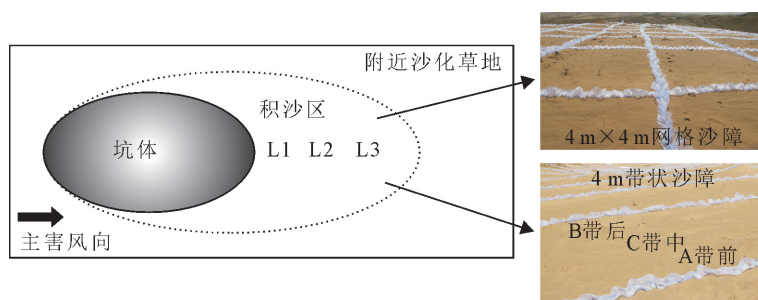


图1 铺设纱网沙障

Fig.1 Checkerboard and striped types of PE gauze sand barriers

1.2.2 土壤种子库样品采集与萌发试验 在纱网沙障铺设后第3年,即2020年植物生长季结束后进行土壤样品采集,时间为9月22日—26日。采集风蚀坑积沙区不同空间位置下4 m×4 m网格沙障的样品,划分积沙区前段(L1)、中段(L2)和后段(L3)3个空间位置,分别采集3个空间部位的土壤作为土壤种子库的测定样品,分析不同空间位置土壤种子库的变化特征。

采集风蚀坑积沙区不同铺设方式下4 m×4 m网格沙障(S1)和4 m带状沙障(S2)的土壤样品,其中,4 m×4 m网格沙障土壤样品为L1、L2和L3的混合样品;4 m带状沙障土壤样品采集,是在带状沙障前、中、后3个空间位置分别采集样品并混合,作为测定样品。

每个采样点样方规格为20 cm×20 cm×5 cm,每个空间位置设置6次重复,装袋做好标记,带回实验室风干备用。将风干土样过2 cm筛去除杂物,平铺于28 cm×20 cm×10 cm方形塑料盆中,土层厚度约3 cm,置于温室内,每天定时浇水,保证土壤湿润。试验期间,每天观察种子萌发情况,待鉴定完毕后剔除,避免落入种子库影响试验准确度,对暂时无法鉴定的幼苗进行移栽直至能够鉴定为止,持续观测4周无新幼苗出现,试验结束。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 土壤种子库密度统计 土壤种子库密度用深度为5 cm的单位面积土壤内所含的活力种子数

量来表示,即将取样面积20 cm×20 cm的种子数目换算为1 m×1 m的数量即为土壤种子库的种子密度(平均值±标准误差)。

1.3.2 植物群落物种多样性 用以下4个指标来分析^[14]。

Shannon-Wiener 多样性指数(H)

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

Margalef 丰富度指数(R)

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数(E)

$$E = H / \ln S \quad (3)$$

Simpson 优势度指数(D)

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (4)$$

式中: S 为物种数; N 为种子库中所有种子数; P_i 是第*i*种植物种子数占种子库中总种子数的比例。

采用Excel 2010进行数据分析,Origin 2017进行制图,SAS 9.1软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 纱网沙障对土壤种子库物种组成及密度的影响

2.1.1 土壤种子库物种组成 温室内萌发试验结果表明(表1),样地内土壤种子库共有8个科16个种,以禾本科、黎科、菊科为主,其中禾本科物种数最

多,为 4 种,藜科 4 种,菊科 3 种,占比分别为 25.0%、25.0%、18.5%。不同处理间,4 m×4 m 网格沙障铺设下物种种类最多,达 12 种,CK 种类最少,仅有 5 种。种子库中密度较大的植物为虫实和马唐,在 CK、草地、4 m×4 m 网格沙障(S1)、4 m 带状沙障(S2)、积沙区前段沙障位置(L1)、积沙区中段沙障位置(L2)和积沙区后段沙障位置(L3)各处理中,虫实分别占 40.1%、25.3%、48.1%、32.0%、14.1%、7.1%、32.4%,马唐分别占 19.9%、59.3%、29.9%、42.7%、25.3%、20.0%、21.6%。

在风蚀坑积沙区不同形状沙障铺设下种子库密

度大小为:草地(G)>4 m×4 m 网格沙障(S1)>4 m 带状沙障(S2)>CK,S1 处理下马唐和虫实的密度显著高于 CK,且 S1 处理下马唐密度显著高于 S2 处理($P<0.05$)。在不同风蚀坑积沙区空间部位使用 4 m×4 m 网格沙障铺设下种子库密度大小为:积沙区中段位置(L2)>积沙区前段位置(L1)>积沙区后段位置(L3)>CK,L2 处理差巴嘎蒿密度显著高于其他处理($P<0.05$),L1、L2、L3 处理间的黄花蒿密度均有显著差异($P<0.05$),且 L1、L2 处理显著高于 CK($P<0.05$)。

表 1 不同处理下土壤种子库物种组成

Table 1 Species composition of soil seed bank in different treatments

科	物种	生活型	种子库密度/(粒·m ⁻²)						
			CK	G	S1	S2	L1	L2	L3
禾本科	马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>)	A	16.7±12.4c	170.8±65.6ba	263.9±81.2a	100±37.6bc	58.3±27.9bc	45.8±21.8bc	50±26.6bc
	狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	A	—	4.2±4.2b	20.8±6ba	58.3±32.7a	12.5±12.5b	4.2±4.2b	—
	糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	P	—	4.2±4.2a	1.4±1.4a	4.2±4.2a	—	—	—
	早熟禾(<i>Poa annua</i>)	A	—	29.2±16.4	—	—	—	—	—
藜科	虫实(<i>Corispermum hysopifolium</i>)	A	8.3±8.3c	400±75.3a	163.9±64.8b	133.3±39.1cb	104.2±35.6cb	129.2±26.9cb	33.3±15.4cb
	尖头叶藜(<i>Chenopodium acuminatum</i>)	A	—	—	1.4±1.4	—	—	—	—
	灰绿藜(<i>Chenopodium glaucum</i>)	A	—	—	—	—	—	4.2±4.2	—
	叉分蓼(<i>Polygonum divaricatum</i>)	P	—	—	2.8±2.8	—	—	—	—
菊科	差巴嘎蒿(<i>Artemisia halodendron</i>)	P	4.2±4.2b	20.8±20.8b	73.6±11.7b	8.3±5.3b	83.3±40.7b	216.7±81.3a	45.8±41b
	黄花蒿(<i>Artemisia annua</i>)	A	4.2±4.2c	20.8±16.4c	1.4±1.4c	4.2±4.2c	141.7±51.1b	241.7±70.9a	16.7±5.3c
	鹤虱(<i>Carpesium abrotanoides</i>)	A	—	—	2.8±2.8	—	—	—	—
败酱科	败酱草(<i>Patrinia scabiosifolia</i>)	P	—	4.2±4.2a	12.5±5.2a	—	8.3±5.3a	4.2±4.2a	4.2±4.2a
豆科	扁蓿豆(<i>Melilotoides ruthenica</i>)	P	—	20.8±20.8a	1.4±1.4a	—	—	—	—
毛茛科	唐松草(<i>Thalictrum aquilegifolium</i>)	P	—	—	—	4.2±4.2a	4.2±4.2a	—	4.2±4.2a
唇形科	香青兰(<i>Dracocephalum moldavica</i>)	A	8.3±8.3	—	—	—	—	—	—
苋科	反枝苋(<i>Amaranthus retroflexus</i>)	A	—	—	2.8±2.8	—	—	—	—
萌发种类小计			5	9	12	7	7	7	6

注:A.1 年生植物;P.多年生植物。同行不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 土壤种子库密度特征 由图 2 可知,沙障形状对土壤种子库密度大小的影响。在风蚀坑积沙区不同铺设方式纱网沙障下种子库密度依次为:草地(675±96.4)粒·m⁻²、4 m×4 m 网格沙障(548.6±131.3)粒·m⁻²、4 m 带状沙障(312.5±87.3)粒·m⁻²、CK(41.7±23)粒·m⁻²。1 年生植物种

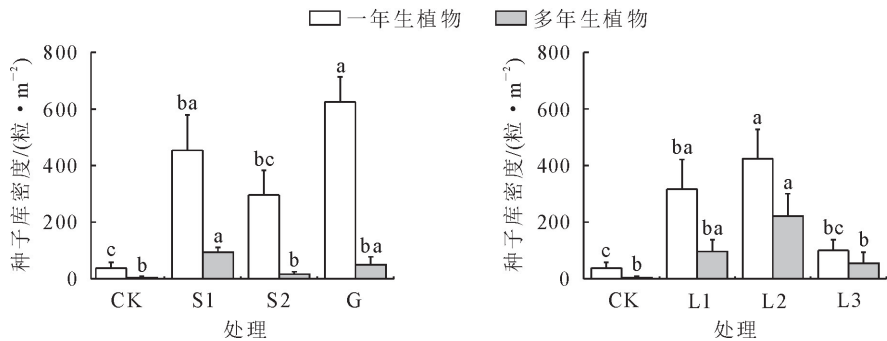
子密度增幅较大,多年生植物次之,且 4 m×4 m 网格沙障密度显著高于 CK($P<0.05$),4 m 带状沙障显著低于草地($P<0.05$)。

风蚀坑积沙区不同空间位置下种子库密度依次为:积沙区中段位置(645.8±140.3)粒·m⁻²、积沙区前段位置(412.5±102.0)粒·m⁻²、积沙区后段

位置(154.2 ± 40.5)粒 $\cdot\text{m}^{-2}$ 、CK(41.7 ± 23.0)粒 $\cdot\text{m}^{-2}$ 。经过 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 网格沙障治理后积沙区前段位置、积沙区中段位置的 1 年生植物, 积沙区中段位置的多年生植物种子密度显著大于 CK ($P < 0.05$); 积沙区中段位置 1 年生植物和多年生植物均显著大于积沙区后段位置 ($P < 0.05$)。

2.1.3 土壤种子库生活型组成 从表 2 可以看出, 各处理间 1 年生植物种子数所占比例较多, 多年生

植物种子数所占比例较少; 治理前 CK 1 年生植物物种数占比高于多年生植物, 经过铺设纱网沙障治理后的第 3 年, 1 年生植物物种数和多年生植物物种所占比例接近。同时经过治理后风蚀坑积沙区不同空间位置下积沙区前段位置、积沙区中段位置、积沙区后段位置及风蚀坑积沙区不同铺设方式纱网沙障下 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 网格沙障的多年生植物种子数所占比例提高。



不同小写字母表示不同处理间同一生活型差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同处理下土壤种子库密度特征

Fig. 2 Characteristics of soil seed bank density in different treatments

表 2 不同处理下土壤种子库生活型所占比例

Table 2 The proportion of life forms in soil seed bank under different treatments (%)

种类	项目	CK	G	不同铺设形状		不同空间部位		
				S1	S2	L1	L2	L3
多年生植物	物种所占比例	20.0	44.4	50.0	42.9	42.9	28.6	50.0
	种子数所占比例	10.1	7.4	17.2	5.3	23.2	34.2	35.1
1 年生植物	物种所占比例	80.0	55.6	50.0	57.1	57.1	71.4	50.0
	种子数所占比例	89.9	92.6	82.8	94.7	76.8	65.8	64.9

2.2 纱网沙障对土壤种子库科属分布特征的影响

由图 3 可知, 风蚀坑积沙区不同铺设方式下, $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 网格沙障和 4 m 带状沙障禾本科、藜科种子密度显著增加, CK 各科种子密度无显著差异; 风蚀坑积沙区不同空间位置下, 积沙区前段位置和积沙区中段位置菊科种子密度显著增加 ($P < 0.05$)。经过纱网沙障治理后的风蚀坑积沙区有新物种出现。

2.3 纱网沙障对土壤种子库多样性的影响

由图 4 分析可知, 在风蚀坑积沙区不同空间位置下, 积沙区前段位置、积沙区中段位置和积沙区后段位置 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数均较 CK 显著增加 ($P < 0.05$), Margalef 丰富度指数无显著差异, 积沙区前段位置、积沙区中段位置 Simpson 优势度指数较 CK 显著增加 ($P < 0.05$)。在风蚀坑积沙区不同铺设方式下 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 网格沙障和 4 m 带状沙障 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数均较 CK 显著增加

($P < 0.05$), 与沙化草地无显著差异; $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 网格沙障 Margalef 丰富度指数较 CK 显著增加且与 4 m 带状沙障和沙化草地之间无显著差异。

3 结论与讨论

3.1 结论

浑善达克沙地风蚀坑积沙区铺设纱网沙障治理后, 相较流动沙地, 土壤种子库组成结构和密度发生较大变化。风蚀坑积沙区不同铺设方式下, $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 网格沙障和风蚀坑积沙区不同空间位置下积沙区中段位置 1 年生植物和多年生植物种子数均显著增加。同时土壤种子库多年生植物物种占比增加, 禾本科、藜科、菊科植物种在土壤种子库中出现比例均较高, 说明土壤种子库对植被恢复具有重要作用。

土壤种子库中 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数, 在风蚀坑积沙区不同空间位置下均表现为积沙区中段位置优于积沙区前段位置优于积沙区后段位置优

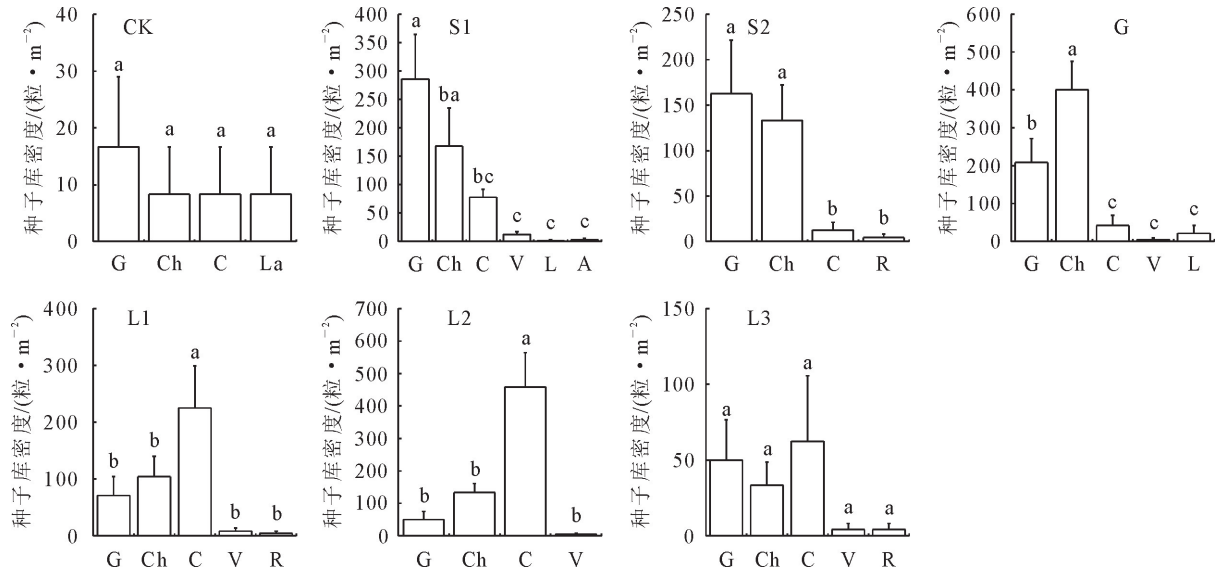


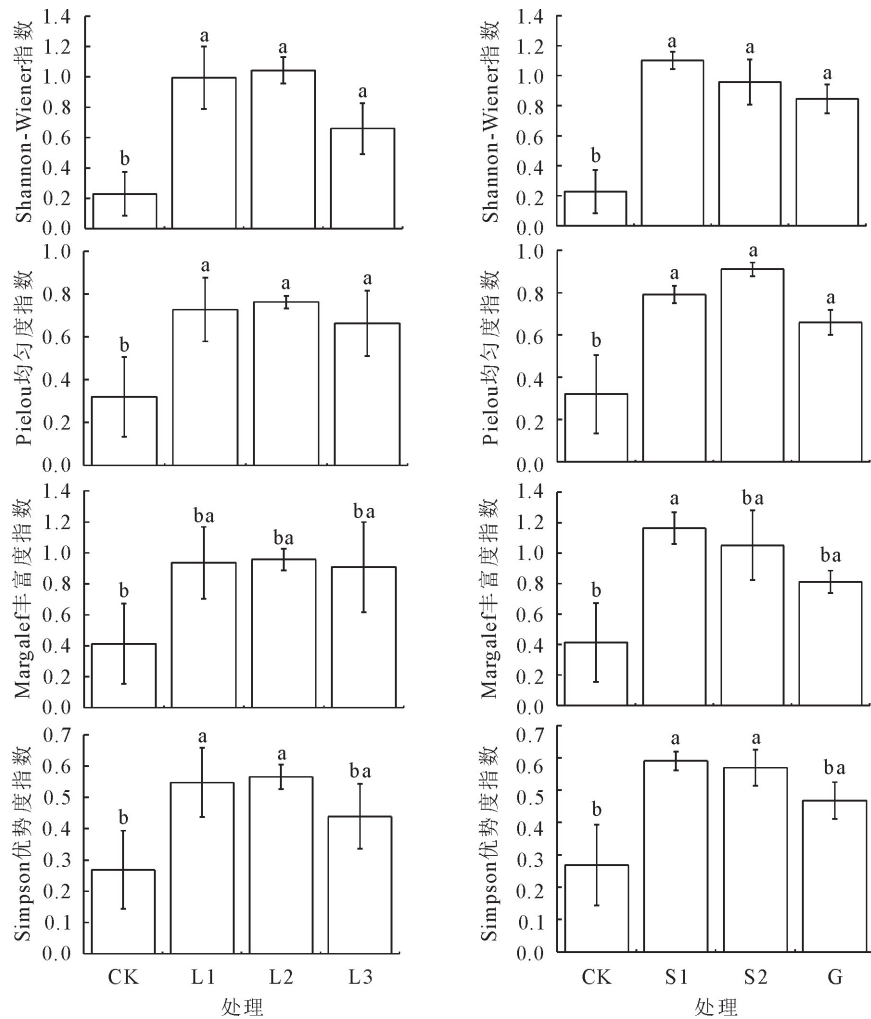
图3 不同处理下土壤种子库种子萌发特征

Fig. 3 Germination characteristics of seeds in soil seed bank under different treatments

G. 禾本科; Ch. 黎科; C. 菊科; V. 败酱科; L. 豆科; R. 毛茛科; La. 唇形科; A. 苋科。不同小写字母表示同一处理下,不同科之间差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 不同处理下土壤种子库种子萌发特征

Fig. 3 Germination characteristics of seeds in soil seed bank under different treatments



不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 不同处理下土壤种子库物种多样性分析

Fig. 4 Species diversity analysis of soil seed bank in different treatments

于CK;在风蚀坑积沙区不同铺设方式下均表现为4 m×4 m 网格沙障优于4 m 带状沙障优于CK (Pielou 均匀度指数除外)。此外,风蚀坑积沙区经过铺设纱网沙障后,土壤种子库的恢复成效与沙化草地相近,而与CK 存在显著差异。

3.2 讨论

3.2.1 纱网沙障对土壤种子库密度影响 地上植被是土壤种子库中种子的直接来源,土壤种子库又是植被自然恢复的保障,且对地上植物群落及其物种多样性具有直接作用,研究土壤种子库可以有效预测生态恢复进程,在荒漠化治理及植被快速恢复中具有重要作用^[15-17]。刘生权等^[18]通过对毛乌素沙地东南缘沙柳群落种子库特征研究发现土壤种子库有助于群落正向演替。

流动沙丘受风蚀等影响,植物种子不易存留定居,故土壤种子库组成简单且密度低。Brown 等^[19]研究发现,世界范围内固定沙漠、半固定沙地、流动沙地等土壤种子库最小种子密度在1 000 粒·m⁻²以上;曾彦军等^[20]测定阿拉善干旱荒漠区草原土壤种子库的密度为56~406 粒·m⁻²;李雪华等^[21]测定科尔沁沙地流动沙、半流动沙丘以及半固定沙地、固定沙地的密度分别为90、265、1 270 粒·m⁻²和1 828 粒·m⁻²;与上述地区相比,本研究中风蚀坑积沙区的土壤种子库密度处于较低水平的42 粒·m⁻²。对比流动沙地(CK),经过纱网沙障治理后的沙地,土壤种子库组成结构和密度发生较大变化,在风蚀坑积沙区不同铺设方式下,4 m×4 m 网格沙障和4 m 带状沙障的土壤种子库密度分别是CK 的13.0、7.5 倍;在风蚀坑积沙区不同空间位置采用4 m×4 m 网格沙障铺设下,积沙区中段、前段和后段位置土壤种子库密度分别是CK 的15.5、9.9、3.7 倍;沙化草地种子库密度是CK 的16.2 倍。不同铺设方式下4 m×4 m 网格沙障种子库结构和密度优于4 m 带状沙障,可能原因为4 m×4 m 网格沙障相较于4 m 带状沙障改变了风沙流运动轨迹,由于风动力和风速流场的变化,气流也发生了明显的紊动,并改变着地表风沙流的结构,可以有效降低风速,拦截地表沙粒^[22-23],使土壤种子得以有效保持,对天然植被生长和繁殖产生有利影响,得以提高土壤种子库中种子萌发率。相同4 m×4 m 网格铺设下,在风蚀坑积沙区不同空间位置下积沙区中段沙障位置治理效果最优,可能原因为,积沙区不同位置积沙厚度不同,同时存在土壤湿度、土壤化学性质空间异质性均导致种子库差异化^[24],所以纱网沙障作为一种沙地治理技术,对沙地植被恢复具有重要作用。

3.2.2 纱网沙障对土壤种子库组成及物种多样性影响 生活型作为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^[25]。本研究表明,浑善达克沙地风蚀坑积沙区土壤种子库组成较为简单,经过治理后,多年生物种数所占比例增加并使得多年生、1 年生物种数所占比例相近;CK 1 年生植物种子数所占比例大于多年生,经过治理后多年生种子数所占比例有所提高,主要以禾本科、藜科、菊科为主,并伴有其他物种出现。说明经纱网沙障固沙后,有效减小地面风沙移动,从而减少土壤水分蒸发,使土壤中主要植物种繁殖逐渐增多,少数植物种经长时间定居后逐渐萌发,使土壤中物种逐渐增多。

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,有利于沙化土地的植被恢复,群落多样性可由物种 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数来表征,Simpson 优势度指数是对群落集中性的度量^[26]。潘声旺等^[27]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。本研究发现,在风蚀坑积沙区不同空间位置下和风蚀坑积沙区不同铺设方式下,土壤种子库 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数均增加,且高于沙化草地,可能是周边草地植物群落较为稳定,群落物种相对固定。恢复中的沙地土壤种子库处于动态演化中,各物种之间未形成明显优势层,所以各指数会暂时优于草地,经过不断演化后,可能出现下降;积沙区中段和积沙区前段,可能用环境属性的空间异质性的来解释植被动态^[28],在不同环境如沙地、流动沙地、平缓低洼地等小环境之间存在土壤湿度和有机质的空间异质性^[29];而且在同一个沙丘或风蚀坑也存在土壤水肥力差异性^[30],风的侵蚀和搬运作用导致风蚀坑及下风侧积沙区在基质、土壤粗细度、温度、养分以及水分等理化性质发生变化,出现不同小群落特征^[31-32]。

参考文献:

- [1] 李国旗,谢博勋,解盛,等.基于文献计量学的土壤种子库研究进展分析[J].土壤,2022,54(1):103-113.
LI G Q,XIE B X,XIE S,et al. Research progress of soil seed bank based on bibliometric analysis[J]. Soils,2022,54(1):103-113. (in Chinese)
- [2] 李国旗,李淑君,蒙静,等.土壤种子库研究方法评述[J].生态环境学报,2013,22(10):1721-1726.

- LI G Q, LI S J, MENG J, *et al.* Review of research methods of soil seed bank[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(10): 1721-1726. (in Chinese)
- [3] 马金宝, 高凯, 孙忠林, 等. 科尔沁沙地 4 种生境地土壤种子库特征及其与土壤化学因子的关系[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(3): 65-68, 73.
MA J B, GAO K, SUN Z L, *et al.* Characteristics of soil seed banks and their relationships with soil chemical factors in four habitats in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(3): 65-68, 73. (in Chinese)
- [4] COFFIN L. Spatial and temporal variation in the seed bank of a semiarid grassland[J]. American Journal of Botany, 1989, 76(1): 53-58.
- [5] 张蕊, 马红彬, 贾希洋, 等. 不同生态恢复措施下宁夏黄土丘陵区典型草原土壤种子库特征[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 32-41.
ZHANG R, MA H B, JIA X Y, *et al.* Characteristics of soil seed banks in a typical grassland in the loess hilly region of Ningxia under different ecological restoration measures[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(1): 32-41. (in Chinese)
- [6] 王昌辉, 刘青青, 文竹梅, 等. 红壤侵蚀区植被恢复过程中土壤种子库变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 417-423.
WANG C H, LIU Q Q, WEN Z M, *et al.* Variation characteristics of soil seed bank during vegetation restoration in red soil erosion area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 417-423. (in Chinese)
- [7] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征及其土壤理化性质[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6282-6292.
LI G Q, SHAO W S, ZHAO P P, *et al.* Analysis of soil seed bank characteristics and soil physical and chemical properties of four plant communities in a desert steppe region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6282-6292. (in Chinese)
- [8] 李国旗, 邵文山, 赵盼盼, 等. 封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 52-61.
LI G Q, SHAO W S, ZHAO P P, *et al.* Effects of enclosure on the soil seed bank of two plant communities on the desert steppe[J]. Acta Prata Culturae Sinica, 2018, 27(6): 52-61. (in Chinese)
- [9] 占玉芳, 马力, 滕玉凤, 等. 河西走廊沙漠人工植被区土壤种子库特征研究[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1-13.
ZHAN Y F, MA L, TENG Y F, *et al.* Analysis of soil seed bank characteristics of artificial revegetated desert area in Hexi corridor[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1-13. (in Chinese)
- [10] 闫德仁, 胡小龙, 黄海广, 等. 纱网沙障对植被恢复的影响[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(3): 1-4.
- [11] 闫德仁, 袁立敏, 黄海广, 等. 乌兰布和沙漠流动沙丘纱网沙障防风效能研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 198-202.
YAN D R, YUAN L M, HUANG H G, *et al.* Study on wind-proof effect of gauze sand barriers on mobile sand dunes in Ulan buh desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2): 198-202. (in Chinese)
- [12] 闫德仁, 闫婷. 内蒙古流动沙地治理技术发展回顾[J]. 中国沙漠, 2022, 42(1): 66-70.
- YAN D R, YAN T. Overview of development for mobile sand control technology in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(1): 66-70. (in Chinese)
- [13] LY/T 2986—2018, 流动沙地沙障设置技术规程[S]. 北京: 国家林业和草原局, 2018.
- [14] 张洋洋, 周清慧, 许骄阳, 等. 林龄对马尾松人工林林下植物与土壤种子库多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2121-2129.
ZHANG Y Y, ZHOU Q H, XU J Y, *et al.* Effects of forest ages on the diversity of understory plants and soil seed bank of *Pinus massoniana* plantations[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(11): 2121-2129. (in Chinese)
- [15] 师楠, 马建忠, 江期川, 等. 金沙江头塘小流域 5 种人工林种子库研究[J]. 森林工程, 2021, 37(3): 44-51.
SHI N, MA J Z, JIANG Q C, *et al.* Species diversity of five plantation communities in toutang small watershed of Jinsha River[J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 44-51. (in Chinese)
- [16] 刘进娣, 马红彬, 周瑶, 等. 轮牧时间对荒漠草原土壤种子库特性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2378-2388.
LIU J D, MA H B, ZHOU Y, *et al.* Effects of rotation grazing time on the characteristics of soil seed bank in desert steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2378-2388. (in Chinese)
- [17] 孙文艳, 廖超英, 李晓明, 等. 毛乌素沙地东南部人工林土壤生物学特性[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 28-33.
SUN W Y, LIAO C Y, LI X M, *et al.* Soil biological characteristics of plantations in the southeast of Maowusu sandy land[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3): 28-33. (in Chinese)
- [18] 刘生权, 杜雪, 李强, 等. 毛乌素沙地东南缘沙柳群落种子库特征研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(6): 140-144.
LIU S Q, DU X, LI Q, *et al.* Seed bank characteristics of *Salix* community in southeastern margin of Mu Us sandy land[J]. Journal of North west Forestry University, 2021, 36(6): 140-144. (in Chinese)
- [19] BROWN J H, REICHMAN O J, DAVIDSON D W. Granivory in desert ecosystems[J]. Anna Rev Ecol Syst, 1979, 10(1): 201-227.
- [20] 曾彦军, 王彦荣, 南志标, 等. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1457-1463.
ZENG Y J, WANG Y R, NAN Z B, *et al.* Soil seed banks of different grassland types of Alashan arid desert region, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1457-1463. (in Chinese)
- [21] 李雪华, 韩士杰, 宗文君, 等. 科尔沁沙地沙丘演替过程的土壤种子库特征[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 66-69.
LI X H, HAN S J, ZONG W J, *et al.* Characteristics of soil seed banks of sand dune succession process in Horqin sandy land[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 66-69. (in Chinese)
- [22] 闫德仁, 胡小龙, 黄海广, 等. 不同几何形状纱网沙障输沙量风洞模拟实验研究[J]. 内蒙古林业科技, 2017, 43(3): 14-17.
- [23] 闫德仁, 袁立敏, 黄海广, 等. 直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 79-85.

- YAN D R, YUAN L M, HUANG H G, *et al.* Influence of gauze sand barrier on sediment transport and wind speed near surface[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 79-85. (in Chinese)
- [24] 满良, 哈斯, 张萍, 等. 呼伦贝尔草原风蚀坑及下风侧积沙区植被小群落特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10): 2177-2181.
- MAN L, HA S, ZHANG P. Micro-community characteristics of vegetations in blowouts and depositional areas of hulunbuir grassland, Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(10): 2177-2181. (in Chinese)
- [25] 牛翠娟. 基础生态学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [26] 高海燕, 红梅, 霍利霞, 等. 水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(1): 36-45.
- GAO H Y, HONG M, HUO L X, *et al.* Effect of water and nitrogen interaction on plant species diversity and biomass in a desert grassland[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 36-45. (in Chinese)
- [27] 潘声旺, 袁馨, 雷志华, 等. 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[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4654-4663.
- PAN S W, YUAN X, LEI Z H, *et al.* Effect of life form composition of indigenous plant species on soil and water conservation on slopes in Sichuan Chongqing region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): 4654-4663. (in Chinese)
- [28] 王海涛, 何兴东, 高玉葆, 等. 油蒿演替群落密度对土壤湿度和有机质空间异质性的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1145-1153.
- WANG H T, HE X D, GAO Y B, *et al.* Density in artemisia ordosica successional community in response to spatial heterogeneity of soil moisture and organic matter[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(6): 1145-1153. (in Chinese)
- [29] 王春玲, 郭泉水, 谭德远, 等. 准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 43-48.
- WANG C L, GUO Q S, TAN D Y, *et al.* *Haloxylon ammodendron* community patterns in different habitats along southeastern edge of Zhunger basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(7): 43-48. (in Chinese)
- [30] 卢建国, 王海涛, 何兴东, 等. 毛乌素沙地半固定沙丘油蒿种群对土壤湿度空间异质性的响应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1469-1474.
- LU J G, WANG H T, HE X D, *et al.* Responses of artemisia ordosica population to soil moisture spatial heterogeneity on semi-fixed dune of Mu Us sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1469-1474. (in Chinese)
- [31] 彭羽, 蒋高明, 牛书丽, 等. 浑善达克沙地中部典型固定沙丘植物群落分析[J]. 西北植物学报, 2006, 26(7): 1414-1419.
- PENG Y, JIANG G M, NIU S L, *et al.* Communities of typical sand dune-fixed plants in the central part of Otindag sandy region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, 26(7): 1414-1419. (in Chinese)
- [32] 宋明华, 陈玉福, 董鸣, 鄂尔多斯高原覆沙坡地植物群落格局[J]. 植物生态学报, 2002, 13(4): 396-402.
- SONG M H, CHEN Y F, DONG M. Spatial pattern of the plant community along a sand-covered hillslope in Ordos plateau in China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 13(4): 396-402. (in Chinese)

(上接第42页)

- [34] 方精云, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [35] 李义平, 蔡宏, 田鹏举, 等. 贵州省黎平县地表覆被变化引起的生态系统碳储量变化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 92-99.
- LI Y P, CAI H, TIAN P J, *et al.* Changes in ecosystem carbon stock caused by land cover change in Liping County, Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 92-99. (in Chinese)
- [36] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合 InVEST 与 GeoSOS-FLUS 模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2799-2809.
- ZHANG K Q, CHEN J J, HOU J K, *et al.* Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2799-2809. (in Chinese)
- [37] HONG S, YIN G, PIAO S, *et al.* Divergent responses of soil organic carbon to afforestation[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(9): 694-700.
- [38] 角媛梅, 张家元. 云贵川大坡度梯田形成原因探析——以红河南岸哈尼梯田为例[J]. 经济地理, 2000(4): 94-96.
- [39] 牛海生, 李大平, 张娜, 等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 749-755.
- [40] 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 等. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2022, 30(4): 651-657.
- WANG Y Y, HU C S, DONG W X, *et al.* Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheat-maize rotation system in the north China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 651-657. (in Chinese)
- [41] 陈绍民, 杨硕欢, 张保成, 等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 229-238.
- CHEN S M, YANG S H, ZHANG B C, *et al.* Carbon balance in summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 229-238. (in Chinese)