

贾冰,司建华,武志博,等.飞播种子丸粒化技术应用对植被和土壤的影响[J].中国沙漠,2023,43(2):195–204.

# 飞播种子丸粒化技术应用对植被和土壤的影响

贾冰<sup>1,2</sup>,司建华<sup>1</sup>,武志博<sup>3</sup>,齐识<sup>1</sup>,马丽丽<sup>4</sup>,  
朱兴林<sup>1,2</sup>,秦洁<sup>1,2</sup>,石福年<sup>5</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.阿拉善盟生态产业发展规划中心,内蒙古 阿拉善左旗 750300; 4.西南石油大学,四川 成都 610500; 5.阿拉善右旗林业和草原局,内蒙古 阿拉善右旗 737300)

**摘要:**为阐明丸粒化技术应用对植被和土壤的影响,以阿拉善左旗腾格里沙漠飞播区为研究区,采用空间替代时间方法,对比分析了2017—2020年种子丸粒化和未丸粒化飞播区植被生长状况、土壤水分、养分和土壤微生物的变化情况。结果表明:(1)飞播种子丸粒化技术应用后,丸粒化播区植物盖度及地上、地下和总生物量分别以13.72%、395.88%、127.97%和526.16%的年增长率增加;未丸粒化播区各项指标增量明显低于丸粒化播区;(2)每个飞播年丸粒化和未丸粒化播区土壤含水量和养分之间差异性不明显;随着生长年限增加,土壤有机碳呈增加趋势,土壤全氮含量呈减少趋势,土壤全磷含量变化不大,不同飞播年限丸粒化和未丸粒化播区土壤全磷含量分别为208.67~222.5 mg·kg<sup>-1</sup>和192.83~213.33 mg·kg<sup>-1</sup>;(3)对8个样地的土壤样本提取DNA进行微生物群落分析,其中仅采自2017年及2019年丸粒化播区的样本满足后续测序要求,相比于2019年丸粒化播区,2017年丸粒化播区土壤的Simpson指数出现了些许降低,而Sobs指数、Chao1指数和ACE指数均显著增加,分别提高了46.67%、43.73%和43.91%。总体上,飞播种子丸粒化对阿拉善左旗沙漠土壤环境具有一定的改善作用。

**关键词:**飞播造林;种子丸粒化;植被;土壤;土壤微生物;腾格里沙漠

文章编号:1000-694X(2023)02-195-10

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00088

中图分类号:F415.2

文献标志码:A

## 0 引言

人工造林是干旱区生态恢复的主要措施,广泛应用于全球干旱沙漠地区,是防治沙漠化的有效方法<sup>[1]</sup>。飞播作为中国三大造林方式之一,在20世纪50年代由西方国家传入中国,由于具有布施快、成本低、见效快、范围广、经济效益好等优势,广泛地用于北方干旱半干旱地区植被建设<sup>[2]</sup>。近年来,国内外已有大量的关于飞播植被建设的研究报道,结果表明,飞播造林能够改善植物群落多样性<sup>[3-5]</sup>,并随着植被生长年限的增加,改变土壤水分生境条件及理化性质<sup>[6]</sup>,逐渐形成沙地结皮,增强表层土壤持水能力<sup>[7]</sup>,使流动沙丘由流动到半固定和固定状态,最终达到防风固沙的效果。

1982年飞播造林正式纳入中国国家计划,自此飞播造林在中国国家计划中的造林目标逐步增大,目前,中国在干旱沙区营造防风固沙林面积已达121万hm<sup>2</sup>,飞播人工植被36.2万hm<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。通过合理选择飞播植物种,实现在立地条件差、治理难度大的沙漠地区增加森林面积,以达到防沙治沙的目的<sup>[9]</sup>。研究发现,对飞播植物种子进行丸粒化处理能够防止飞播后种子随风漂移而聚积,飞播种子均匀度较好,有利于种子出芽<sup>[10-12]</sup>。许多学者就飞播造林开展了研究,包括飞播植物的选取<sup>[13]</sup>、飞播后植被群落演替<sup>[14-16]</sup>、飞播对土壤功能性的影响<sup>[17-18]</sup>等方面,取得了一定的成果。然而,目前针对飞播种子丸粒化对环境生态反馈影响的研究报道并不多见,因而

收稿日期:2022-07-25; 改回日期:2022-09-06

资助项目:内蒙古自治区科技成果转化引导项目(CGZH2018118);内蒙古自治区科技重大专项(zdxx2018057);中国科学院创新交叉团队项目(JCTD-2019-19);塔里木盆地生物资源保护利用兵团重点实验室开放项目(BRZD2202);甘肃省祁连山生态环境研究中心开放项目(QLS202004)

作者简介:贾冰(1985—),女,宁夏银川人,硕士,工程师,主要从事干旱区生态水文的研究。E-mail:jiab@lzb.ac.cn

通信作者:司建华(E-mail:jianhuas@lzb.ac.cn)

还不能准确地认识飞播种子丸粒化对于干旱区植被建设和生态环境改善的作用,种子丸粒化对飞播成效影响的关键时期是飞播初期,这对后期是否成林起到主导作用,目前有关飞播种子丸粒化初期对植被和土壤的影响尚不清楚。基于此,本研究以阿拉善左旗腾格里沙漠飞播区为研究区,通过对不同飞播年限飞播区植被和土壤的调查,分析种子丸粒化与未丸粒化播区植被生长变化特征、土壤理化性质和土壤微生物特征,为提高沙漠地区飞播造林成效提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗(37°24′—41°52′N, 103°21′—106°51′E),南北长495 km,东西宽214 km,东接内蒙古巴彦淖尔市磴口县、乌拉特后旗,乌海市;东南与宁夏石嘴山市、

银川市、青铜峡市相望;南交甘肃景泰县、古浪县,宁夏中卫市;西连甘肃武威市,内蒙古阿拉善右旗;北与蒙古国接壤,国境线长189 km(图1)。面积25 514 km<sup>2</sup>,地势南高北低,北端银根盆地海拔742 m,是阿拉善地区最低的地方,由沙漠、湖盆、低山、丘陵、戈壁共同组成。根据阿拉善左旗气象站1977—2020年资料统计,区内多年平均降水量为216.6 mm,其中2017、2019年和2018年丸粒化播区降水量为125~150 mm,2018年和2020年非丸粒化播区降水量为100~125 mm,多年平均蒸发量为2 266.5 mm。降水时间分布不均,有效降水集中在5—9月,该时段降水量约占全年总降水量的80%。5—8月蒸发量较大,平均月蒸发量为282.1~359.7 mm。多年平均气温为8.7℃,气温由南向北递减。多年平均湿度为38.8%,平均风速为2.6 m·s<sup>-1</sup>,无霜期120~180 d。

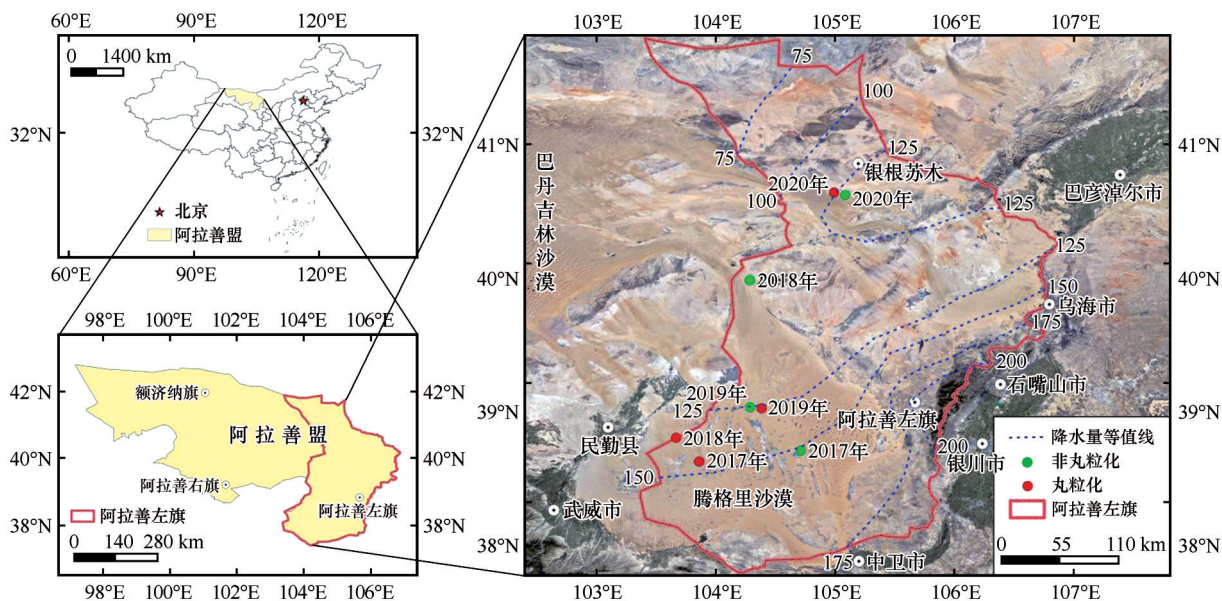


图1 研究区及采样点位置图

Fig. 1 Location of the study area and the sampling points

## 2 研究方法

2020年9月,对2017—2020年飞播年不同播区(丸粒化和未丸粒化播区)植被和土壤样品进行采集,分析其理化性质及微生物的时空变化特征。

### 2.1 植被调查

共调查样地8个(表1),调查植被物种有花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和沙蒿(*Artemisia desertorum*),每个样地大

小为20 m×100 m,分为20 m×20 m的5个样方,调查内容包括物种、株数、冠幅、地上生物量和地下生物量,并计算其盖度和密度(盖度=植物体地上部分垂直投影所覆盖的面积/调查面积×100%,密度=植物株数/样地面积)。调查过程中记录了样地经纬度、海拔、地貌以及气候状况,围栏封育、原生植被生长状况等。

种子丸粒化出苗状况的调查方法采用《内蒙古自治区飞播治沙造林技术规程》DB15/T556—2013,参照出苗观测情况,播区有苗面积成数估测精度

表 1 飞播区 8 个采样点的空间位置及飞播时间

Table 1 Spatial location and time of 8 sampling sites in the aerial seeding area

飞播时间	采样区域	地理位置	飞播植物
2017 年 5 月 30 日—7 月 28 日	未丸粒化播区	38°25′41.7″N,104°42′25.8″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
	丸粒化播区	38°20′06.9″N,103°51′15.4″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
2018 年 5 月 31 日—7 月 30 日	未丸粒化播区	39°42′29.2″N,104°17′58.4″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
	丸粒化播区	38°32′10.5″N,103°39′39.6″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
2019 年 5 月 31 日—8 月 10 日	未丸粒化播区	38°47′21.8″N,104°18′08.4″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
	丸粒化播区	38°46′55.8″N,104°20′27.0″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
2020 年 6 月 6 日—8 月 6 日	未丸粒化播区	40°34′33.5″N,105°03′46.9″E	花棒、沙拐枣、沙蒿
	丸粒化播区	40°35′22.2″N,104°59′09.6″E	花棒、沙拐枣、沙蒿

80%、可靠性 95%，计算出样方总数和间距，按播区宽度等距布设样方 256 个，样方面积 1 m<sup>2</sup>，调查播区内苗木名称、苗木株数和分布情况等。

2.2 土壤样品采集

挖取土壤剖面 8 个(4 个丸粒化播区和 4 个未丸粒化播区)，深度为 100 cm。所有剖面分为 6 层，分别为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm，获取土壤样品 48 个，为了避免水分损失，采样过程中迅速将样品装于聚乙烯样品袋中密封保存，同时将含水量测试样品置于铝盒中，现场测量了各土层样品的土壤湿重。利用环刀采集容重样品，采集深度分别为 0~20、20~40 cm 和 40~60 cm。样品封存后带回实验室进行土壤理化性质测定。

在每个调查样方内，利用 5 点取样法(每个 20 m×20 m 样方的对角线均匀设置 3 个 1 m×1 m 的小样方，在小样方内按照 4 个角和中心点采集 5 个深度为 10 cm 土壤样品，3 个 1 m<sup>2</sup> 小样方的土壤混合为 1 个土样)，采集的土壤样品冷藏带回实验室进行土壤微生物检测。

2.3 土壤理化指标测定

土壤含水量(*SWC*)用烘干称重法测定，将野外采集的样品置于恒温烘箱中，于 105 ℃ 温度放置 12 h，称重获得 *SWC*；土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加加热法测定，全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定，全磷含量采用钼锑抗比色法测定<sup>[19]</sup>。

2.4 土壤微生物测定

将经过 40 目筛的土壤样品转移至 50 mL 聚乙烯离心管内，送至上海美吉生物有限公司进行 16S

rRNA 基因测序。使用 A.E.Z.N.A.TM 土壤 DNA 试剂盒提取样品中 DNA，每个样本 3 个重复，用引物 341F (5′-CCTACGGGNGGCWGCAG-3′) 和 806R (5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′) 进行 PCR 扩增，并用 2% 的琼脂糖凝胶电泳检测扩增产物，然后经切胶、回收、建立文库并通过 Illumina 公司的 Miseq PE300 测序平台进行文库构建和上机测序，采用 Trimmomatic 软件对原始 DNA 序列质量控制，用 FLASH 软件拼接得到优质序列<sup>[20]</sup>。通过美吉生信云分析平台进行微生物群落 Alpha 多样性分析、微生物群落组成分析和 PICRUST 功能基因预测。

2.5 数据统计与分析

采用 Excel 2016 进行数据统计分析，使用 SigmaPlot 12.5 进行绘图，使用 SPSS 21.0 进行 *t* 检验及方差分析。采用 *t* 检验分析同一年丸粒化与未丸粒化播区各指标是否存在差异，采用单因素方差分析 (ANOVA) 进行丸粒化与未丸粒化播区各指标随播种年限变化的差异性分析，多重比较采用 Duncan 法，显著性检验水平为  $\alpha=0.05$ 。利用 Mothur (v1.30.2) 软件计算不同随机抽样下的 Alpha 多样性指数和稀释曲线。

3 结果与分析

3.1 飞播种子丸粒化与未丸粒化植被特征

对 2017—2020 年 8 个飞播样地(4 个丸粒化和 4 个未丸粒化)植被生长状况进行了统计分析，结果如表 2 所列。

丸粒化和未丸粒化播区植被密度分别为 0.021~1.192 株·m<sup>-2</sup> 和 0.015~0.832 株·m<sup>-2</sup>，2017 年和 2018



表 2 不同飞播年份飞播植被密度、盖度和生物量  
Table 2 Vegetation density, coverage and biomass  
of aerial seeding in different years

飞播年	飞播植物指标	丸粒化播区	未丸粒播区
2020 年	植被密度/(株·m <sup>-2</sup> )	1.192±0.882 <sup>Aa</sup>	0.832±0.765 <sup>Aa</sup>
	植被盖度/%	0.344±0.181 <sup>Bb</sup>	0.559±0.527 <sup>Bb</sup>
	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	0.444±0.325 <sup>Ab</sup>	0.094±0.085 <sup>Bb</sup>
	地下生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	0.007±0.003 <sup>Ab</sup>	0.016±0.008 <sup>Ab</sup>
	总生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	0.451±0.327 <sup>Ab</sup>	0.110±0.089 <sup>Ab</sup>
2019 年	植被密度/(株·m <sup>-2</sup> )	0.021±0.017 <sup>Ab</sup>	0.015±0.011 <sup>Ab</sup>
	植被盖度/%	0.462±0.309 <sup>Ab</sup>	0.316±0.168 <sup>Ab</sup>
	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	2.077±1.500 <sup>Ab</sup>	1.195±1.745 <sup>Ab</sup>
	地下生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	1.187±0.857 <sup>Ab</sup>	0.683±0.846 <sup>Ab</sup>
	总生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	3.264±2.358 <sup>Ab</sup>	1.878±2.591 <sup>Ab</sup>
2018 年	植被密度/(株·m <sup>-2</sup> )	0.713±1.315 <sup>Aab</sup>	0.083±0.012 <sup>Bb</sup>
	植被盖度/%	18.453±19.340 <sup>Ab</sup>	14.67±11.378 <sup>Aa</sup>
	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	291.281±347.081 <sup>Ab</sup>	34.351±17.385 <sup>Ba</sup>
	地下生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	108.334±137.032 <sup>Ab</sup>	14.265±8.932 <sup>Ba</sup>
	总生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	399.615±483.827 <sup>Ab</sup>	51.736±26.317 <sup>Ba</sup>
2017 年	植被密度/(株·m <sup>-2</sup> )	0.123±0.073 <sup>Aab</sup>	0.017±0.011 <sup>Bb</sup>
	植被盖度/%	41.511±22.059 <sup>Aa</sup>	0.608±0.569 <sup>Bb</sup>
	地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	1188.070±858.596 <sup>Aa</sup>	6.322±4.238 <sup>Bb</sup>
	地下生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	390.871±314.328 <sup>Aa</sup>	2.849±1.680 <sup>Bb</sup>
	总生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	1578.945±1172.818 <sup>Aa</sup>	9.171±5.915 <sup>Bb</sup>

不同大写字母表示同一年份丸粒化播区与未丸粒化播区指标存在显著性差异;不同小写字母表示丸粒化播区与未丸粒化播区指标随不同播种年份变化存在显著差异( $P<0.05$ )。

年丸粒化播区植被密度显著高于未丸粒化播区。2017年和2018年丸粒化播区植被盖度及地上、地下和总生物量均显著高于未丸粒化播区,2019年和2020年丸粒化播区与未丸粒化播区各项指标差异不显著。2017—2020年飞播区植被盖度及地上、地下生物量的总体变化随着生长年限的延长呈现增加趋势,从第3年开始显著增加,其中丸粒化飞播区植被盖度及地上、地下和总生物量分别以13.72%、

395.88%、127.97%和526.16%的年增长率增加;未丸粒化飞播区各项指标增加量明显低于丸粒化播区。2017年丸粒化飞播区植被盖度及地上、地下和总生物量分别是未丸粒化播区的25.8、187.92、137.19和172.17倍;2020年丸粒化飞播区地上、地下和总生物量分别是未丸粒化播区的4.72、0.48和4.1倍。

为验证飞播种子丸粒化处理对播区成苗状况的影响,2017年6月选取同一地区相邻的两个种子丸粒化和未丸粒化播区,两个播区均位于腾格里沙漠腹地,其水文气候条件和地形地貌基本相同,进行飞播作业。飞播种子均为花棒、沙拐枣和沙蒿。并于同年10月12日进行成苗调查统计(表3)。

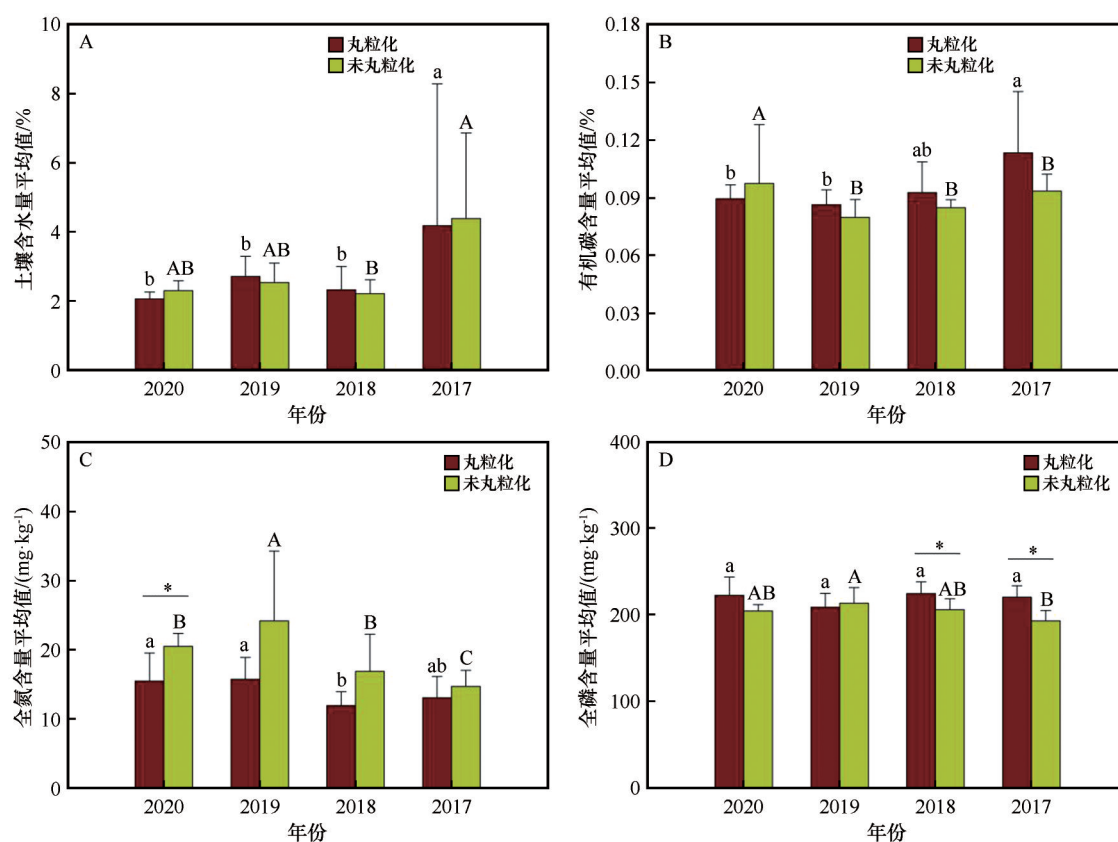
由表3可知,种子丸粒化播区有苗样地频度为24.2%,播区内平均每公顷苗木株数为11 420株,成苗面积占到播区总面积的22.7%;种子未丸粒化播区有苗样地频度为8.3%,播区内每公顷苗木株数为2 220株,成苗面积占到播区总面积的7.8%。通过对比发现,种子丸粒化播区有苗样地数、有苗样地平均株数、有苗样地频度及成苗面积均高于种子未丸粒化播区,种子丸粒化处理后的播区出苗状况明显优于种子未丸粒化处理的播区,表明种子丸粒化处理能大大提高飞播种子的成苗率,有效地提高飞播造林的成效。

### 3.2 飞播种子丸粒化与未丸粒化土壤理化性质

不同飞播造林技术(丸粒化和未丸粒化)和飞播年份(2017—2020年)对土壤水分和养分的影响如图2和图3所示。从图2A可以看出,每个飞播年丸粒化和未丸粒化播区土壤含水量之间差异性不显著。其中2017年丸粒化和未丸粒化播区土壤含水量较高,分别为4.18%和4.38%,结合植被生长状况,判断土壤含水量直接影响了播区植株的生长状况。土壤含水量随土层深度的变化如图3A所示,2017、2018、2019、2020年丸粒化和未丸粒化播区土壤含水量分别为0.82%~12.04%和2.96%~9.39%,

表 3 非丸粒化和丸粒化播区种子出苗率  
Table 3 Emergence rate of non-pelleted and pelleted seeds

播区名称	播区面积 /hm <sup>2</sup>	平均每公顷 株数/株	有苗样地数 /个	有苗样地平均株数/株			有苗样地 频度/%	成苗面积 /hm <sup>2</sup>
				沙拐枣	花棒	沙蒿		
丸粒化播区	1 969	11 420	29	2.3	1.0	2.4	24.2	447.2
未丸粒化播区	1 814	2 220	10	2.1	0.0	0.5	8.3	142.4



不同大写字母表示未丸粒化播区指标随不同播种年份变化存在显著差异;不同小写字母表示丸粒化播区指标随不同播种年份变化存在显著差异; \*表示  $P < 0.05$

图2 不同飞播年份土壤剖面含水量及养分含量平均值

Fig. 2 Average values of soil moisture and nutrient contents in four aerial seeding years

1.32%~3.26% 和 1.63%~2.75%, 1.96%~3.29% 和 1.54%~3.05%, 1.77%~2.32% 和 1.91%~2.65%, 其中 2017 年各土层土壤含水量的变化幅度最大。

图 2B 表明,不同飞播年内丸粒化和未丸粒化土壤有机碳含量变化分别在 0.09%~0.11% 和 0.08%~0.10%, 丸粒化播区土壤有机碳含量略高于未丸粒化播区。随着生长年限的增加,丸粒化和未丸粒化播区土壤有机碳含量呈“V”型曲线变化,最大值出现于 2017 年和 2020 年。不同飞播年丸粒化播区土壤有机碳含量的大小顺序分别为 2017 年>2018 年>2020 年>2019 年。

图 2C 表明,不同飞播年限丸粒化和未丸粒化播区土壤全氮含量变化为 9.36~21.5 mg·kg<sup>-1</sup> 和 11.37~42 mg·kg<sup>-1</sup>, 丸粒化播区土壤全氮含量低于未丸粒化播区。随着生长年限的增加,土壤全氮含量整体呈现下降的趋势,这可能与植物对土壤氮素的吸收有关,飞播年限越长,植被生长状况越好,对土壤中养分的吸收量越大。不同飞播年限丸粒化播区土壤全氮含量的大小为 2019 年>2020 年>2017 年>2018 年。

图 2D 表明,不同飞播年限丸粒化和未丸粒化播区土壤全磷含量变化为 208.67~222.5 mg·kg<sup>-1</sup> 和 192.83~213.33 mg·kg<sup>-1</sup>。总体来说,丸粒化和未丸粒化播区土壤全磷含量的变化较小,丸粒化播区土壤全磷含量略大于未丸粒化土壤全磷含量,丸粒化播区土壤全磷的变化呈现轻微的波动状态,而未丸粒化播区土壤全磷随着飞播年限的增加也呈现降低的趋势,也表征了植被对土壤磷元素的吸收情况。

由图 3B 可知,相同飞播年丸粒化播区 0~40 cm 土层中有机碳的含量高于其他土层,其中 2017 年丸粒化播区 40 cm 土层内有机碳含量达到所有土层有机碳含量的最大值,说明在丸粒化播区内生长年限的增加对浅层土有机碳具有一定的改良作用,而未丸粒化播区内土壤有机碳的变化则较为平稳。

不同飞播年限不同土壤层全氮和全磷含量结果表明(图 3C、图 3D),相同飞播年内丸粒化和未丸粒化播区各土壤层全氮含量随土壤深度的变化情况并不一致,这主要与植被根系层的分布以及降水

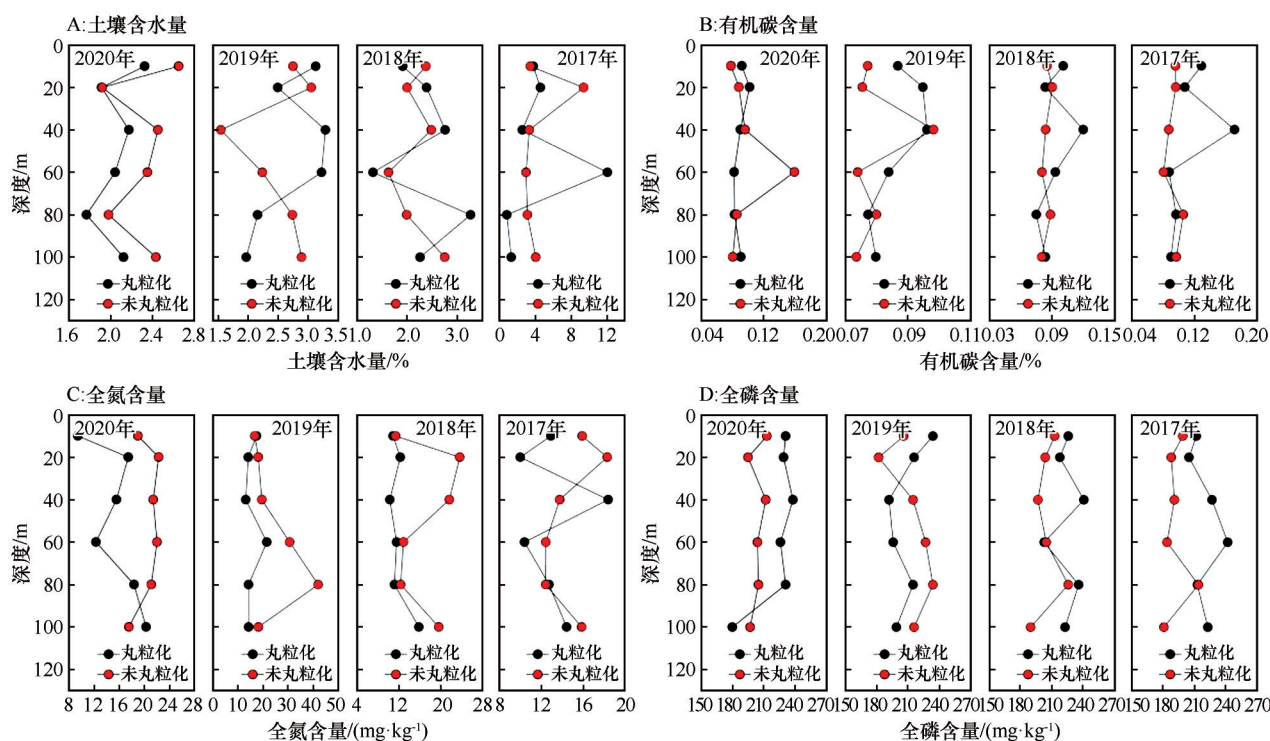


图3 不同飞播年限土壤含水量、有机碳、全氮及全磷含量随土层深度变化

Fig. 3 Changes of soil water content, organic carbon, total nitrogen and total phosphorus content with soil depth in different years of aerial seeding

淋溶作用有关,植被根系分布的差异导致植物对不同土层的养分吸收不同,而降水的淋溶作用引发了元素向土壤深层迁移。

### 3.3 飞播种子丸粒化与未丸粒化土壤微生物特征

对8个样地的土壤样品提取DNA进行微生物特征分析,其中仅有采自2017年和2019年丸粒化播区的土样满足后续测序要求,这主要是因为其他样本中土壤细菌总量较少,而丸粒化包衣为微生物提供了充足的养分及合适的生长微环境,有助于土壤微生物的生长。

土壤微生物丰富度和多样性指数表征不同样品的菌群多样性和相对丰富度,其中Shannon和Simpson指数用于评估菌群多样性,ACE和Chao1指数用于评估菌群丰度,Coverage指数用于表征每个样本文库的覆盖率。由表4可知,相较于2019年丸粒化播区,2017年丸粒化播区土壤的Sobs指数、

Chao1指数和ACE指数均有所增加,分别提高了46.67%、43.73%和43.91%。这表明随着生长年限的延长,丸粒化播区内土壤微生物的物种数量、群落丰富度有所提高。

由图4可以看出,2019年播区土壤样品中Actinobacteria占绝对优势、Proteobacteria次之。2017年播区相对丰度最高的优势菌门是Fimicutes,其次Actinobacteria和Bacteroidetes。

## 4 讨论

### 4.1 飞播种子丸粒化对植被特征的影响

在飞播造林中,丸粒化技术作为一项植被快速恢复与重建的措施,在沙漠植被建设中发挥着重要作用<sup>[21]</sup>。对种子进行丸粒化包衣处理,能够有效地提高飞播植物出苗率和成活率<sup>[22]</sup>,使飞播植物能够在沙漠地区成功定居。本研究表明,4个飞播年内,

表4 不同飞播年份丸粒化播区的土壤微生物丰富度和多样性指数

Table 4 Soil microbial richness and diversity index in different aerial seeding years

年份	Sobs	Shannon	Simpson	ACE	Chao1	Coverage/%
2019	795	4.82	0.025	815.61	812.27	99.86
2017	1 166	5.15	0.025	1 172.24	1 168.97	99.94



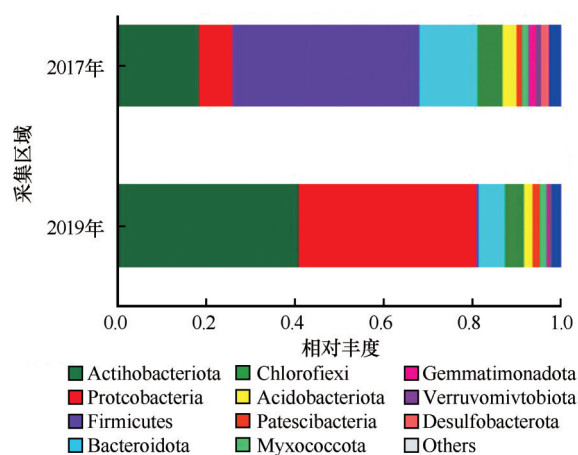


图4 不同飞播年份丸粒化播区水平微生物群落组成及相对丰度

Fig. 4 Percent of community abundance on Phylum level

丸粒化播区植物的生长状况均好于未丸粒化播区。2019年丸粒化播区内飞播植物除沙蒿外,花棒和沙拐枣均无成活率,可能与2019年飞播完成后的降水量差异有关;2018年丸粒化播区内植物生长差异逐渐显著,飞播植物已经成功在沙地中定居,同时也为原生物种的入侵提供了有利的生存空间,但是飞播区存在大量动物啃食及老鼠对飞播种子的咬食现状,导致飞播植物的存活和生长情况欠佳;到2017年,丸粒化播区内飞播植物生长差异十分显著,沙漠植物群落数量大幅度增加,丸粒化飞播植物能够在阿拉善的沙漠中迅速扩大定居范围并成为沙漠群落的优势种。因此,随着生长年限的延长,丸粒化播区沙漠植物群落的盖度、生物量等均有了不同程度提高,且均大于未丸粒化播区的增长幅度,这也进一步验证了丸粒化飞播植物能够在沙漠快速发芽生长的特性。随着植物种类的变化和植被高度、盖度的增加,沙地表面稳定性增加,即由流动沙丘逐渐变为半固定沙丘,最后变为固定沙丘,这样的生态环境将更适于植物的定居和繁殖。由此可见,采用丸粒化技术进行飞播有利于沙地退化植被的恢复与重建。

飞播区植被由人工干预到完全为原生植被的状态是一个比较漫长的过程。杨波等<sup>[23]</sup>研究发现退化羊草草地轻耙处理后恢复至原生植被需要30年。本研究表明,2017年丸粒化和未丸粒化播区灌木、半灌木和草本植物的成苗率增加略呈上升趋势,其中草本植物的成苗率更高,并且丸粒化播区的成苗率高于未丸粒化播区;2018年丸粒化播区内草本植物频度要远大于灌木、半灌木,除人为选择

飞播种子时,草本植物种子所占比例较大外,另一原因可能是阿拉善左旗沙漠的气候和环境更有利于草本植物的生长;由于2019年丸粒化播区内的飞播植被遭受动物的大量啃食破坏,因此不对该年份丸粒化播区物种的恢复情况进行详细讨论;但是2020年丸粒化播区内灌木盖度、高度、冠幅、地径、生物量等均出现了大幅度的增加,这是因为灌丛斑块导致水分的再分布和利用,使得灌木、半灌木能够捕获、利用更多的水分<sup>[24]</sup>,并形成正反馈,进而强化灌木、半灌木植物的生长优势<sup>[25]</sup>。从飞播植物的稳定程度来看,4个飞播年内草本植物的稳定性高于灌木、半灌木。经过4年的生长期,阿拉善左旗丸粒化播区飞播植物群落的盖度、高度、生物量等均有了不同程度增加,其中盖度和生物量的年增长分别为39.43%和168.93%,丸粒化播区内植物的生长幅度远远高于未丸粒化播区原生植被的生长幅度。由此可见,种子丸粒化技术在干旱沙漠区具有很好的适用性。

#### 4.2 飞播种子丸粒化对土壤水分养分的影响

大量研究表明,随着飞播荒漠植被生长时间的增加,沙面枯落物堆积,容重变小,沙漠土壤水分及养分条件得到改善<sup>[26-27]</sup>。本研究表明,土壤含水量在每个飞播年丸粒化和未丸粒化播区之间差异不明显。利用研究区周边气象站年降水资料进行降水量等值线插值,发现研究区内降水量由东南向西北递减,4个飞播区域年降水量在100~150 mm,其中2017、2019年播区及2018年丸粒化播区处于125~150 mm,2020年及2018年非丸粒化播区处于100~125 mm。2017年(第4生长年)丸粒化和未丸粒化播区土壤含水量较高,这可能是因为2017年播区样点位于研究区南面,由北向南样点区的降水量逐渐增加,加上年度降水差异等因素会极大地影响研究区表层土壤水分变化,较高的土壤含水量使得植被生长状况良好。植被与土壤是一个互馈的过程,随着植被生长年限的增加,植被盖度增大,有效降低了土壤风蚀,枯落物增加,生物过程加强,减缓流动沙丘移动速度,促进了表层土壤的成土过程<sup>[28-29]</sup>。植被生长初期,林分竞争激烈,植物对土壤养分的吸收大于凋落物分解及养分归还的速率,导致土壤全氮含量整体呈现下降的趋势,而到了植被恢复后期,土壤养分才得到提高<sup>[30]</sup>。土壤中的全磷含量主要受母质中矿物成分和有机质累积的影响,

所以全磷的含量随植被生长变化不明显,与肖华翠等<sup>[31]</sup>的结果相似。土壤含碳量丸粒化播区略高于未丸粒化播区,且随着恢复年限增加,土壤含碳量呈增长趋势,说明随着植被生长,凋落物的不断增加直接影响土壤有机碳的积累。

总体来说,阿拉善左旗腾格里沙漠飞播造林植被生长过程中,随着生长年限的增长,植被和土壤有着互相促进的作用,植被的生长固定了土壤,增强了土壤持水能力,增加了土壤有机质,改善了土壤理化性质,一定程度上遏制了土壤的沙漠化进程,同时植被的枯落物也对土壤肥力起到改善作用,从而又促进了植物的生长。然而土壤质量改善是一个长期的过程,飞播种子丸粒化技术的应用在植物生长初期为种子的萌发提供了一定的微环境,对周围整体土壤理化性质的影响并不明显。

### 4.3 飞播种子丸粒化对土壤微生物的影响

土壤微生物数量与土壤环境密切相关,是反映植被恢复过程中土壤状况和环境变化的重要指标<sup>[32]</sup>。本研究发现,在8块样地中,只有丸粒化播区2块样地所采集样品中检测出土壤微生物,说明种子丸粒化包衣给土壤微生物提供了充足的养分及合适的生长微环境。在丸粒化飞播后土壤恢复过程中,土壤微生物群落结构的多样性会发生改变。在植被稀疏的沙漠地区,风沙活动强烈,能够供给微生物可利用的有效资源十分有限,严重制约了微生物的生长<sup>[33]</sup>。在植被生长过程中,随着植物盖度和凋落物不断增加,增加了土壤有机质的输入,促进了微生物数量的增长<sup>[34]</sup>。2019年播区土壤样品中 *Actinobacteria* 占绝对优势,原因可能是丸粒化包衣给土壤微生物提供了充足的养分及合适的生长微环境,另外 *Actinobacteria* 是革兰氏阳性菌,还能降解纤维素和几丁质作为自身养分供给;*Proteobacteria* 丰度仅次于 *Actinobacteria*,是维持土壤生态稳定的一类细菌,也是细菌中种类最繁多、代谢最快速的一个门类,其相对丰度主要与土壤氮元素供应和能量循环呈正相关,种子丸粒化飞播后营养物质得到释放并不断消耗,这也导致了2019年播区土壤样品中氮元素含量相对高于2017年播区的土壤样品。2017年播区相对丰度最高的优势菌门是 *Fimicutes*,其次 *Actinobacteria*,再次 *Bacteroidetes*,主要是因为 *Fimicutes* 属于贫营养性微生物,在水分含量少、营养物质较少的土壤中所占丰度较大。随着

丸粒化种子飞播后土壤恢复时间的延长,土壤中氮等营养物质含量可能逐渐减少,导致2017年播区土壤相较于2019年播区土壤细菌门中 *Fimicutes* 的数量逐渐增多,同时 *Actinobacteria* 和 *Proteobacteria* 的丰度有所降低。此外,细菌门类不断增加,可能是植物和微生物经过时间积累后逐渐形成了协同作用,并促进沙漠土壤结构的变化(由流动沙丘逐渐变为半固定沙丘),进一步促进丸粒化飞播区的植物和土壤细菌的生长繁殖。由此可说明,随着丸粒化种子飞播后的土壤恢复时间增加,土壤中细菌群落组成更加丰富,优势菌群逐渐凸显,这也有利于沙漠植物的生长恢复,丸粒化种子飞播带来的效果得到体现。

多样性指数分析结果显示,2017年丸粒化飞播区土壤相比于2019年丸粒化播区土壤, *Sobs* 指数、*Chao1* 指数和 *ACE* 指数均有所增加。同时,比较两个飞播年份的植物群落变化可以看出,随着恢复年限的延长,植被密度、盖度和总生物量明显增加。因此,丸粒化种子飞播区土壤微生物丰富度和多样性的增加与植物生长状况有着密切的关系。此外,土壤微生物群落多样性越高,土壤生态系统就越稳定<sup>[35]</sup>,说明阿拉善左旗沙漠土壤环境得到一定的改善。

## 5 结论

飞播种子丸粒化技术应用后,丸粒化播区植被盖度及地上、地下和总生物量均显著高于未丸粒化播区;2017—2020年4个飞播年植被盖度、植物地上、地下生物量的总体变化随着生长年限的延长而呈现增加的趋势,从2019年播区开始显著增加。

飞播种子丸粒化技术,在短期内对土壤理化性质的改变作用不显著。丸粒化和未丸粒化播区,土壤含水量之间不存在明显的差异。随着恢复年限增加,土壤有机碳呈增加趋势,土壤全氮含量呈减少趋势,土壤全磷含量变化不大,因此对土壤理化性质的影响相对迟缓。

相较于2019年丸粒化播区,2017年丸粒化播区土壤微生物的物种数量、群落丰富度有所提高,说明丸粒化种子飞播对阿拉善左旗沙漠土壤环境具有一定的改善作用。

### 参考文献:

- [1] Le Houerou H N. Restoration and rehabilitation of arid and



- semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14: 3-14.
- [2] 《中国飞播造林四十年》编委会. 中国飞播造林四十年[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [3] 弓晓倩, 姚林杰, 张佳宁, 等. 毛乌素沙地不同飞播造林年限土壤真菌群落结构特征[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(1): 90-97.
- [4] 陈佳卉, 卜元坤, 苏少峰, 等. 油松飞播林灌木层主要物种间联结及其环境解释[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3512-3522.
- [5] 慕宗杰, 刘果厚, 桂荣, 等. 浑善达克沙地飞播区不同恢复阶段植物群落结构动态变化[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(4): 46-56.
- [6] Li X J, Li Y F, Xie T, et al. Recovery of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation with xerophytic shrubs in the Tengger Desert, North China[J]. *Catena*, 2022, 214: 106277.
- [7] Verrecchia E, Yair A, Kidron G J, et al. Physical properties of the psammophile cryptogamic crust and their consequences to the water regime of sandy soils, northwestern Negev Desert Israel[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 29: 427-437.
- [8] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 173-181.
- [9] 武智双. 内蒙古封山育林和飞播造林成效及其管理[J]. *内蒙古林业科技*, 2016, 42(3): 62-64.
- [10] 王文舒, 武志博, 刘宏义. 花棒种子成苗降雨量及丸粒化技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(10): 75-78.
- [11] 武志博, 刘宏义, 白莹, 等. 飞播沙拐枣成苗降雨量及基于该降雨量下的种子丸粒化技术探讨[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(10): 162-166.
- [12] 王东海. 种子包衣技术课题细化到工厂育苗和飞播技术探究[J]. *农业与技术*, 2014, 34(7): 98.
- [13] 康世勇, 夏素华, 李志忠, 等. 鄂尔多斯沙区飞播杨柴固沙技术的研究[J]. *中国沙漠*, 1998, 18(1): 57-63.
- [14] 雅洁, 朱振华, 董建林. 毛乌素沙地飞播后植被演替规律研究: 以内蒙古乌审旗为例[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2008(6): 1-4.
- [15] 刘庆福. 毛乌素沙地沙漠化演变、飞播恢复评估及其对生态系统服务的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.
- [16] 贺宇. 沙生种子萌发特性及沙地飞播成效研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [17] Liu Q F, Zhang Q, Jarvie S, et al. Ecosystem restoration through aerial seeding: interacting plant-soil microbiome effects on soil multifunctionality [J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32: 5334-5347.
- [18] 付华, 周志宇, 陈善科. 腾格里沙漠东南缘飞播区白沙蒿植被密度与土壤水分关系的研究[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 265-270.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 146-226.
- [20] Blau K, Casadevall L, Wolters B, et al. Soil texture-depending effects of doxycycline and streptomycin applied with manure on the bacterial community composition and resistome [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, 94(2): 1-11.
- [21] 欧成明, 毛培胜. 牧草种子包衣技术研究与进展[J]. *种子*, 2019, 38(11): 63-67.
- [22] 侯占峰, 陈利杰, 陈智. 牧草种子丸粒化包衣运动规律与参数优选研究[J]. *农机化研究*, 2021, 43(11): 184-191.
- [23] 杨波, 宝音陶格涛. 退化羊草草原轻耙处理后30年植物群落恢复演替规律研究[J]. *中国草地学报*, 2014, 36(2): 36-42.
- [24] 彭海英, 李小雁, 童绍玉. 内蒙古典型草原小叶锦鸡儿灌丛化对水分再分配和利用的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(9): 2256-2265.
- [25] 闫宝龙, 吕世杰, 王忠武, 等. 草地灌丛化成因及其对生态系统的影响研究进展[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(2): 95-101.
- [26] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 93-100.
- [27] 戴雅婷, 侯向阳, 同志坚, 等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(20): 6353-6364.
- [28] 肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变[J]. *中国沙漠*, 2003, 23(6): 2-8.
- [29] 赵晨光, 李慧瑛, 鱼腾飞, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(4): 1112-1121.
- [30] 张洋, 刘华, 王得祥, 等. 商洛地区不同林龄油松人工林土壤理化性质研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 82-89.
- [31] 肖华翠, 李靖雯, 夏允, 等. 中亚热带不同母质发育森林土壤磷组分特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 16-22.
- [32] 周虹, 刘雲祥. 青海共和盆地人工固沙植被恢复对土壤微生物数量的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(1): 178-184.
- [33] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 等. 流沙区不同立地条件下防护林土壤微生物多样性分析[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1430-1436.
- [34] Hossain M Z, Sugiyama S I. Relative importance of soil microbes and litter quality on decomposition and nitrogen cycling in grasslands[J]. *Ecological Research*, 2020, 35(5): 912-924.
- [35] Chaer G, Fernandes M, Myrold D, et al. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 58(2): 414-424.

## Effects of seed pelleting in aerial seeding on vegetation and soil

Jia Bing<sup>1,2</sup>, Si Jianhua<sup>1</sup>, Wu Zhibo<sup>3</sup>, Qi Shi<sup>1</sup>, Ma Lili<sup>4</sup>, Zhu Xinglin<sup>1,2</sup>, Qin Jie<sup>1,2</sup>, Shi Funian<sup>5</sup>

(1. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Alxa Development Planning Center of Ecological Industry, Alxa Left Banner 750300, Inner Mongolia, China; 4. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 5. Alxa Right Banner Forestry and Grassland Bureau, Alxa Right Banner 737300, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** To illustrate the impact of seed pelleting technology on vegetation and soil, vegetation and soil samples were collected from 8 sampling sites in four aerial sowing years from 2017 to 2020, including 4 seed pelleted areas and 4 non-pelleted areas, and comparative analysis of vegetation growth, soil moisture, nutrients and soil microbial changes was conducted. Results show that: (1) The annual growth rates of plant coverage, aboveground biomass, underground biomass and total biomass were 13.72%, 395.88%, 127.97% and 526.16%, respectively. The increment of every index in the non-pelletized area was obviously lower than that in the pelletized area. (2) There was no significant difference in soil water content and soil nutrients between pelleted and non-pelleted sown areas in each year of aerial seeding, and soil organic carbon increased and soil total nitrogen decreased with the increase of growing years, the total phosphorus content of the soil varied between 208.67–222.5 and 192.83–213.33 mg·kg<sup>-1</sup> in the pelletized and non-pelletized areas under different years of aerial sowing. (3) Soil DNA was extracted from 8 plots for microbial community analysis, and only the 2017 and 2019 samples from pelleted sown areas met the requirements for follow-up sequencing. Compared with 2019, the Simpson index of pelleted soil in 2017 decreased slightly, while Sobs Index, Chao1 Index and ACE index increased significantly by 46.67%, 43.73% and 43.91%, respectively. In general, the pelleting of air-seeded seeds could improve the soil environment of the Alxa Left Banner Desert.

**Key words:** aerial seeding; seed pelleting; vegetation; soil; soil microorganism; Tengger Desert