

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-11

陕北毛乌素沙地生态修复效果分析

朱 刚

(中国煤炭地质总局航测遥感局, 陕西 西安 710199)

摘要:应用“3S”技术与土壤化学方法,对毛乌素沙地榆林市境内区域的沙质荒漠化土地进行了近 45 年来变化研究与生态修复效果分析,研究结果表明:研究区土地的沙质荒漠化强度以轻度、中度为主,治理方式以人工修复为主;1975—2019 年沙质荒漠化的分布面积与强度呈现先快速发展而后逆转的变化特征。其中,1975—2007 年沙质荒漠化的发展与过度放牧、荒地开垦及矿产资源开发等人类活动及强度密切相关。2007—2019 年的逆转与生态调控政策及治理工程的实施密切相关。人工修复地区的土壤养分含量优于自然修复地区,在同等背景的自然修复条件下,不同成因的沙质荒漠化土地土壤养分含量有一定区别。采用人工修复与自然修复相结合的方式,以人工修复促进植被自然修复能力,是研究区有效的生态修复方式。

关键词:沙质荒漠化土地;遥感;土壤养分;生态修复

中图分类号: P954

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)06-0090-08

Analysis on ecological restored effect of Mu Us sandy land in northern Shaanxi

ZHU Gang

(Aerial Photogrammetry and Remote Sensing Bureau of China National Administration of
Coal Geology, Xi'an, Shaanxi 710199, China)

Abstract: The "3S" technology and soil chemical methods were used to study the change and ecological restored effect of sandy desertification land in Yulin City of Mu Us sandy land during the past 45 years. The results show that: the intensity of sandy desertification land in the study area was mainly mild and moderate, and the restored mode was mainly artificial restoration; the distributed area and the intensity of sandy desertification land from 1975 to 2019 showed the desertification developed rapidly and then deteriorated, the development of sandy desertification from 1975 to 2007 was closely related to human activities such as overgrazing, wasteland reclamation and mineral resources development, and the reversal from 2007 to 2019 was closely related to the implementation of ecological control policies and control projects; the soil nutrient content of the artificial restored area was better than the natural restored area, the different causes of sandy desertification land was very different under the same natural restored conditions; combined the artificial restored method and the natural restored method, artificial vegetation construction is proved to be a effective way to promote natural vegetation restoring and ecological restoration in the study area.

Keywords: sandy desertification land; remote sensing; soil nutrient; ecological restored

0 引言

土地的沙质荒漠化问题是我国主要的生态问题之

一,北方地区冬春季频发的沙尘天气与此密切相关,严重影响着我国的生态安全^[1-3]。为遏制沙质荒漠化的发展以及修复沙质荒漠化地区的生态环境,国家对沙质荒

收稿日期: 2021-02-28; 修订日期: 2021-09-29

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“全国冰川及荒漠化遥感地质调查”(DD20190515)

作者简介: 朱 刚(1980-),男,陕西渭南人,高级工程师,主要从事资源环境遥感等相关工作。E-mail: zhugang-2005@163.com

漠化的分布范围、发展趋势进行了长期监控。期间众多学者对我国沙质荒漠化的成因条件、演化机制、分布范围、发展态势及修复措施与建议等进行了大量的研究^[4-8]。从 20 世纪 70 年代末开始,国家层面上先后实施了三北防护林工程、退耕还林等生态治理工程及调控政策,产生的生态效应于 21 世纪初期开始显现,我国沙质荒漠化的发展态势基本得到了控制^[9]。对具有可修复条件的沙质荒漠化土地进行生态修复是现阶段国家生态文明建设的战略需求。目前,沙质荒漠化土地的生态修复主要采用人工修复与自然修复两种措施^[10-11]。从效果来看,受不同地质成因、气候条件与人类活动方式的影响,在同一区域的沙质荒漠化土地内部以及不同区域的沙质荒漠化土地之间的修复效果不一致^[12-14]。为使沙质荒漠化土地的生态修复更具针对性,达到事半功倍的效果,文中选取毛乌素沙地东部的陕西省榆林市境内区域作为研究区,应用“3S”技术研究了近 45 年来不同人类干预方式下沙质荒漠化土地的分布现状与变化特征,同时对不同修复措施下沙质荒漠化土地的土壤养分差异进行了对比分析,旨在为沙质荒漠化土地的生态修复提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地东南部的陕北境内区域,涉及榆林市的榆阳区、神木市、横山区、定边县、靖边县、府谷县及佳县等县区,总面积约 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。为半干旱气候,年均降水量 250~440 mm。地理位置处于毛乌素沙地与陕北黄土高原的过渡地带,受风蚀与水蚀共同作用的影响,导致风沙活动与水土流失强烈,生态环境较为脆弱。植被类型单调,以沙蒿、沙柳、柠条等耐旱的植物为主。矿产资源储量丰富,是我国煤炭资源和油气资源的重要产区。近几十年来由于矿产资源的持续大规模开采以及过度放牧、荒草地开垦等一系列人类活动的强烈干预,导致研究区的土地沙质荒漠化问题十分严重。沙质荒漠化的成因类型有两种,一种是覆沙黄土丘陵地区发生的沙质荒漠化,沙源物质主要为更新世砂质黄土与中生代砒砂岩的残坡积物;另一种是风沙滩地地区发生的沙质荒漠化,沙源物质主要为晚更新世萨拉乌苏组冲湖积砂。从 20 世纪 60 年代开始,通过兴建防风林带、引水拉沙、引洪淤地等措施进行治理,先后开展了三年植绿大行动、林业建设五年大提升行动,实施了三北防护林、退耕还林等国家重点工程,榆林市已在沙地腹地建立了万亩以上的成片林 165 处,建成了总

长 1 500 km 的 4 条大型防护林带,沙地治理率达 90% 以上,实现了区域性逆转。

1.2 研究方法

1.2.1 卫星数据源的选取与处理

为反映人类不同干预方式对沙质荒漠化发展或逆转的影响,将研究区人类活动对沙质荒漠化过程有明显影响的重大事件发生的时间节点作为多期遥感监测数据选择的依据。重大事件主要是指国家生态调控政策的实施、区域经济社会发展方式的变化以及人口剧烈变化等。因此,采用的卫星数据时相与类型分别如下:应用 1975 年 MSS 数据反映研究区煤炭资源大规模开采前沙质荒漠化分布的本底状态,空间分辨率 79 m;应用 2000 年 TM 数据反映煤炭资源开采规模扩大、退耕(牧)还林(草)政策实施初期的沙质荒漠化分布状况,空间分辨率 30 m;应用 2007 年 TM 数据反映煤炭资源持续大规模开采并对生态环境产生一定影响情况下沙质荒漠化分布状况,空间分辨率 30 m;应用 2019 年的 Landsat-8 数据反映目前沙质荒漠化的分布现状,空间分辨率 30 m。四期数据的季相在 5—10 月之间,该时间段植被生长茂盛,反映的沙质荒漠化信息真实、客观,满足沙质荒漠化遥感解译的要求。

数据获取后对卫星数据进行几何校正、波段融合等处理,制作研究区四期卫星影像图。

1.2.2 沙质荒漠化现状与变化信息的获取

首先,建立不同程度的沙质荒漠化遥感解译标志,程度分级参照《联合国关于发生严重干旱和荒漠化的国家特别是在非洲防治荒漠化的公约(CCD)》^[15]、《沙化土地监测技术规程(GB/T 24255-2009)》^[16]的分类标准,将研究区的沙质荒漠化土地分为轻度、中度和重度三个级别^[17-18](表 1);其次,根据建立的遥感解译标志,在 ArcGIS 软件支持下,采用人机交互式解译的方法对研究区不同程度的沙质荒漠化信息进行提取,遥感解译精度为 1:25 万比例尺,即单个图斑面积不小于 4 mm^2 ;第三,解译工作完成后,通过野外调查与验证,对存在问题与疑义的图斑进行修改,最终形成研究区 1975 年、2000 年、2007 年、2019 年四期沙质荒漠化分布情况解译成果并对四期分布面积进行统计(图 1)。

1.2.3 沙质荒漠化土地土壤取样测试的方法

土壤养分条件的差异可在一定程度上反映沙质荒漠化土地的可修复程度或已修复效果。为反映不同修复措施下沙化土地土壤养分条件的差别,选取不同强度的沙化土地进行取样测试,对比不同强度、不同治理方式、不同地质成因条件下土壤中养分的区别,以便分析

表 1 研究区沙质荒漠化分级标准及遥感解译标志

Table 1 Classification standards and remote sensing interpretation marks of sandy desertification in the study area

沙质荒漠化程度	风积、风蚀地表形态 占该地面积/%	植被覆盖度/%	地表景观综合特征	遥感解译标志
轻度沙质荒漠化	<10	50 ~ 30	风沙活动较明显,原生地表植被已开始被破坏,与沙生植被混杂分布,出现片状、点状沙地,多为固定的灌丛沙堆,农田适耕性下降	呈淡绿色、褐色色彩,具有白色、粉色斑点状影纹;不规则斑块状分布;内部纹理均一,植被覆盖度较高,与周边地物差异明显,边界清晰,解译标志清晰
中度沙质荒漠化	10 ~ 30	30 ~ 10	风沙活动频繁,原生地表破坏较大,半固定沙丘与滩地相间分布,丘间和滩地一般较开阔,多分布灌草结合的群落;耕地中有明显的风蚀洼地、残丘,地表植被稀少	呈淡绿色、褐色色彩,具有稀疏的白色斑片状影纹;不规则斑块状分布,内部沙丘形态明显;植被覆盖度不高,与周边地物色彩差异较明显,解译标志清晰
重度沙质荒漠化	≥30	≤10	风沙活动强烈,密集的流动沙丘和风蚀地表,沙生植被稀少或基本没有植被生长	呈白色、粉色色彩,具白色波状或蜂窝状影纹;沙丘形态明显,流动性强,植被覆盖度较低或无植被覆盖;高大沙丘或沙丘链间具有斑点状绿色阴影,边界清晰可辨,解译标志清晰

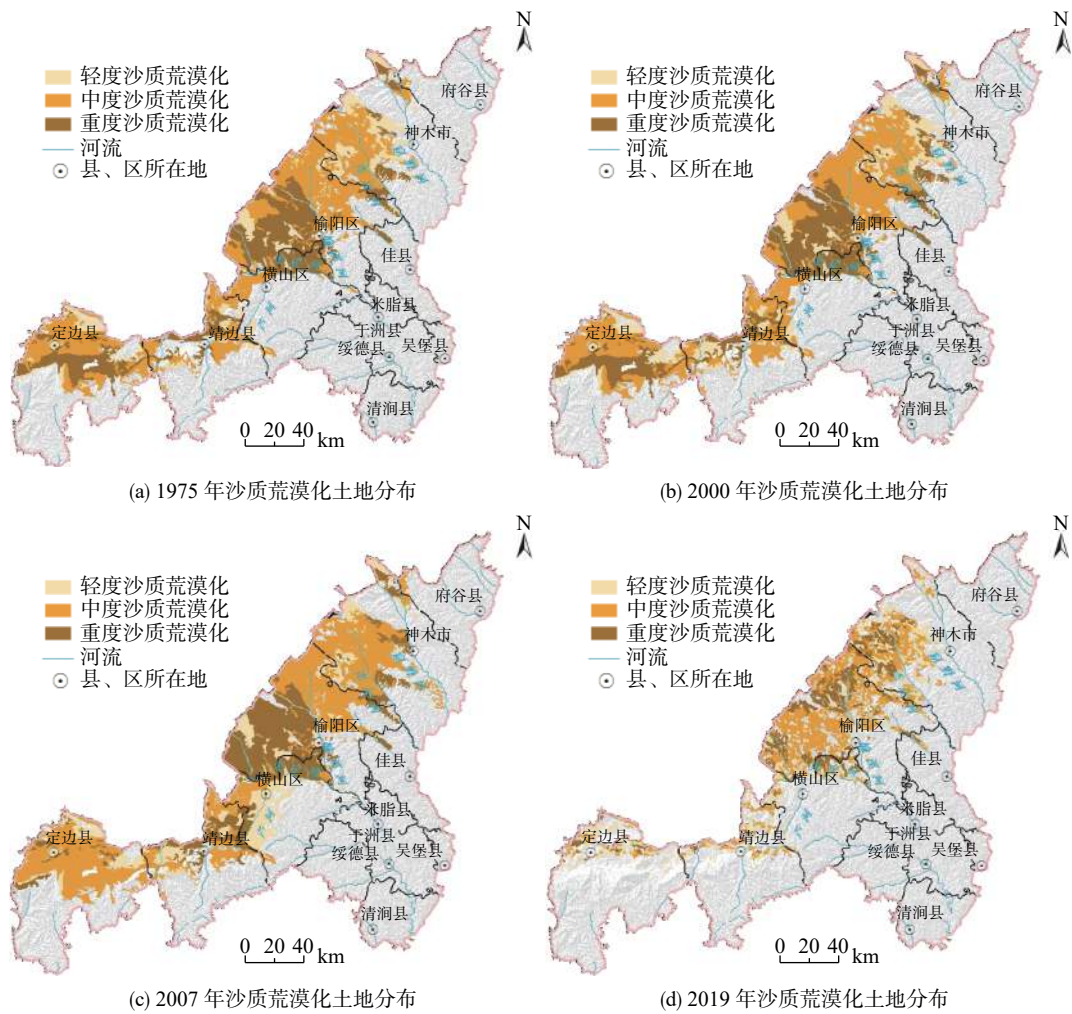


图 1 研究区不同时期沙质荒漠化土地分布图

Fig. 1 Distribution map of sandy desertification in the study area in different years

适宜该地区沙质荒漠化土地的生态修复方式。

取样点的布置: 首先, 在不同地质成因地区, 对轻度、中度、重度三种程度的沙质荒漠化分布地区设置取样点; 其次, 在不同修复措施区域, 按照人工修复、自然修复两种修复方式, 对轻度、中度、重度三种程度的沙质荒漠化地区设置取样点; 第三, 在黄土丘陵、风沙滩地地区的耕地地区, 以及毛乌素沙地特有的自然植被群落分布地区——臭柏自然保护区设置取样点作为背景值(图 2)。

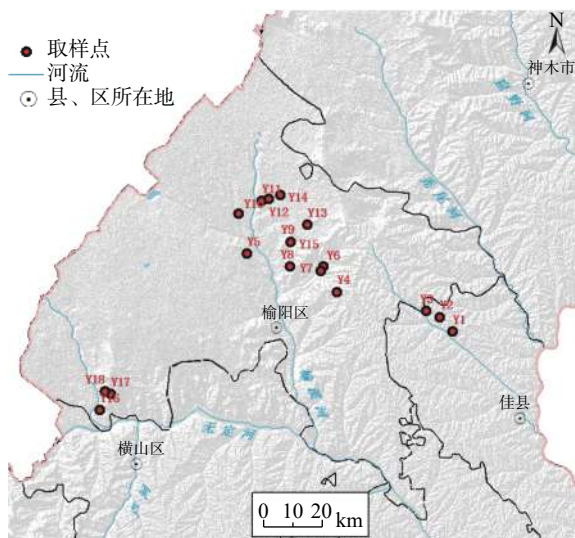


图2 研究区取样点分布图

Fig. 2 Distributed map of sampling points in the study area

土壤取样的方法: 每个采样点的取土深度相同, 采样量应均匀一致, 土样上层与下层比例要相同。采集土样前, 应先去除地表浮土, 采用手工挖掘坑(如探坑)的方法, 取 0~20 cm 耕作层土壤混合样, 剔除杂草、树根、砾石等杂物, 采样完成后将底土和表土分别按原层回填。初步采集的混合样采用四分法保留 1~2 kg 样品, 待土壤样品自然风干后取 500 g 装入布袋, 内外均应附标签, 标明采样编号、名称、采样深度、采样地点、日期、采集人等信息。

土壤样品测试指标: 选取土壤全氮、总磷、全钾、有机质等指标进行测试, 依据的标准分别为: 全氮依据 HJ 717-2014^[19]; 总磷依据 LY/T 1232-2015^[20]; 全钾依据 LY/T 1234-2015^[21]; 有机质依据 NY/T 11121.6-2006^[22]。

2 结果与分析

2.1 沙质荒漠化土地的分布现状与生态修复状况

根据遥感解译结果, 研究区 2019 年沙质荒漠化土地面积 8 208.28 km², 其中, 轻度沙质荒漠化土地面积 2 423.31 km², 中度沙质荒漠化土地面积 3 929.08 km², 重度沙质荒漠化土地面积 1 855.88 km², 以中度与轻度沙质荒漠化为主。沙质荒漠化分布的主体区域为无定河北部、榆溪河与秃尾河上游的风沙滩地地区, 覆沙黄土丘陵地区的沙质荒漠化主要分布于芦河西部、无定河南部、榆溪河与秃尾河下游地区。沙质荒漠化程度的强弱与地质成因条件的关系不密切, 不同程度的沙质荒漠化在两种成因条件地区均有分布。

从修复方式上来看, 轻度与中度沙质荒漠化分布地

区的人工修复程度高, 修复方式为人工种植沙蒿、沙柳、柠条等沙生植被, 通过人工植被建设改良区域生态条件, 促进自然植被群落恢复。同时, 工程治理也是近年来沙质荒漠化土地治理经常采用的方式, 在榆阳区北部的风沙滩地地区, 对原来难以耕作的沙质荒漠化土地进行了平整, 开辟了大量的耕地, 在一定程度上减小了沙化土地的分布面积。但在毛乌素沙地腹地的重度沙质荒漠化分布地区, 由于风沙活动强烈, 地表以流动性强的高大沙丘为主, 目前仍以自然修复为主。

2.2 1975—2019 年沙质荒漠化土地的变化特征分析

2.2.1 气候变化影响分析

气候条件对沙质荒漠化的影响主要体现在对植被生长以及其生长环境的影响。湿润多雨的气候条件有利于植被生长, 可有效提高地表植被覆盖度, 从而降低沙质荒漠化的分布面积与强度。根据研究区气象站点监测结果, 近 45 年来, 研究区的气温与降水均呈小幅度增加的趋势, 气温升高引起的蒸发量增加抵消了降水量增加产生的效应。因此, 气候条件的变化对研究区沙质荒漠化的变化影响较弱^[23]。

2.2.2 水文条件影响分析

在半干旱地区, 水文条件对沙质荒漠化的发生与逆转有一定的影响。研究区年均降水量 250~440 mm, 植被种类以耐旱的沙柳、柠条、沙蒿等为主, 天然降水条件能够满足该地区植被的生长。研究区的主要地下水含水岩组为黄土下部的白垩系洛河组砂岩, 埋藏较深, 植被生长较难利用^[24], 但由于黄土的孔隙度高、保水性较强, 天然降水赋存于黄土孔隙中, 黄土地区植被生长的水分需求主要来源于黄土中赋存的孔隙水; 而风沙滩地地区浅层地下水的含水岩组为第四系上更新统萨拉乌苏组冲湖积砂, 在研究区的风沙滩地地区广泛分布, 埋藏浅、水量大, 目前在沙地内部丘间地低洼处, 有大范围出露形成地表积水, 因此, 研究区的水文条件较优越, 有利于植被恢复。

2.2.3 人类活动影响分析

研究区 20 世纪 80 年代以前的人类活动方式主要为农牧活动, 对沙质荒漠化的影响为过度放牧、荒地开垦等活动方式。1975 年的监测数据反映了沙质荒漠化分布的本底状态, 该年研究区沙质荒漠化土地面积 13 624.17 km², 以中度与重度沙质荒漠化为主。

研究区的矿产资源大规模开发始于 20 世纪 90 年代, 至 90 年代末期具一定规模。该时间段内煤矿开采的规模与强度相对较小, 而过度放牧、荒地开垦等活动

强烈。根据遥感监测结果,1975—2000 年研究区沙质荒漠化土地面积与强度均出现大幅度发展,沙质荒漠化的分布面积增加了 571.76 km²,各种程度的沙质荒漠化面积均增加,至 2000 年研究区的沙质荒漠化土地面积达到 14 195.93 km²。与此同时,北方沙质荒漠化的快速发展对我国生态安全产生了严重影响,沙质荒漠化问题已引起国家的重视。为遏制沙质荒漠化的发展,国家先后在 20 世纪 70 年代开始建设三北防护林工程、20 世纪 90 年代末期开始实施退耕还林政策,研究区正是这两项生态调控政策与工程实施的主体区域。

2000—2007 年,尽管煤炭开采规模进一步扩大,但是由于退耕还林政策的实施,研究区的农牧活动强度较 20 世纪明显减弱。该时期沙质荒漠化仍呈现一定的发展态势,分布面积增加了 742.4 km²,至 2007 年沙质荒漠化土地分布面积为 14 938.33 km²,其中重度沙质荒漠化的面积减小,而中度与轻度沙质荒漠化的面积小幅度增加。

随着三北防护林工程建设、退耕还林政策等生态工程与调控措施发挥作用,尤其是十八大以来,研究区矿产资源开发活动与矿山生态环境修复两方面并重,沙质荒漠化土地出现明显逆转,面积与强度均大幅度减弱,2007—2019 年面积减小了 6 730.05 km²,各种程度的沙质荒漠化面积均大幅度减小(表 2)。

表 2 研究区沙质荒漠化土地面积四期统计结果

Table 2 The statistical of sandy desertification land area in four periods

时间/年	轻度沙质荒漠化/km ²	中度沙质荒漠化/km ²	重度沙质荒漠化/km ²	合计/km ²
1975	2 415.01	6 559.23	4 649.93	13 624.17
2000	2 617.75	6 756.61	4 821.57	14 195.93
2007	2 930.11	7 267.51	4 740.71	14 938.33
2019	2 423.31	3 929.08	1 855.88	8 208.28

2.3 沙质荒漠化土地的土壤养分条件分析

通过分析测试结果,沙质荒漠化地区的土壤养分存在以下特征:自然修复条件下,风沙滩地区的土壤养分值高于覆沙黄土丘陵区;自然修复与人工修复两种不同的治理方式下,人工修复区的土壤养分微弱高于自然修复地区;黄土梁面的耕作土壤养分值显著高于沙化地区土壤的养分值,而在滩地地区耕作土壤的养分值与沙化地区的土壤养分值基本无差别;臭柏保护区的沙化土壤养分值与一般沙化地区的土壤养分值基本一致(表 3、图 3)。

根据测试结果可得出以下结论,风沙滩地区的沙质荒漠化土地的土壤养分条件优于覆沙黄土丘陵地区的沙质荒漠化土地,并且与风沙滩地区经过人工施肥、培育的耕作土壤的养分条件差别不明显,与天然生长的毛乌素沙地特有的臭柏分布区域的养分值基本一

表 3 研究区土壤养分测试结果

Table 3 Testing results of soil nutrients in the study area

样品编号	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	全养分			沙化土地类型	采样点地貌、恢复治理方式
		全N/(g·kg ⁻¹)	总P/(g·kg ⁻¹)	全K/(g·kg ⁻¹)		
Y1	2.25	0.20	0.21	23.59	轻度	覆沙黄土丘陵区,人工修复
Y2	2.34	0.11	0.20	23.48	中度	覆沙黄土丘陵区,自然修复
Y3	3.39	0.13	0.21	23.78	重度	覆沙黄土丘陵区,自然修复
Y4	4.39	0.20	0.23	23.43	重度	覆沙黄土丘陵区,自然修复
Y5	12.8	0.47	0.53	20.72	耕地	黄土梁面,旱地,背景值
Y6	3.64	0.30	0.29	23.48	中度	覆沙黄土丘陵区,自然修复
Y7	4.94	0.15	0.35	22.56	轻度	覆沙黄土丘陵区,自然修复
Y8	7.27	0.37	0.34	21.71	轻度	风沙滩地区,人工修复
Y9	1.73	0.09	0.18	24.20	中度	风沙滩地区,人工修复
Y10	4.30	0.20	0.30	23.45	轻度	风沙滩地区,人工修复
Y11	3.90	0.11	0.25	22.93	重度	风沙滩地区,自然修复
Y12	4.40	0.17	0.21	23.64	中度	风沙滩地区,自然修复
Y13	4.21	0.22	0.22	23.55	耕地	风沙滩地区,背景值
Y14	2.11	0.11	0.22	24.06	轻度	风沙滩地区,自然修复
Y15	1.18	0.12	0.20	22.54	轻度	风沙滩地区,臭柏保护区,背景值
Y16	0.90	0.11	0.27	23.04	重度	风沙滩地区,自然修复
Y17	4.54	0.26	0.29	22.77	轻度	风沙滩地区,自然修复
Y18	1.62	0.09	0.22	23.28	中度	风沙滩地区,自然修复

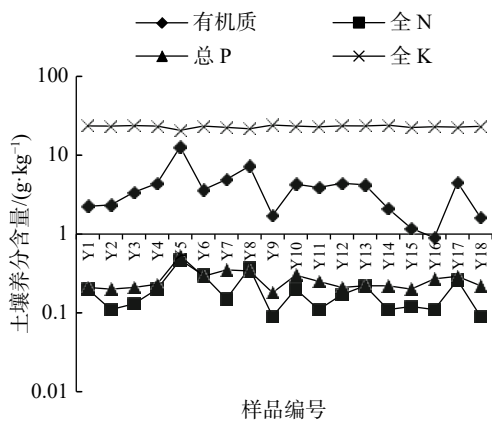


图3 不同土壤养分含量对比曲线图

Fig. 3 Comparison of different soil nutrient contents

致,表明在自然修复的条件下,风沙滩地地区的土壤养分条件更有利于植被的生长。人工修复区沙质荒漠化土地的土壤养分值优于自然修复区,表明人为干预能明显改良土壤养分条件,促进自然植被生长。

文中仅从土壤养分条件的差异来反映沙质荒漠化土地的修复效果或可修复程度有一定的局限性,沙质荒漠化土地的生态修复是多种要素共同作用的结果,但在区域水文条件、气候条件满足植被恢复需求的情况下,对于生物生产力低下的沙地地区而言,土壤肥力水平可作为沙质荒漠化土地的可修复性分析或修复效果评价的指标之一^[25]。

3 结论

(1)研究区的沙质荒漠化土地的强度以中度和轻度为主,生态修复方式为人工修复与自然修复两种方式。沙质荒漠化土地的分布强度与生态修复方式、修复力度密切相关,现有的中度、轻度沙质荒漠化土地分布地区基本上为人工修复的地区,而重度沙质荒漠化地区由于风沙活动强烈,人工植被建设较困难,目前以自然修复为主。

(2)近45年来沙质荒漠化的分布范围与强度呈现先增强后减弱的变化特征,与研究区人类活动方式变化的吻合度较高。近45年来研究区的气候与水文条件变化对沙质荒漠化的变化影响较弱,导致沙质荒漠化变化的主要原因是人类活动方式与强度的变化。当人类活动对自然环境的干扰强烈时,沙质荒漠化呈现发展的特征,2000年以前研究区沙质荒漠化的扩张与农牧活动、矿产资源开发等活动密切相关;当人类活动方式以生态修复为主时,沙质荒漠化呈现逆转的特征,在退耕还林政策实施、三北防护林建设、矿山地质环境生态修复等

生态调控政策、生态修复工程实施后,沙质荒漠化的发展态势得到了有效遏制。

(3)土壤养分测试结果表明人工修复地区的土壤养分含量优于自然修复地区,在同等背景的自然修复条件下,不同地质成因的沙质荒漠化土地土壤养分含量有一定区别。以植被恢复为主的生态修复工作能改良沙质荒漠化土地的土壤养分条件,较好的土壤养分条件也能促进植被恢复,进而有效降低沙质荒漠化的强度。在毛乌素沙地采用人工修复与自然修复相结合的方式,以人工植被建设带动区域土壤条件改变,促进植被自然修复,是研究区有效的生态修复方式。

(4)尽管研究区的沙质荒漠化土地的生态修复工作取得了显著进步,但处于毛乌素沙地腹地的重度沙质荒漠化地区生态修复程度较低,应加强该区域的生态修复工作。

参考文献 (References) :

- [1] 岳乐平,杨利荣,李智佩,等.阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴[J].第四纪研究,2004,24(3): 311-317. [YUE Leping, YANG Lirong, LI Zhipai, et al. Lacustrine deposit in the alxa plateau and the sand-dust storm in northern China [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3): 311-317. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王涛,吴薇,薛炯,等.中国北方沙漠化土地时空演变分析[J].中国沙漠,2003,23(3): 230-235. [WANG Tao, WU Wei, XUE Xian, et al. Time-space evolution of desertification land in northern China [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(3): 230-235. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 高会军,姜琦刚,霍晓斌.中国北方沙漠化土地动态变化遥感分析[J].灾害学,2005,20(3): 36-40. [GAO Huijun, JIANG Qigang, HUO Xiaobin. Remote sensing analysis on dynamic change of sandy desertification land in North China [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(3): 36-40. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 朱震达.中国土地荒漠化的概念、成因与防治[J].第四纪研究,1998,18(2): 145-155. [ZHU Zhenda. Concept, cause and control of desertification in China [J]. Quaternary Sciences, 1998, 18(2): 145-155. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 董光荣,吴波,慈龙骏.我国荒漠化现状、成因与防治对策[J].中国沙漠,1999,19(4): 395-398. [DONG Guangrong, WU Bo, CI Longjun. Present situation, cause and control way of desertification in China [J]. Journal of Desert Research, 1999, 19(4): 395-398. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨晓晖,张克斌,慈龙骏.中国荒漠化评价的现状、问题

- 及其解决途径 [J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 22–28. [YANG Xiaohui, ZHANG Kebin, CI Longjun. Desertification assessment in China: The state-of-art, problems and solution measures [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1): 22–28. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 高会军, 姜琦刚. 基于遥感技术的中国北方沙漠及沙质荒漠化土地区划研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 68–72. [GAO Huijun, JIANG Qigang. Zonation of desert and sandy desertification land in North China based on remote sensing technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 68–72. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 李鑫. 黄土高原北部风沙区土地沙漠化问题及防治对策 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 133–137. [LI Xin. Land desertification of the northern loess plateau in China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(1): 133–137. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王涛, 薛娟, 吴薇, 等. 中国北方沙漠化土地防治区划(纲要) [J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 816–822. [WANG Tao, XUE Xian, WU Wei, et al. Regionalization of desertification lands in north of China: A program [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 816–822. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨洪晓, 卢琦, 吴波, 等. 青海共和盆地沙化土地生态修复效果的研究 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 7–12. [YANG Hongxiao, LU Qi, WU Bo, et al. Ecological restoration in alpine sandy lands of Gonghe basin, Qinghai Province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 7–12. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李娜, 颜长珍. 毛乌素沙地现代人为活动的生态环境效应研究进展 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 487–492. [LI Na, YAN Changzhen. Research progress on eco-environmental effects of modern human activities in the Mu Us sandy land, China [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 487–492. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张雷, 洪光宇, 李卓凡, 等. 基于层次分析法的毛乌素沙地 3 种造林模式恢复成效评价 [J]. 林业资源管理, 2017(6): 108–112. [ZHANG Lei, HONG Guangyu, LI Zhuofan, et al. Assessment of three kinds of reforestation models recovery effect in Mu Us sandy land based on analytical hierarchy process [J]. Forest Resources Management, 2017(6): 108–112. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨梅焕, 曹明明, 朱志梅. 毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中植被的退化和稳定性 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 10–15. [YANG Meihuan, CAO Mingming, ZHU Zhimei. Vegetation degradation and its stability in desertification at southeastern edge of Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 10–15. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴晓旭, 邹学勇. 基于 3S 的毛乌素沙地腹地景观格局演变及其驱动力分析: 以内蒙古乌审旗为例 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 763–769. [WU Xiaoxu, ZOU Xueyong. Analysis of landscape pattern change and its driving factors based on 3S technology: A case study in uxin banner of Inner Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 763–769. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 中华人民共和国林业部防治荒漠化办公室. 联合国关于发生严重干旱和荒漠化的国家特别是在非洲防治荒漠化的公约[S]. 北京: 中国林业出版社, 1994. [Desertification control office of the Ministry of forestry of the people's Republic of China. United Nations convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification particularly in Africa[S]. Beijing: China Forestry Press, 1994. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国林业局. 沙化土地监测技术规程: GB/T 24255-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [Forestry Administration of the people's Republic of China. Technical specification for desertification land monitoring: GB/T 24255-2009 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 申元村, 王秀红, 丛日春, 等. 中国沙漠、戈壁生态地理区划研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 1–13. [SHEN Yuancun, WANG Xiuhong, CONG Richun, et al. Ecogeographical zoning of deserts and Gobi in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 1–13. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘淑珍, 柴宗新, 范建容. 中国土地荒漠化分类系统探讨 [J]. 中国沙漠, 2000, 20(1): 35–39. [LIU Shuzhen, CHAI Zongxin, FAN Jianrong. Discussion on classification system of land desertification in China [J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(1): 35–39. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 中华人民共和国环境保护部. 土壤质量-全氮的测定-凯氏法: HJ 717-2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014. [Ministry of environmental protection of the people's Republic of China. Soil quality –Determination of total nitrogen –Modified Kjeldahl method: HJ 717-2014 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 中华人民共和国林业局. 森林土壤磷的测定: LY/T 1232-2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [Forestry Administration of the people's Republic of China. Phosphorous determination methods of forest soils: LY/T 1232-2015 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese with English abstract)]

- [21] 中华人民共和国林业局.森林土壤钾的测定: LY/T 1234-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. [Forestry Administration of the people's Republic of China. Potassium determination methods of forest soils: LY/T 1234-2015 [S]. Beijing: China Standards Press,2015. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 中华人民共和国农业部.土壤有机质的测定: NY/T11121.6-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [Ministry of Agriculture of the people's Republic of China. Method for determination of soil organic matter: NY/T11121.6-2006 [S]. Beijing: China Standards Press,2006. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 任朝霞, 杨达源. 近50a西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响 [J] . [干旱区资源与环境](#), 2008, 22(4): 91 – 95. [REN Zhaoxia, YANG Dayuan. Climate change and surface runoff change impact on desertification in the arid area of northwest China in recent 50 years [J] . [Journal of Arid Land Resources and Environment](#), 2008, 22(4): 91 – 95. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王文科, 尹红美, 黄金廷, 等. 基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量 [J] . [水文地质工程地质](#), 2021, 48(4): 1 – 6. [WANG Wenke, YIN Hongmei, HUANG Jinting, et al. Estimation of groundwater evaporation based on lysimeter experiment and analytical solution in the Mu Us sandy land [J] . [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2021, 48(4): 1 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 郝启勇. 山东黄河北矿区土壤盐渍化特征分析 [J] . [中国地质灾害与防治学报](#), 2021, 32(1): 65 – 69. [HAO Qiyong. Soil salinization characteristics in Huanghebei mining area [J] . [The Chinese Journal of Geological Hazard and Control](#), 2021, 32(1): 65 – 69. (in Chinese with English abstract)]