

# 风沙区采煤塌陷对沙质地貌及植被生境的影响

由 洋<sup>1</sup>, 田 鹏<sup>2</sup>, 杨雯锦<sup>3</sup>, 胡 玥<sup>3</sup>, 张梦琦<sup>3</sup>, 申卫博<sup>3,4</sup>, 赵国平<sup>5,6</sup>

(1.陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 西安 710075; 2.西北农林科技大学

化学与药学院, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院 水利部

水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 5.陕西省林业科学院

黄土高原水土保持与生态修复国家林业局重点实验室, 西安 710082; 6.陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000)

**摘 要:**为了探究风沙区采煤塌陷引起的“二次荒漠化”问题与治理对策,通过野外分区调查及统计分析,对塌陷区塌陷边缘、塌陷中部及塌陷盆地引发的塌陷裂缝变化、植被位移及倾斜、干沙层及风蚀/风积情况进行了详细的研究。结果表明:塌陷边缘形成的裂缝宽度、密度最小,塌陷中部次之,塌陷盆地最大,而裂缝错落和地表破损变化则反之;塌陷区植被平均位移长度达 60 cm 以上,倾斜率变化为 5.67~28.63,主干根部风蚀/风积最大深度达 -30.52 cm/+25.41 cm,以塌陷边缘最为严重;植被的位移长度和倾角变化与塌陷裂隙高度和地表破碎呈正线性相关;塌陷边缘干沙层平均厚度达 14 cm 以上,比对照增大了 4~6 cm,而塌陷中部和塌陷盆地变化在 11 cm 左右,比非塌陷增加了 1~4 cm;塌陷边缘风蚀率高达 83.34%,塌陷中部次之 52.06%,而塌陷盆地风积率为 51.84%。塌陷边缘对沙质地表和植被生境影响最为强烈,为生态修复的重点区域,建议采煤塌陷后及时进行分区治理,避免“二次”荒漠化现象的发生。

**关键词:**风沙区;采煤塌陷;沙质地表;植物生境

**中图分类号:**X37

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)02-0088-05

## Influence of Coal Mining Subsidence on Sandy Geomorphology and Vegetation Habitat in Sandy Area

YOU Yang<sup>1</sup>, TIAN Peng<sup>2</sup>, YANG Wenjin<sup>3</sup>, HU Yue<sup>3</sup>,  
ZHANG Mengqi<sup>3</sup>, SHEN Weibo<sup>3,4</sup>, ZHAO Guoping<sup>5,6</sup>

(1.Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) CO., Ltd., Xi'an 710075, China; 2.College of Chemistry and Pharmacy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5.Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation & Ecological Restoration of Loess Plateau, Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China; 6.Key Laboratory of Ecological Rehabilitation in Shanbei Area, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:**In order to explore the ‘secondary desertification’ problems and countermeasures caused by coal mining subsidence in the arid and semi-arid sandy area, through field partition quadrat survey, using statistical methods, detailed research on the subsidence collapse edge, the central subsidence and subsidence basin led to the collapse of central crack width and strewn at random, the vegetation of displacement and tilt, dry sand and wind erosion/wind laid situation has carried out. The results show that the width and density of cracks are the smallest in the margin of collapse, the second in the middle of collapse, and the largest in the basin of collapse, whereas the changes of fracture staggering and surface damage are the opposite; the average displacement length of vegetation in the subsidence area is more than 60 cm, and the change of tilt rate is between 5.67 and 28.63; the average depth of main wind erosion/wind laid is up to -30.52 cm/+

收稿日期:2019-09-11

修回日期:2020-01-05

资助项目:陕西省重点研发(2018ZDXM-GY-030);国家自然科学基金(41661062);国家林业和草原局林业知识产权转化运用项目(知转2017-7)

第一作者:由洋(1985—),女,陕西西安人,硕士,工程师,主要从事油气储运研究。E-mail:181700573@qq.com

通信作者:申卫博(1979—),男,陕西泾阳人,博士,副研究员,主要从事水土保持研究。E-mail:shenwb@ms.iswc.ac.cn

赵国平(1979—),男,青海西宁人,博士后,研究员,主要从事荒漠化防治、水土保持与生态修复研究。E-mail:516293916@qq.com

25.41 cm, which is the most serious in the collapse margin; the displacement length and change of tilt rate of vegetation are in positive linear correlation with the height of collapse fracture and the fragmentation of surface; the average thickness of the dry sand layer at the collapse edge was more than 14 cm, which increased by 4~6 cm compared with the control, while the changes in the central subsidence and the subsidence basin were about 11 cm, which increased by 1~4 cm compared with the non-collapse; the wind erosion rate of the collapse edge is as high as 83.34%, followed by 52.06% in the central subsidence, and is 51.84% in subsidence basin. The comprehensive analysis shows that the collapse edge has the strongest impact on sandy land surface and vegetation habitat, and is the key area for ecological restoration. It is suggested to carry out zonal control in time after coal mining collapse and take appropriate measures to avoid the occurrence of 'secondary desertification' in the subsidence area.

**Keywords:** sandy area; coal mining subsidence; sandy land surface; vegetation habitat

毛乌素沙地地处我国北方的晋陕宁蒙接壤区,是长城沿线典型的干旱半干旱农牧交错带和风水蚀复合侵蚀的过渡区,也是京津风沙源二期治理工程西线源最重要的生态控制区<sup>[1-3]</sup>,其生态区位非常重要。经过半个多世纪治理,重点治理区的林草覆盖度增幅达30%以上,生物多样性日益丰富,局部的生态环境逐步好转,形成了固定与半固定沙丘为主的稀树草原景观,荒漠化扩展的局势得到基本控制。但该区又地处中国的八大煤田之一的神府煤田腹地,是中国西部唯一的国家级能源重化工基地和特大型煤矿开采开发区,为中国一个典型的煤炭富集与干旱半干旱生态脆弱区相互叠加区域,资源的开发利用与生态环境保护的矛盾十分突出<sup>[4]</sup>。特别是伴随着近年来煤炭开采、开发的进程加快(2018年煤炭产量超过4亿t),采煤塌陷引起“二次荒漠化”现象逐渐显现<sup>[1-2]</sup>。截至2018年,形成的煤炭采空区和塌陷区面积达到3 000 km<sup>2</sup>以上,约占整个榆林沙区的13.64%。其中,产生明显塌陷裂缝面积约为2 000 km<sup>2</sup>,活化固定、半固定沙丘1 000 km<sup>2</sup>以上,约占整个榆林沙区的4.60%。采煤塌陷形成的地表裂缝、塌陷错落(陡崖、陡坎、陡坡沿一些近似垂直的破裂面发生整体下坐位移),造成地表扭曲,土壤内部结构发生变化,大量的植被发生位移而枯萎死亡,引起沙丘“二次活化”,严重制约了经济社会的进一步发展。多年来这里一直是我国北方荒漠化研究的重点地区<sup>[5-12]</sup>,解决了因荒漠化扩展而导致的系列生态问题,但就采煤塌陷区的生态恢复与治理而言,仅仅处于起步阶段。为了探究风沙区采煤塌陷引起的“二次活化”与治理对策,采用统计学方法,对塌陷边缘、塌陷中部及塌陷盆地引发的沙质地表变化、植被的位移及倾斜、干沙层变化及风蚀/风积情况进行详细的研究,并对塌陷区的土地退化及植被生境变化进行诊断和整治对策探讨,为矿区生态恢复、土地复垦工程提供理论依据和技术支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市北部和内蒙古鄂尔多斯市东南部接壤地区,大地构造属于华北地台的鄂尔多斯台向斜,主要地层有含煤层系侏罗系、白垩系泥岩、沉积砂岩以及第四纪风积沙层。地貌类型多为固定、半固定星月型沙丘,相对高度5~10 m,植被类型主要以人工栽植的沙柳、杨树、杨柴、花棒及柠条为主,煤炭开采前植被盖度为20%~30%。年平均温度7.3℃,年均降水量368.2 mm,蒸发量1 319 mm,降水变率大,春季80%保证率的降水量仅12 mm,干燥度1.3以上;年均风速3.6 m/s,最大风速24 m/s,起沙风向以西北风和偏北风为主,尤其是在春季,不仅干旱少雨、地表干燥,而且大风最为频繁,最高风速可高达20~25 m/s以上。

目前,本区域经过多年的煤炭开采,地表沉陷明显(图1),最大沉陷达200 cm以上,塌陷裂缝交错广布,最大裂缝宽度达120 cm,最小1 cm,塌陷错落高度为5~150 cm。植被的最大位移达100 cm以上,导致大量人工植被死亡,沙质土壤容重减小,为1.5~1.6 g/cm<sup>3</sup>。地表破损率为40%~60%,风蚀风积面积达50%以上,植被盖度下降到20%以下,风沙活动频繁,近一半沙丘活化,沙区“二次”荒漠化的现象日益显现。



图1 研究区塌陷区

## 2 研究方法

### 2.1 塌陷裂缝调查

2017年3月—2018年11月,选择采煤塌陷1~

2 a 的塌陷区,在塌陷边缘、塌陷中部及塌陷盆地等典型地段(图 2),随机选取 5 个 10 m×10 m 的样方,调查塌陷裂缝宽度( $W$ )、裂缝错落高度( $H$ )、裂缝密度( $P_{ss}$ )及地表破损率( $I_{ss}$ )等。其中,裂缝密度用单位面积的裂缝条数表示,单位为条/m;地表破损率用地表破损面积占单位面积的百分比表示。

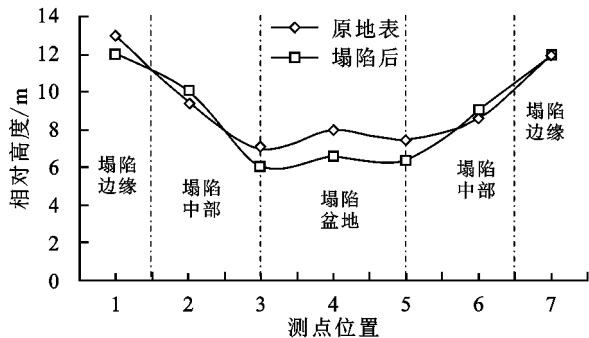


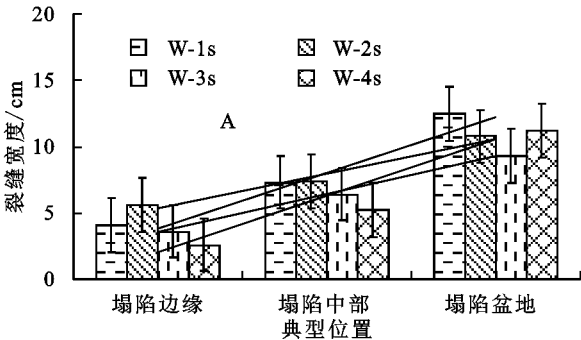
图 2 塌陷区样点选择示意图

2.2 植被位移及倾斜情况调查

在三大样地中,调查塌陷区代表性乔木杨树及灌木沙柳的地表位移长度( $L$ )、倾斜程度( $k$ )及 1 a 后主干根部风蚀/风积厚度( $G$ )。风蚀用“—”表示,风积用“+”表示,倾斜程度用斜率( $k$ )表示。

2.3 塌陷区干沙层变化调查

在相同样地内,随机选择 3 个测点,用剖面法测量干沙层厚度( $D$ ),重复 3 次。



2.4 风蚀/风积率调查

在同一样地中,重复 3 次,调查塌陷后风蚀/风积率变化,即单位面积内整个风蚀/风积面积占总面积百分比,用  $W_{ss}$  表示。

3 结果与分析

3.1 采煤塌陷对微地貌影响

采煤塌陷后形成的塌陷边缘、塌陷中部及塌陷盆地,裂缝纵横交错,沙质地表变得支离破碎,形成了大小不一、层次错落的裂缝(图 3)。据分析,塌陷裂缝宽度及错落与塌陷位置具有很大的差异性,从 4 条随机抽样的塌陷裂缝统计数据表明:塌陷边缘裂缝宽度变化为  $(2.6 \pm 0.3) \sim (4.1 \pm 0.2)$  cm,平均宽度为  $(3.9 \pm 0.25)$  cm;塌陷中部为  $(5.2 \pm 0.2) \sim (7.3 \pm 0.1)$  cm,平均为  $(6.6 \pm 0.15)$  cm;而塌陷盆地则变化为  $(9.3 \pm 0.1) \sim (12.5 \pm 0.2)$  cm,平均为  $(10.9 \pm 0.15)$  cm,裂缝的平均宽度增加了 2.75 倍(图 3A)。总体表现出塌陷边缘宽度最小,塌陷中部次之,塌陷盆地最大,而错落高度的变化则反之,从塌陷盆地到塌陷边缘,其裂缝平均错落增大了 6.23 倍(图 3B)。采煤塌陷形成的塌陷裂缝变化使原本得到固定、半固定沙丘可能引发“二次”风蚀或风积情况,甚至进一步干扰植被的生长环境。

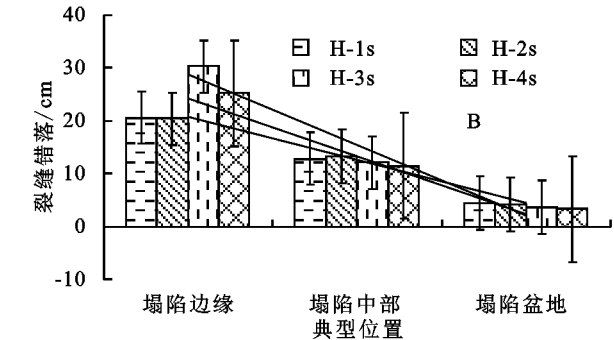


图 3 塌陷裂缝变化

同理,采煤塌陷位置不同,其形成的裂缝密度和地表破损率也有所不同(表 1),从塌陷边缘到塌陷盆地裂缝密度依次增大,分别为 0.29,0.37,0.58 条/m,而单位面积地表破损率则不断地减小,为 0.60,0.50,0.40。这是由于采煤塌陷时重力势能转化为动能,塌陷边缘更容易造成局部的滑坡或崩塌,结合分析结果可知,塌陷边缘裂缝宽度虽小,但错落高度相对较大,土壤内部结构发生严重变化,因而使地表遭到的破坏最为强烈,这种现象往往会导致植被发生位移、剪切,甚至拉伤根系,对植被的生长损坏最为严重;而塌陷中部和塌陷盆地则反之,造成裂缝宽度逐渐增大,裂缝密度增多,但错落高度和地表破损程度反而进一步减小,对植被造成的影响也相应减小。

表 1 10 m×10 m 样方塌陷裂缝密度及地表破损情况

类别	$P_{ss}/(\text{条} \cdot \text{m}^{-1})$						$I_{ss}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	平均	
塌陷边缘	0.31	0.26	0.32	0.27	0.28	0.29	0.60
塌陷中部	0.42	0.36	0.38	0.35	0.33	0.37	0.50
塌陷盆地	0.55	0.63	0.65	0.57	0.52	0.58	0.40

3.2 采煤塌陷对植被的影响

由以上分析可知,当采煤发生塌陷时,地表会形成塌陷裂缝和错落,导致区域乔灌木发生不同的位移、倾斜。表 2—3 样方调查中,为随机选择塌陷区两个主要建群种杨树和沙柳在不同的塌陷位置发生的位移长度、倾斜程度及 1 a 后主干根部出露地表的风蚀/风积厚度统计变化。

表 2 10 m×10 m 样方杨树位移长度及影响

类别	L/cm			K/%			G/cm		
	$L_{\max}$	$L_{\text{mid}}$	$L_{\min}$	$K_{\max}$	$K_{\text{mid}}$	$K_{\min}$	$G_{\max}$	$G_{\text{mid}}$	$G_{\min}$
塌陷边缘	112.40	50.18	39.52	5.67	2.75	1.73	−30.52	−23.26	−10.32
塌陷中部	53.34	42.64	30.45	11.43	5.67	3.73	−15.21	−10.56	−5.54
塌陷盆地	12.66	8.96	5.78	28.63	14.30	11.43	−5.36	−3.44	−2.17

注：“−”表示风蚀。

表 3 10 m×10 m 样方沙柳位移长度及影响

类别	L/cm			K/%			G/cm		
	$L_{\max}$	$L_{\text{mid}}$	$L_{\min}$	$K_{\max}$	$K_{\text{mid}}$	$K_{\min}$	$G_{\max}$	$G_{\text{mid}}$	$G_{\min}$
塌陷边缘	85.10	40.54	11.63	—	—	—	+10.21	+5.63	+3.60
塌陷中部	42.11	33.56	10.33	—	—	—	+12.32	+8.25	+5.54
塌陷盆地	7.36	5.44	4.15	—	—	—	+25.41	+23.21	+22.50

注：“+”表示风蚀，“−”表示未发现。

由表 2—3 可以看出,不同塌陷位置的杨树和沙柳位移长度和斜率均有所不同,塌陷边缘杨树最大位移长度甚至达到 110 cm 以上,沙柳为 85 cm 左右,塌陷中部为 53.34,42.11 cm,而塌陷盆地最大位移仅为 12.66,7.36 cm。同理,杨树的倾斜率以塌陷边缘为最大,达到 1.73~5.67,塌陷中部 3.73~11.43,而塌陷盆地基本未发生倾斜(表 2)。据分析,植被的位移长度与塌陷裂缝错落高度呈线性正相关关系,错落高度越大,植被的位移长度也越大,其倾斜的程度也越高。

地表塌陷后沙质地表变得更加疏松,且伴随着乔灌木的位移和倾斜,在风的作用,引发一定程度的风蚀/风积现象,从而导致根系外露或者堆积,对植被的生长造成一定的影响(表 2—3)。由于乔灌木树种的防沙的特性不同,杨树更容易在主干根部发生风蚀现象,最大风蚀发生在塌陷边缘,达到−30.52 cm 左右,而塌陷盆地最小,约为−5.36 cm(表 2)。据现场调查,在塌陷边缘位置,大多数杨树主根周围 2 m 范围内,根系裸

露非常严重,对杨树的生长影响很大,而塌陷中部和塌陷盆地影响相对较小,只有部分根系外露,对植被的生长影响相对较小;沙柳由于根部多枝丛生,容易阻拦风沙,在 3 个不同的塌陷位置均出现风积现象,以塌陷盆地最大,塌陷中部次之,塌陷边缘最小,最大风积厚度分别为+25.41,+12.32,+10.21 cm(表 3),对沙柳的生长反而起到一定的促进作用。

3.3 采煤塌陷对干沙层及风蚀/风积的影响

采煤塌陷后,地表变得支离破碎,引起沙质地表干沙层厚度发生变化,对塌陷区不同位置 18 个样点随机抽样干沙层等值线变化见图 4。非塌陷时,沙质地表基本为一个封闭的整体,干沙层的厚度变化与土壤蒸发有直接的关系,通常的影响因素有土壤结构、土壤表面特征及地形因子<sup>[1-2]</sup>。据分析,3 个随机的抽样点 18 个剖面的干沙层变化稳定在 6—10 cm(图 4B),遵循丘顶干沙层较厚,丘间干沙层相对较薄的规律,这符合毛乌素沙地一般沙丘干沙层变化规律<sup>[1-2]</sup>。

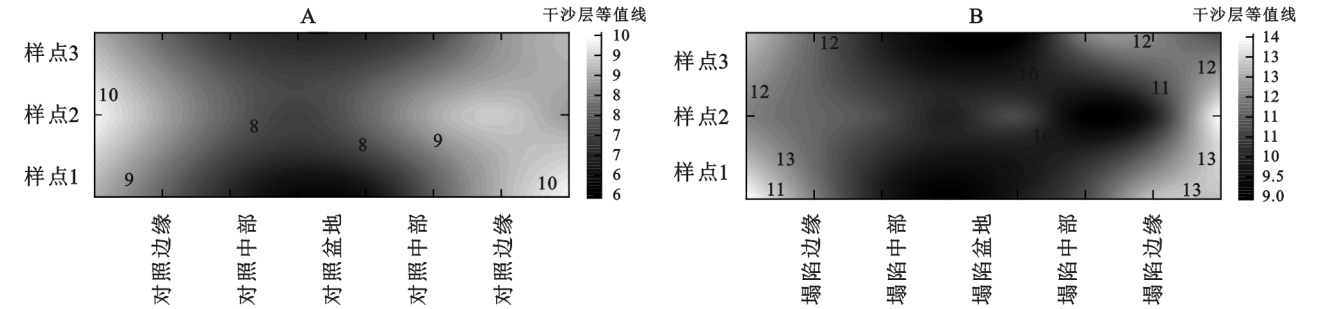


图 4 不同塌陷位置的干沙层变化

采煤塌陷后,塌陷导致沙质土壤变得更加疏松,结构发生变化,表面形成塌陷裂缝和错落,促使塌陷区不同位置干沙层厚度普遍增加,且在图中等值线表现出非常紊乱,高低不一,已不符合沙区干沙层变化规律。3 个随机的抽样点 18 个剖面的平均厚度达 11.10 cm,比非塌陷增大了 37.50%。这种变化尤其

表现在塌陷边缘最为明显,其干沙层厚度甚至达到在 14 cm 以上(图 4B),比对照增大了 4~6 cm;而塌陷中部和塌陷盆地的干沙层厚度相对较小,变化在 11 cm 左右,比非塌陷增加了 1~4 cm。

干沙层的这种变化,将会直接导致塌陷区不同位置的风蚀/风积面积发生变化(表 4)。采煤塌陷后形



成的塌陷边缘、塌陷中部及塌陷盆地,在风的作用下都有不同程度的风蚀/风积现象出现,但是综合来看以塌陷边缘最为明显,主要以风蚀现象为主,平均风蚀率高达 83.34%,塌陷中部次之,为 52.06%,而塌陷盆地则由风蚀转为风积现象,风积率高达 51.84%(表 4)。这说明采煤塌陷产生的塌陷裂缝和错落,改变了局部的地形地貌,间接增加了与空气的接触面积,土壤蒸发量增大,导致沙质土壤进一步的旱化,风蚀/风积面积逐渐扩张,进而影响植被的生长。

3.4 “二次”荒漠化诊断与整治对策

由以上分析可知,采煤塌陷后会引起一系列的连锁反应,首先是在内营力塌陷重力影响下地表产生裂缝和

错落,造成不同塌陷位置的裂缝纵横和地表破损,引发乔灌木位移和倾斜。在外营力风的作用下,植物体周围发生风蚀或风积,促使植被根系外露,逐渐丧失防风固沙的能力,进一步地塌陷,风蚀/风积面积扩大,直接影响植物的生长,从而导致固定半固定沙丘重新活化,最终形成塌陷区“二次”荒漠化(图 5)。

表 4 塌陷区不同位置的风蚀/风积率变化

类别	W <sub>ss</sub> /%					平均
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	W <sub>ss</sub> /%
塌陷边缘	-76.30	-91.80	-75.70	-82.10	-90.80	-83.34
塌陷中部	-55.80	-60.60	-45.40	-43.60	-54.90	-52.06
塌陷盆地	45.70	52.60	45.80	60.60	54.50	51.84

注: + 表示风积, - 表示风蚀。

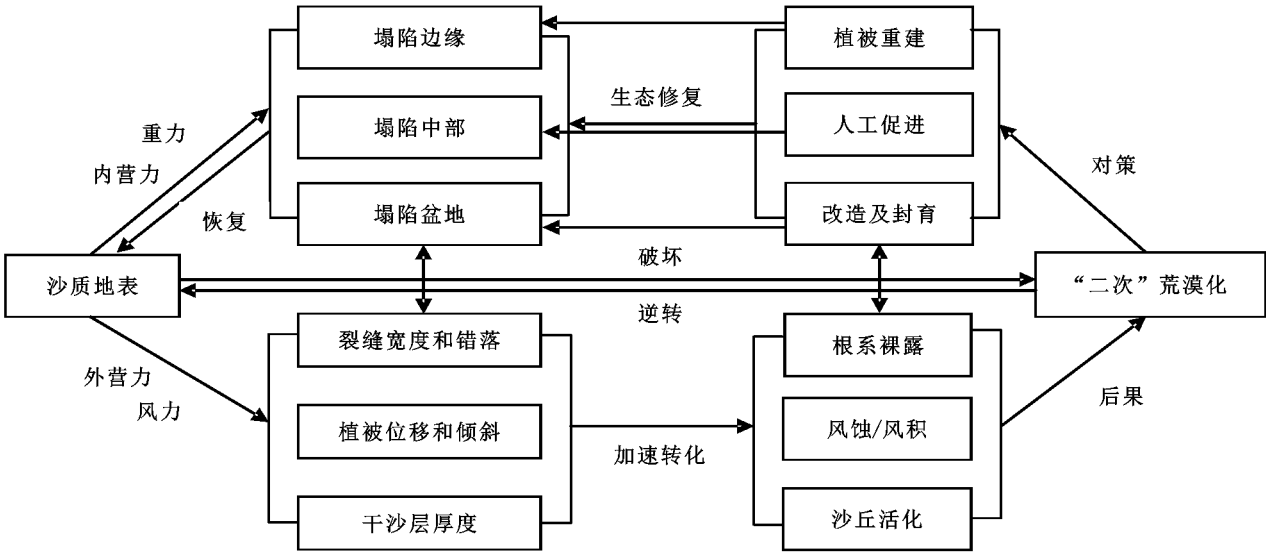


图 5 塌陷“二次”荒漠化诊断及整治对策

因此,采煤塌陷后应该及时地进行分区生态修复,避免引起整个塌陷区的“二次”荒漠化,建议在塌陷边缘经过裂缝土地整治和工程(沙障)措施后,进行植被的恢复与重建;塌陷中部做适当改造(平茬形成活沙障)后,进行人工促进生态修复;而对塌陷盆地则进行适当的改造后,封育自我生态修复。

4 讨论与结论

(1) 裂缝宽度和密度呈现塌陷边缘裂缝<塌陷中部<塌陷盆地的规律,而错落高度和单位面积地表破损率从塌陷边缘到塌陷盆地逐渐减小。总之,塌陷边缘的裂缝宽度和密度虽小,但错落高度和单位地表破损率较高,导致其裸露地表的面积较大,生态风险相对突出。此外,塌陷区干沙层厚度平均达 11.10 cm,其中塌陷边缘干沙层较厚,达到在 14 cm 以上。采煤塌陷后形成不同程度的风蚀/风积现象出现,但以塌陷边缘最为明显,平均风蚀率高达 83.34%,塌陷中部次之。此外,塌陷盆地则由风蚀转为风积现象,风积率高达 51.84%。

(2) 整体来说,杨树和沙柳最大位移长度从塌陷边缘到塌陷盆地逐渐减小,且杨树最大位移长度大于沙柳。植被的位移长度与塌陷裂缝错落高度呈线性正相关关系,错落高度越大,植被的位移长度也越大,其倾斜的程度也越高。此外,杨树主干根部最大风蚀发生在塌陷边缘,达到 -30.52 cm 左右,而塌陷盆地最小,约为 -5.36 cm。沙柳在 3 个不同的塌陷位置均出风积现象,以塌陷盆地最大,塌陷中部次之,塌陷边缘最小,最大风积厚度分别为 +25.41 cm, +12.32 cm, +10.21 cm,对沙柳的生长反而起到一定的促进作用。

(3) 总之,塌陷边缘对沙质地表和植被生境影响最为强烈,为生态修复的重点区域,而塌陷中部次之,而塌陷盆地为最小。建议:采煤塌陷后应该及时地进行分区生态修复,对症下药,在塌陷边缘经过土地整治和工程(沙障)措施后,进行植被的恢复与重建;塌陷中部做适宜改造后,进行人工促进生态修复;而对塌陷盆地则进行适当的改造后,封育自我生态修复即可。

- Characterizing spatial variability of soil textural fractions and fractal parameters derived from particle size distributions[J]. *Pedosphere*, 2019, 29(2):224-234.
- [18] 贡璐,张海峰,吕光辉,等.塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J].*生态学报*, 2011, 31(14):4136-4143.
- [19] 张露,韩霁昌,马增辉,等.砒砂岩与沙复配“土壤”的质地性状[J].*西北农业学报*, 2014, 23(4):166-172.
- [20] 罗倩,张珍明,向准,等.不同种植年限鸟王茶产地土壤物理性质及生长特征[J].*西南农业学报*, 2017, 30(12):2746-2750.
- [21] 陈玉真,王峰,尤志明,等.不同植茶年限茶园土壤的物理性状及渗透性能[J].*山地学报*, 2016, 34(1):38-45.
- [22] 邹诚,徐福利,闫亚丹,黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤机械组成和速效养分影响分析[J].*中国农学通报*, 2008, 24(12):424-427.
- [23] 邓廷飞,刘彦,颜秋晓,等.贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J].*水土保持学报*, 2014, 28(5):209-214.
- [24] 苏志珠,刘蓉,梁爱民,等.晋西北沙化土地土壤机械组成与有机质的初步研究[J].*水土保持研究*, 2018, 25(6):61-67.
- [25] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].*科学通报*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [26] Xu G C, Li Z B, Li P. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China[J]. *Catena*, 2013, 101:17-23.
- [27] Behzad G, Hugh D. Fractal dimension of soil fragment mass-size distribution: A critical analysis[J]. *Geoderma*, 2015, 245/246:98-103.
- [28] 缪驰远,汪亚峰,魏欣,等.黑土表层土壤颗粒的分形特征[J].*应用生态学报*, 2007, 18(9):1987-1993.
- [29] 李德成,张桃林.中国土壤颗粒组成的分形特征研究[J].*土壤与环境*, 2000, 9(4):263-265.
- [30] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1/2):123-130.
- [31] 文海燕,傅华,赵哈林.退化沙质草地开垦和围封过程中的土壤颗粒分形特征[J].*应用生态学报*, 2006, 17(1):55-59.
- [32] 华瑞,徐学选,张少妮,等.不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究[J].*水土保持学报*, 2016, 30(4):206-209.

~~~~~

(上接第92页)

# 参考文献:

- [1] 赵国平,史社强,李军保,等.毛乌素沙地采煤塌陷区土壤水分空间变异研究[J].*水土保持学报*, 2017, 31(6):90-93, 219.
- [2] 赵国平,朱建军,张继平,等.神府煤田采煤塌陷引起的生态问题探讨[J].*干旱区资源与环境*, 2017, 31(9):103-107.
- [3] 赵国平,李晖,李旭祥,等.神府煤田风沙区采煤塌陷地表环境动态变化的综合评价[J].*西安交通大学学报*, 2012, 46(5):137-142.
- [4] 赵国平,毕银丽,杨伟,等.神府煤田风沙区采煤塌陷对粒度成分特征的影响[J].*中国沙漠*, 2015, 35(6):1461-1466.
- [5] 何冰,李廷亮,栗丽,等.采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应[J].*水土保持学报*, 2018, 32(4):184-189, 196.
- [6] 王健,高永,魏江生,等.采煤塌陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J].*水土保持学报*, 2006, 20(5):52-55.
- [7] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院, 2006.
- [8] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J].*干旱区资源与环境*, 2010, 24(2):177-182.
- [9] 安慧,安钰.毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡[J].*应用生态学报*, 2011, 22(9):2247-2252.
- [10] 孙建华,刘建军,康博文,等.陕北毛乌素沙地土壤水分时空变异规律研究[J].*干旱区农业研究*, 2009, 27(2):244-247.
- [11] 舒培仙,牛东风,李保生,等.毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J].*中国沙漠*, 2016, 36(1):158-166.
- [12] 尚爱军,卜耀军,艾海舰,等.榆林沙区土壤水分时空格局及动态变化规律研究[J].*水土保持学报*, 2008, 22(4):86-89.