

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.316

引用格式: 王志民,岳喜能,秦越强,等. 黄土丘陵沟壑区煤炭地下开采扰动下的自然恢复[J]. 中国地质调查,2025,12(4): 93-102. (Wang Z M, Yue X N, Qin Y Q, et al. Natural restoration in loess hilly and gully region under the disturbance of underground coal mining[J]. Geological survey of China, 2025,12(4): 93-102.)

黄土丘陵沟壑区煤炭地下开采扰动下的自然恢复

王志民, 岳喜能, 秦越强, 柴晨晖, 孙宇飞, 冯欣*

(中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 天津 300301)

摘要: 作为重要能源基地的鄂尔多斯市属于黄土高原,生态及其脆弱,随着煤炭的地下开采,产生了大量露天采坑、排土场和塌陷区。为研究黄土丘陵沟壑区煤炭地下开采产生的塌陷区塌陷裂缝自然修复效果及修复方法,以准格尔旗串草圪旦煤矿为研究对象,利用遥感解译、土壤测量等手段,并基于修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)构建边缘裂缝自然恢复模型,研究分析塌陷裂缝自然恢复特征并提出修复建议。结果显示:黄土丘陵沟壑区塌陷出现分区特征,动态裂缝区自然修复下1 a内基本恢复,且恢复效果较佳;边缘裂缝区自然修复效果差且长时间难以恢复,模拟恢复最长时间达26.2 a。研究证明塌陷区修复应选择基于自然的分区修复法,研究成果可为黄土丘陵沟壑区地下开采塌陷裂缝修复治理提供参考。

关键词: 井下开采; 动态裂缝; 边缘裂缝; 自然修复; RUSLE 模型

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)04-0093-10

0 引言

煤炭地下开采在促进社会发展的同时,也造成严重的生态环境破坏,其中最突出的表现是地面沉降及其生态扰动^[1-5]。地面沉降致使采空区至地表形成大量塌陷裂缝是破坏的直接外在表现。丘陵沟壑区矿山往往地处偏远,人烟稀少,矿山修复效益低,对社会资源吸引力不足,生态修复难度大^[5]。黄土丘陵沟壑区由于气候干旱、蒸发量大等原因,人工植被初始阶段恢复效果较好,长时间人工植被会出现退化与衰败现象^[6-8],人工植被出现“一年绿、二年黄、三年死光光”的恶性循环^[9]。因此,在社会、经济和技术多重困境下,应构建简单有效、针对性强的整体恢复系统,构建系统整体恢复力,即以自然之力修复自然成为此类地区塌陷裂缝修复的一种

思考方向^[10]。针对黄土丘陵沟壑区煤矿地下开采带来的严峻生态问题,前人提出了不同的治理与修复方法。一类是从根源上控制的开采减损技术^[11],实现采煤驱动生态“自修复”^[12];另一类是自然修复^[13-16]。有研究表明基于类自然修复的本地先锋植被具有较强的稳定性,很少会在短期内出现衰败的现象^[17]。

串草圪旦煤矿是一座位于鄂尔多斯市准格尔旗黄土丘陵沟壑区的在产煤矿,多年的地下开采给周边生态环境带来了一定的破坏,塌陷坑、塌陷裂缝大面积存在,该矿山做了大量的生态修复工作,但效果不理想。本文通过遥感解译、土壤测量、地面调查、边缘裂缝恢复模型模拟等手段,开展黄土丘陵沟壑区煤炭地下开采引发塌陷裂缝基于自然的恢复效果研究,提出了基于自然的塌陷裂缝分区修复模式。此成果可为黄土丘陵沟壑区地下开采塌陷裂缝修复治理提供参考。

收稿日期: 2023-11-15; 修订日期: 2024-10-29。

基金项目: 中国地质调查局“鄂尔多斯市准格尔旗煤炭矿集区生态修复支撑调查(编号: DD20208078)”项目资助。

第一作者简介: 王志民(1985—),男,高级工程师,主要从事矿山生态修复支撑调查和地质灾害调查工作。Email: 85689352@qq.com。

通信作者简介: 冯欣(1985—),男,高级工程师,主要从事区域地质调查工作。Email: fengxin01305105@163.com。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

1.1.1 地形地貌

研究区地处鄂尔多斯黄土高原东南部,地形总体趋势西北高东南低,海拔标高 950 ~ 1 150 m,相对高差 30 ~ 200 m。地貌类型为典型的黄土丘陵沟壑,丘陵被枝叉状沟谷所切割,致使矿区地形复杂。总体呈现沟谷纵横、沟深壁陡的态势。丘陵顶部呈浑圆状,上部坡角为 8° ~ 10°,下部坡角为 10° ~ 20°。

1.1.2 区域地质

研究区位于鄂尔多斯市准格尔旗魏家峁地区,地处黄河西岸,东南与山西省偏关县隔河相望。区内出露地层由老至新为:中一下奥陶统($O_{1+2}m$)马家沟组、上石炭统太原组(C_3t),下二叠统山西组(P_1s)、上二叠统石盒子组(P_2sh),二叠系—三叠系石千峰群($P-Tsq$),第四系上更新统马兰组(Q_3m)和全新统(Q_4)(图 1)。

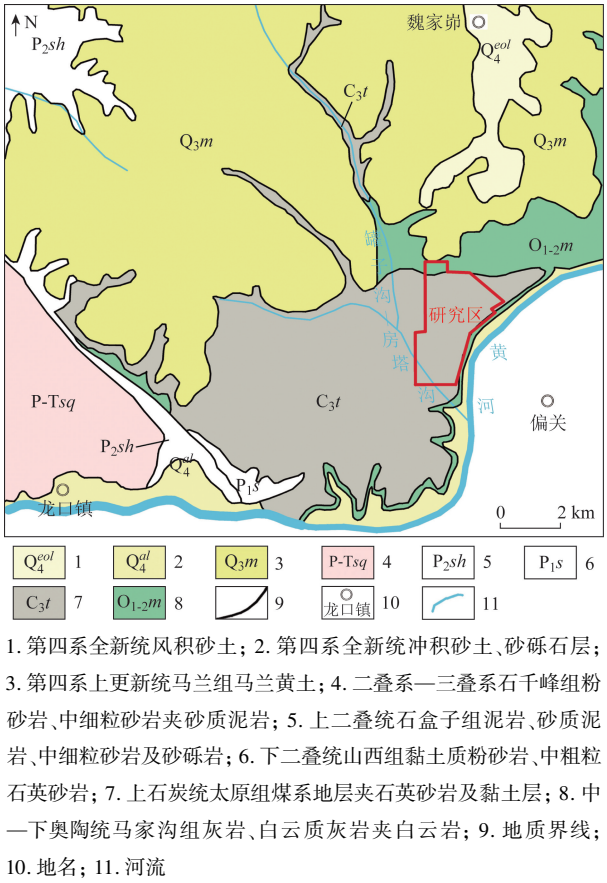


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geologic sketch of the study area

1.1.3 气象水文

研究区属典型温带干旱气候,特点是冬季寒冷漫长,夏季炎热短暂,昼夜温差大。研究区年平均气温 5.3℃ ~ 7.6℃,最高 39.5℃,最低 -30.9℃^[18]。平均降水量为 401.6 mm,日最大降水量 96 mm,降水多集中在 5—8 月(图 2),年平均蒸发量 1 792 ~ 2 115 mm。春季多风,多为西北风,一般风速 10 ~ 15 m/s,最大风速 24 m/s,春季极易形成沙尘暴。每年 10 月至翌年 4 月为冻结期,最大冻土深度 1.50 m。区内最大沟谷为罐子沟,其他沟谷大部分为其支沟,平时沟谷干涸无水或仅有溪流,雨季可形成短暂洪流,汇入房塔沟后流出区外,然后注入黄河。

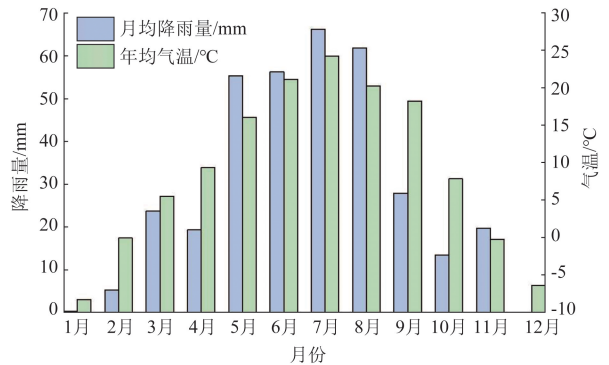


图 2 研究区月均降雨量及气温

Fig. 2 Annual rainfall and temperature in the study area

1.1.4 土壤植被

研究区土壤以栗钙土、黄绵土为主。其中栗钙土为本区主要地带性土壤,土层较厚,平均厚度为 80 ~ 150 cm,腐殖质层较薄,厚度一般为 20 cm。土壤质地较粗,多为砂土—砂壤土,有机质含量为 0.49%,含氮量为 0.04%,含磷量为 3.0×10^{-6} ,含钾量丰富,pH 值为 7.8 ~ 8.7,土壤肥力差。

研究区植被类型为典型干旱草原植被,植被群落结构简单,草层低矮稀疏。枝状沟谷内零星分布有杨树、柳树,坡面分布有柠条、沙棘等。植物具有耐旱、抗风沙、抗贫瘠等特点。

1.2 研究方法

1.2.1 地面调查

地面调查是获取现场数据最直接有效的方法。为研究塌陷裂缝恢复特征,选取不受人干扰的动态裂缝特定区域做为研究区开展地面调查工作。第 1 次调查在 2021 年 7 月,第 2 次调查在 2022 年 7 月。主要统计塌陷裂缝的数量、形态及规模变化。

1.2.2 无人机航测

无人机航测具高效、高精度、成本低的特点,因此在塌陷裂缝调查中占据一席之地。本次研究采用无人机航测技术获取研究区裂缝相关数据,研究采用CW-15无人机航摄系统,航飞分辨率为0.05 m。选取研究区没有进行裂缝治理工程的来说明塌陷裂缝的自然恢复特征。分别对开采后自然恢复3 a、6 a、11 a的已停产研究区进行了无人机航测地裂缝识别与提取统计(图3)。

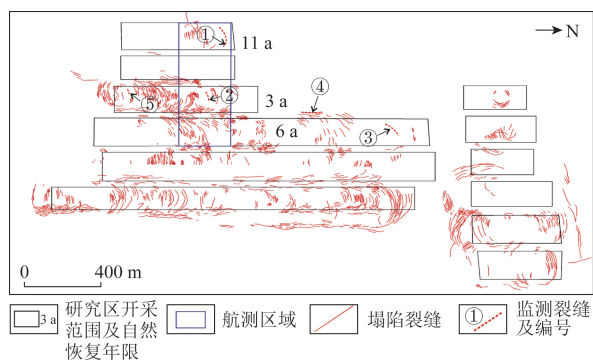


图3 研究区无人机航测塌陷裂缝提取

Fig.3 Collapse fractures extracted by unmanned aerial vehicle aerial survey in the study area

1.2.3 遥感解译

本次遥感解译方法主要是室内分析,收集研究区1990—2020年遥感影像数据,利用遥感影像计算归一化植被指数。利用归一化植被指数近似估算植被覆盖度。

在ArcGIS10.7软件中进行栅格数据的计算与统计得出研究区不同年份植被覆盖度变化趋势。研究数据来源地理空间数据云,数据采用的是1990年、2000年、2010年和2021年8月份的Landsat8 OLI影像,数据经几何校正,云量低于5%,精度满足要求。影像选取时间均处于植被生长较好的8月份,能够较好地反应研究区植被的生长和分布情况。遥感影像经过辐射定标、大气校正消除由于大气吸收或折射引起的辐射亮度误差,利用研究区范围矢量文件裁剪得到研究区遥感影像。

1.2.4 土壤测量

土壤特性的变化是土壤对煤炭地下开采的内在响应。土壤含水量受开采影响较为明显,因此可作为最重要的指标因子来评判生态损伤。在研究区选择较为典型的塌陷裂缝区域开展土壤测量,该区域塌陷裂缝分为边缘裂缝和动态裂缝。为避免其他裂缝影

响,选取的垂直裂缝长轴方向20 m内无其他裂缝且在裂缝两端外延5 m范围内亦无其他裂缝存在,按照土壤表层10 cm、深度50 cm在距裂缝同一侧进行分层取样,在裂缝延长及两侧无其他裂缝区域选取对照样品。本次实验选取塌陷裂缝3条,在塌陷裂缝周围采集土壤样品9件,正常土壤对照样品采集8件(图4)。

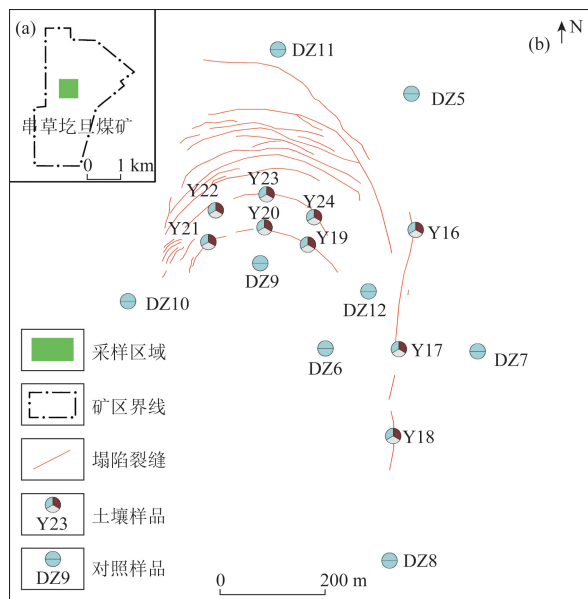


图4 采样区域(a)及土壤样品采样位置(b)

Fig.4 Sampling location (a) and soil sample location (b)

土壤含水量采用烘干法,土壤容重采用环刀法测定。为了方便研究及试验结果分析,分别对比研究不同裂缝、不同深度的土壤水分、土壤容重变化。采用WPS软件对数据进行整理及统计分析。

1.2.5 数学建模

运用代数方程、微分方程模型,推导塌陷裂缝中的边缘裂缝自然恢复时间公式;基于修正通用土壤流失方程(revised universal soil loss equation, RUSLE)求取边缘裂缝物源供给,计算裂缝恢复时间。其中降雨数据来源于准格尔旗气象局,土壤可蚀性因子数据来源于全球土壤数据HWSD,坡度坡长数据来源于Globe Land 30,植被覆盖数据来源于地理空间数据云,水土保持措施数据来源于Globe Land 30。

2 地下开采扰动下自然修复特征

2.1 变形与生态损伤分区

煤炭开采导致地表移动变形,变形呈现典型的盆地状^[19]。胡振琪等^[14]基于我国西部煤矿区土地复垦方案编制以及采煤扰动的土地损伤评价体系,

将采煤采空区生态损伤划分为完全均匀沉陷区、相对均匀沉陷区、非均匀沉陷区(图5)。塌陷盆地最外围为相对均匀沉陷区,地表下沉量小于10 mm,地表出现少量的裂缝,裂缝呈短、浅、窄的状态;非均匀沉陷区位于盆地相对外侧,是地表拉张最严重区域,出现大量的拉张裂缝,裂缝长且宽,以阶梯型出现,阶梯高度最大可达2 m,形成边缘裂缝区;均匀沉降区位于盆地中间,是地表下沉最大的区域,虽下沉值最大,但下沉均匀,基本保持原来的地貌状态,初始会出现拉张裂缝,随着工作面的推进,盆

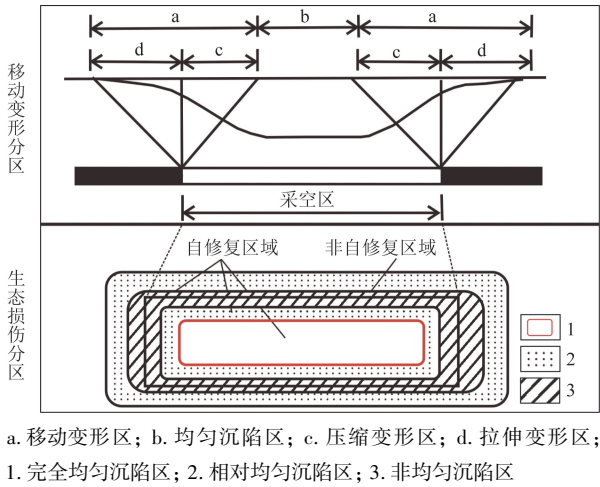


图5 移动变形分区与生态损伤分区特征
(据文献[14]和[19]修改)

Fig. 5 Characteristics of moving deformation zoning and ecological damage zoning (Modified after references [14] and [19])



(a) 2021 年 7 月裂缝状态



(b) 2022 年 7 月裂缝状态

图6 研究区动态裂缝恢复情况

Fig. 6 Dynamic fracture recovery in the study area

2.2.2 边缘裂缝自然恢复现象

停采3 a的研究区边缘裂缝数量为33条,是停采11 a的研究区边缘裂缝14条的2.4倍(表2)。停采时间与边缘裂缝数量成反比,边缘裂缝长度变

地向工作面推进的方向向外扩张,地表的裂缝会受到挤压应力,而慢慢愈合,最终形成底部相对位移不变的完全均匀沉陷区(动态裂缝区)。

2.2 自然恢复特征

2.2.1 动态裂缝自然恢复特征

2021 年研究区动态裂缝有14条,动态裂缝规模较大,延伸较长。2022 年研究区仅剩2条规模较小的动态裂缝。从表1中可以看出初采阶段动态裂缝发育强烈,1 a后动态裂缝的规模、数量明显减少,自然恢复率为86%(愈合动态裂缝数占监测数比)(图6)。

表1 研究区动态裂缝统计数据

Tab. 1 Statistical data of dynamic fractures in the study area

时间	序号	长度/m	宽度/m	下错距离/m	形状
2021 年 7 月	1	300	0.30	0.55	弧形
	2	100	0.15	0.43	弧形
	3	550	0.30	0.21	弧形
	4	800	0.25	0.11	直线形
	5	320	0.10	0.02	直线形
	6	900	0.51	0.01	直线形
	7	700	0.41	0.01	直线形
	8	70	0.23	0.10	直线形
	9	330	0.32	0.03	直线形
	10	550	0.43	0.02	直线形
	11	920	0.25	0.01	直线形
	12	520	0.24	0.05	直线形
	13	660	0.12	0.03	直线形
	14	580	0.35	0.11	直线形
2022 年 7 月	1	130	0.06	0.25	弧形
	2	70	0.03	0.12	弧形

表 2 研究区不同停采年限边缘裂缝数据

Tab.2 Marginal fracture data for different stop – mining years in the study area

停采时间/a	裂缝数	平均长度/m	最大平均宽度/m
3	33	104	0.45
6	21	85	0.49
11	14	38	0.51

2.3 塌陷裂缝自然恢复效果

2.3.1 土壤含水量

研究区土壤对照样品表层 10 cm 平均含水量为 3.50%,塌陷裂缝周边土壤样品表层 10 cm 含水量平均值为 2.39%,除 Y16、Y18 高于对照样品外,其他样品含水量均小于对照样品含水量。对照样品 50 cm 深度土壤平均含水量为 3.82%,塌陷裂缝样品 50 cm 深度土壤平均含水量为 2.63%,塌陷裂缝样品平均土壤含水量低于对照样品平均土壤含水量(图 7)。可以看出,采空塌陷对土壤含水量具备一定的影响,对边缘裂缝周边土壤含水量影响最大。

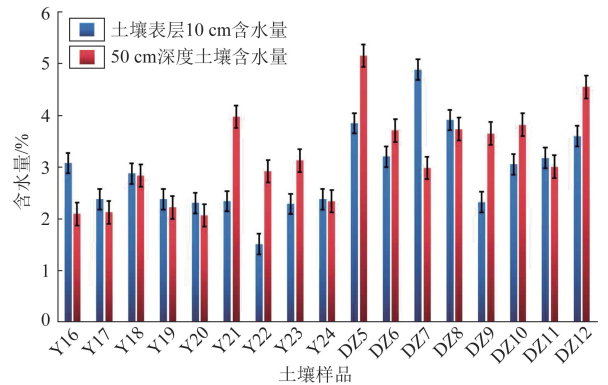
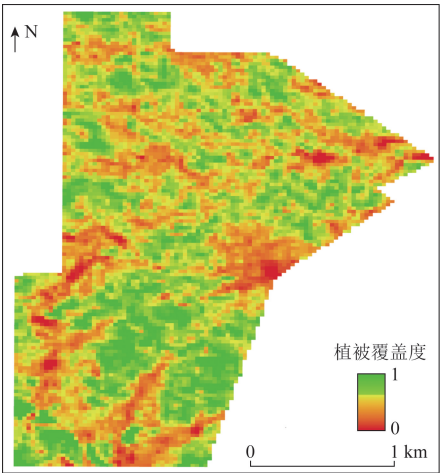


图 7 土壤含水量对比

Fig.7 Comparison of soil water content



(a) 1990 年植被覆盖度

2.3.2 土壤容重

从图 8 可以看出,塌陷裂缝自然恢复对土壤样品容重影响较小,对照样与塌陷裂缝影响下的土壤容重基本相同,变化较小。

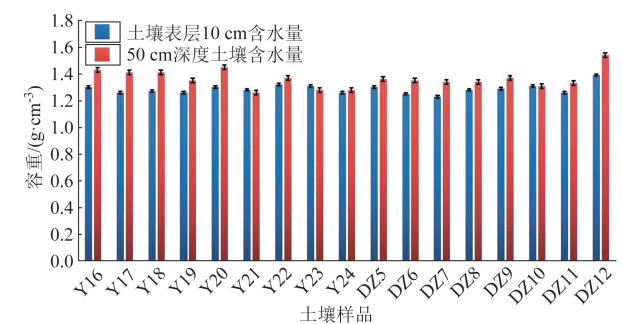
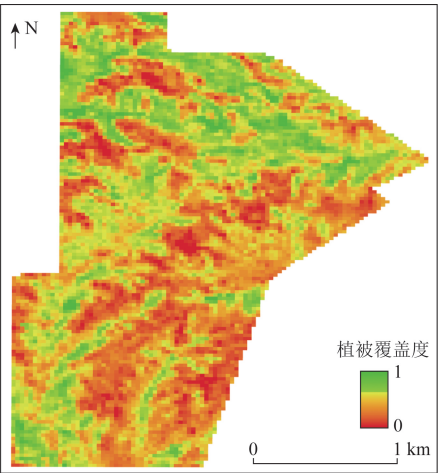


图 8 土壤容重对比

Fig.8 Comparison of soil bulk density

2.3.3 植被覆盖度

基于遥感解译监测 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年 4 期 8 月份植被覆盖度(图 9),研究区 1990 年植被覆盖度(0,0.4] 占比 22.92%,(0.4,0.8] 占比 59.46%,(0.8,1.0] 占比 17.62%(图 10)。可以看出,1990 年植被覆盖度主要集中于(0.4,0.8],植被覆盖度相对较好,分析其原因主要是采煤没有大规模开展,为民营窑采,开采规模小,对植被破坏范围有限。2000 年植被覆盖度(0,0.2] 占比较 1990 年有所提升,达到 5.7%,植被覆盖度主要集中于(0.2,0.6],占比 73.18%,(0.6,1.0] 占比 21.12%,植被覆盖度有所下降,分析原因为煤炭开采规模加大,破坏加大所造成。2010 年植被覆



(b) 2000 年植被覆盖度

图 9-1 研究区 1990—2020 年植被覆盖度空间分布

Fig.9-1 Spatial distribution of vegetation coverage in the study area from 1990 to 2020

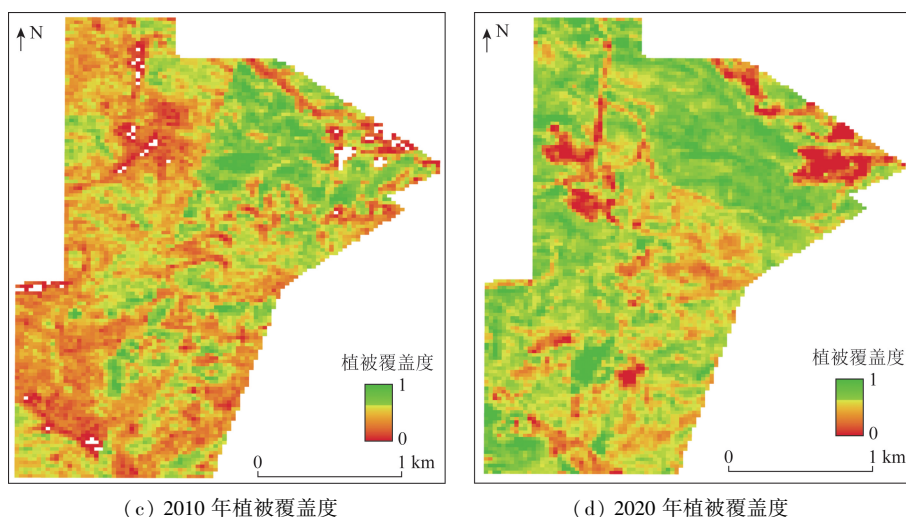


图 9-2 研究区 1990—2020 年植被覆盖度空间分布

Fig. 9-2 Spatial distribution map of vegetation coverage in the study area from 1990 to 2020

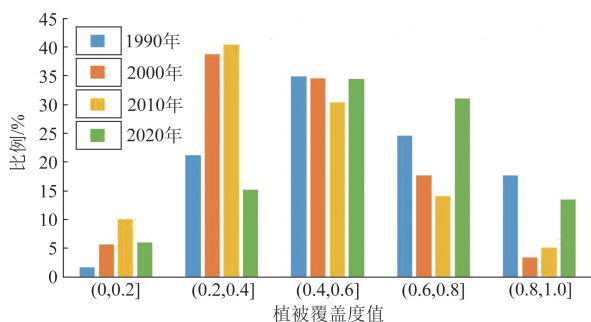


图 10 植被覆盖度对比

Fig. 10 Comparison of vegetation coverage

盖度(0,0.2]占比较 1990 年和 2000 年有所提升,达到最大 10.14%,植被覆盖度主要集中于(0.2,0.6],占比 70.67%,且下降明显,原因主要为经营模式,由民营改为国营,开采规模加大、自然营力作用效果未显现等原因造成植被覆盖度弱化。2020 年植被覆盖度(0,0.2]占比较 2010 年有所下降,达到 6.01%,植被覆盖度值主要集中于(0.4,0.8],占比 65.33%,(0.6,0.8]占比提升 16.97%,(0.8,1.0]占比 13.49%,提升 8.30%,自身修复的作用效果明显。综上所述,自然恢复下植被覆盖度可恢复到开采前状态。

3 塌陷裂缝恢复模型

3.1 模型建立

本研究只针对塌陷裂缝中的边缘裂缝自然愈合模型展开讨论。张黎明^[5]在山西黄土高原煤矿区研究了裂缝愈合机理及愈合模型,并得到有效印证。研

究区地形起伏较大,切割严重,地表大部分为黄土,黏聚性较差,植被覆盖度较低等导致土壤侵蚀严重。当边缘裂缝处于高程相对低位置时,周边高程相对高处流失土壤将会流向边缘裂缝,进而对边缘裂缝进行填埋。由此,土壤侵蚀造成的水土流失是边缘裂缝愈合的物质来源。边缘裂缝恢复闭合时间为

$$T = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

式中: T 为裂缝恢复时间, a; Q 为裂缝年获物源量, $a \cdot m^3$; V 为裂缝体积, m^3 。

简化裂缝形态,裂缝呈现完美的“V”模型为

$$V = \int \frac{\Delta L \cdot \Delta W \cdot \Delta D}{2} = \frac{L \cdot W \cdot D}{2} \quad (2)$$

式中: ΔL 为裂缝长度, m; ΔW 为裂缝宽度, m; ΔD 为裂缝深度, m; L 为裂缝平均长度, m; W 为裂缝平均宽度, m; D 为裂缝平均深度, m; L 为裂缝平均长度, m。

$$Q = \int \Delta S \cdot \Delta p = \sum S \cdot p(x, y) \quad (3)$$

式中: S 为单位栅格面积, hm^2 ; $p(x, y)$ 为某一点的土壤侵蚀模数, $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

综合上述分析,裂缝自然恢复时间模型为

$$T = \frac{L \cdot W \cdot D}{2 \sum S \cdot p(x, y)} \quad (4)$$

3.2 基于 RUSLE 的物源计算

3.2.1 侵蚀模数

RUSLE 适用于流域一年土壤流失量的规模估算^[20-21]。以研究区罐子沟—房塔沟流域为背景计算(含括研究区),物源计算模型以 6 个因子的乘积形式量化土壤侵蚀,方程式表达为

$$A = R \cdot K \cdot L_s \cdot C \cdot P \quad (5)$$

式中: A 为单位面积上的年均土壤流失量, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; L_s 为坡长坡度因子, C 为植被覆盖—管理因子; P 为水

土保持措施因子。
根据土壤侵蚀模数公式(5), 利用 ArcGIS 软件对各因子图件(图 11(a) — (e)) 相应处理后叠加, 得到土壤侵蚀模数图(图 11(f))。

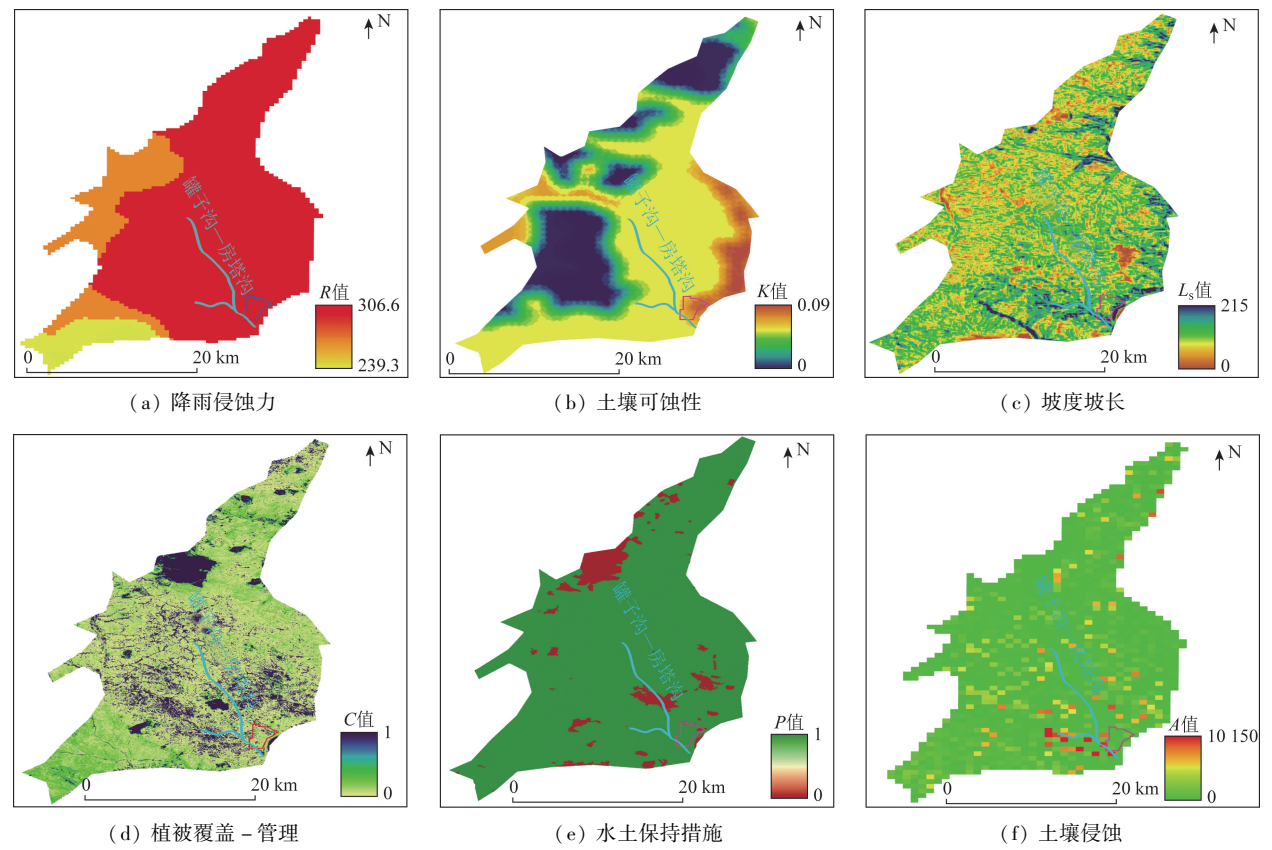


图 11 土壤侵蚀模数各因子

Fig. 11 Various factors of soil erosion modulus

3.2.2 物源供给面积

基于 DEM 数据, 利用 D8 法栅格流向判断, 借助 Flow Direction 工具进行栅格汇流分析(图 12), 统计裂缝栅格个数, 裂缝的物源供给面积等于物源栅格总数的集合。物源供给面积 = 栅格总数 × 像

元面积。
3.2.3 恢复时间
选择研究区 5 条长期监测的边缘裂缝(图 3) 作为模拟计算, 其中裂缝④目前没有完全愈合, 具体模拟数值见表 3。

表 3 研究区各裂缝自然恢复估计时间

Tab. 3 Estimated time of natural restoration for each fracture in the study area

编号	L/m	$\bar{W}/m$	$\bar{D}/m$	物源供给面积/ hm^2	侵蚀模数/ $[t \cdot (hm^{-2} \cdot a^{-1})]$	模拟恢复时间/a	监测恢复时间/a	误差比例/%
①	138	0.50	5.0	1.984 38	15.277 5	9.10	7.2	26.4
②	122	0.60	3.0	2.468 75	33.941 1	2.09	2.0	-30.0
③	62	0.30	3.5	0.125 00	51.218 8	8.13	6.0	35.5
④	99	0.26	1.5	0.078 13	15.277 5	26.22	4.0	555.5 *
⑤	64	0.45	2.2	0.039 19	881.650 0	1.47	1.5	-2.0

注: * 为监测未愈合模型。

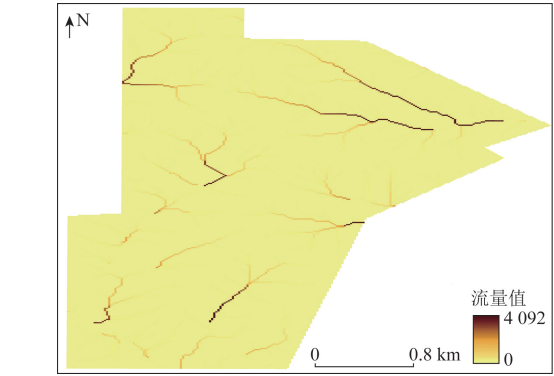


图 12 研究区流量分析

Fig. 12 Flow analysis of the study area

由表 3 中可知,规模、侵蚀模数、物源供给面积决定了边缘裂缝的自然恢复时间,5 条边缘裂缝自然恢复时间跨度较大,为 1.5 ~ 26.2 a。根据裂缝自然恢复时间计算结果可知,最大误差比为 555.5%,原因为该裂缝未愈合,监测时间不能代表实际恢复时间,无参照价值,剔除。剔除异常数据之后,最大误差比例为 -30%,最小为 -2%,平均误差比例为 23.56%,模型计算精度为 76.44%。

4 植被修复方案设计

基于现场调查,黄土高原丘陵沟壑区煤炭地下开采的土地生态存在自然修复,且自然修复的作用明显。因此,研究区生态修复应该以自然恢复为目标,充分利用自然修复的作用,尽量避免二次甚至多次扰动,以少扰动、低投入、可持续的方式进行修复,避免大工程、高投入,甚至园林式的修复。基于塌陷裂缝的分区特性,有针对性的开展分区修复,主要设计方案为自然封闭修复、轻度人工干预修复、中度人工干预修复和重度人工干预修复(图 13)。

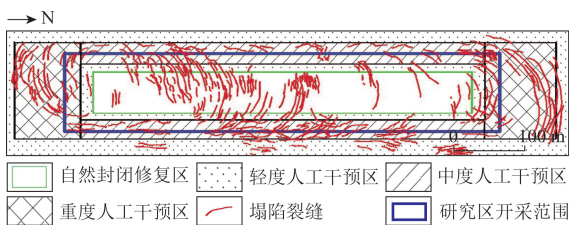


图 13 研究区修复分区示意图

Fig. 13 Restoration zoning diagram of the study area

自然封闭修复主要在动态裂缝区域,主要以自然恢复为主要措施,实现封闭修复模式。研究区停采后,在塌陷区域设置警示牌、架设栏网等简易措施,严禁放牧或动用大工程平整、削坡处理。在土地裸露或者植被覆盖度非常低的地区,可以适当的种植紫花苜蓿、沙打旺等植物。

轻度人工干预修复主要分布在研究区最外围及内部区域,该区域裂缝呈直线型,裂缝宽度较小,未形成错台或形成的错台较低,地形地貌基本保持原来状态。此区域长期处于拉伸状态,土壤含水量散失程度较低,自然状态下短时间难以充填,需以人工铁锹就地回填平整。此区域低洼沟谷处无需人工干预修复。

中度人工干预修复主要分布于边缘裂缝区域

两侧,含直线型裂缝及弧形裂缝,此区域裂缝相对集中分布,部分地区植被破坏严重。此区域的修复以人工铁锹就地回填平整为主,该回填方式的工程量小,基本保持了土壤理化性质。在宽、长、深、错台较高的塌陷裂缝区域,必要时采用机械推平的方式。

重度人工干预修复主要分布于边缘裂缝区域两端,主要以弧形裂缝为主,裂缝密集分布,土壤含水量散失程度增大,修复方法主要为以机械推平的方式为主,人工铁锹就地回填平整为辅,机械推平区域采取土壤改良 + 植物配种的后期修复模式。土壤改良是指研究区裂缝发育导致土地受损,土壤含水量散失较快,植物存活难度大,自我修复难度就大,为保证植被成活率,在原有土壤的基础上改良土壤成分,促进植物根系快速生长。植物配种指在人工干预工程之后,原有的植被不复存在,为保证优势物种生长,先种植先锋物种,采取适合研究区生长的植被,优选沙棘、锦鸡儿等灌木物种配合草木樨、沙打旺、紫花苜蓿等草本。适当种植油松、旱柳、白桤等乔木。

5 结论

(1)黄土丘陵沟壑区塌陷呈现分区特征:动态裂缝区愈合效果明显,1 a 自然恢复率为 86%;边缘裂缝区存在一定的自然修复,但短时间难以愈合。采空塌陷对土壤含水量具备一定的影响,对边缘裂缝周边土壤含水量影响最大,自然恢复下,植被覆盖度、土壤容重均可恢复到开采前状态。

(2)基于 RUSLE 模型的边缘裂缝恢复时间模拟,5 条边缘裂缝模拟自然恢复时间跨度较大,为 1.5 ~ 26.2 a,平均误差比例 23.56%,模型计算精度为 76.44%。规模、侵蚀模数、物源供给面积决定了边缘裂缝的自然恢复时间。

(3)研究区自然修复呈分区特性,应基于自然有针对性地开展分区修复。在动态裂缝区开展自然封闭修复,在边缘裂缝区开展人工干预修复。受损严重区域进行土壤改良,种植先锋物种,以灌草结合乔木辅之,优选沙棘、锦鸡儿等灌木物种,草本以草木樨、沙打旺、紫花苜蓿为主,适当种植油松、旱柳、白桤等乔木。

(4)裂缝自然恢复是个长期的过程,需要长期的监测来掌握恢复规律,今后应加强裂缝恢复监测

及长期自动化监测技术的研究。

致谢:感谢项目组全体成员在野外工作和室内整理过程中的大力支持,成文过程中得到准格尔旗云飞矿业有限责任公司以及串草圪旦煤矿领导的支持,同时衷心感谢审稿专家在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见!

参考文献(References):

- [1] 黎炜,陈龙乾,赵建林.我国煤炭开采对生态环境的破坏及对策[J].煤,2011,20(5):35-37.
Li W, Chen L Q, Zhao J L. Damage to the environment and countermeasures of coal mining on the ecological in China[J]. Coal, 2011, 20(5): 35-37.
- [2] 薛娟娟.复杂采煤条件下黄土高原矿区地面沉降和生态扰动研究——以轩岗采煤沉陷区为例[D].太原:太原理工大学, 2020.
Xue J J. Ground Surface Subsidence and Ecological Disturbance in the Mining Area of Loess Plateau with Complex Environments: A Case Study from Xuangang Coal Mining Subsidence Area[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020.
- [3] 汪云甲.矿区生态扰动监测研究进展与展望[J].测绘学报, 2017, 46(10): 1705-1716.
Wang Y J. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1705-1716.
- [4] 朱松丽.我国煤炭开采生态环境保护相关政策措施评述[J].煤, 2007, 16(12): 1-4.
Zhu S L. Review on policies and measures related to ecological environment protection in coal mining industry[J]. Coal, 2007, 16(12): 1-4.
- [5] 张黎明.山西黄土高原矿区关键扰动的自然修复机理研究[D].徐州:中国矿业大学, 2017.
Zhang L M. Study on the Mechanisms of Natural Restoration of Main Land Disturbances in Shanxi Loess Plateau Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [6] 李裕元, 邵明安.黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究[J].应用生态学报, 2005, 16(12): 2321-2327.
Li Y Y, Shao M A. Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2321-2327.
- [7] 王国梁, 刘国彬, 常欣, 等.黄土丘陵区小流域植被建设的土壤水文效应[J].自然资源学报, 2002, 17(3): 339-344.
Wang G L, Liu G B, Chang X, et al. A study on the effect of soil water on vegetation rehabilitation in watershed of loess hilly area[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 339-344.
- [8] 郭忠升, 邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [9] 胡振琪, 赵艳玲.矿山生态修复面临的主要问题及解决策略[J].中国煤炭, 2021, 47(9): 2-7.
Hu Z Q, Zhao Y L. Main problems in ecological restoration of mines and their solutions[J]. China Coal, 2021, 47(9): 2-7.
- [10] 田学斌.走出基于自然的生态文明之路[N].北京日报, 2018-11-05(013).
Tian X B. Walking out the road of ecological civilization based on nature[N]. Beijing Daily, 2018-11-05(013).
- [11] 李全生, 郭俊廷, 张凯, 等.西部煤炭集约化开采损伤传导机理与源头减损关键技术[J].煤炭学报, 2021, 46(11): 3636-3644.
Li Q S, Guo J T, Zhang K, et al. Damage conduction mechanism and key technologies of damage reduction in sources for intensive coal mining in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3636-3644.
- [12] 李全生, 贺安民, 曹志国.神东矿区现代煤炭开采技术下地表生态自修复研究[J].煤炭工程, 2012, 44(12): 120-122.
Li Q S, He A M, Cao Z G. Research on surface ecological self-restoration under modern coal mining technology in Shendong Mining area[J]. Coal Engineering, 2012, 44(12): 120-122.
- [13] 薛皓, 肖春蕾, 郭艺璇.基于自然的解决方案对中国生态保护修复工作的启示[J].中国地质调查, 2021, 8(6): 96-104.
Xue H, Xiao C L, Guo Y X. Nature-based Solutions implications for the ecological conservation and restoration in China[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 96-104.
- [14] 胡振琪, 龙精华, 王新静.论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J].煤炭学报, 2014, 39(8): 1751-1757.
Hu Z Q, Long J H, Wang X J. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1751-1757.
- [15] 聂洪峰, 肖春蕾, 任伟祥, 等.生态地质研究进展与展望[J].中国地质调查, 2021, 8(6): 1-8.
Nie H F, Xiao C L, Ren W X, et al. Progress and prospect of ecological research[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(6): 1-8.
- [16] 王丽, 雷少刚, 卞正富.系统视角下中国西部煤炭开采生态损伤与自然修复研究综述[J].资源开发与市场, 2017, 33(10): 1188-1192.
Wang L, Lei S G, Bian Z F. Review on study of ecological damage and natural recovery in the coal mining subsidence area in western China[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(10): 1188-1192.
- [17] Lehman C L, Tilman D. Biodiversity, stability, and productivity in competitive communities[J]. The American Naturalist, 2000, 156(5): 534-552.
- [18] 秦越强, 王志民, 周业泽, 等.准格尔旗煤炭矿集区生态环境问题与修复措施[J].现代矿业, 2021, 37(6): 169-174.
Qin Y Q, Wang Z M, Zhou Y Z, et al. Ecological environment prob-

lems and restoration measures in Zhungeer coal mining area[J].
Modern Mining,2021,37(6):169–174.

[19] 何国清,杨伦,凌赓娣,等. 矿山开采沉陷学[M]. 徐州:中国
矿业大学出版社,1991.
He G Q,Yang L,Ling G D,et al. Science of Mining Subsidence[M].
Xuzhou:China University of Mining and Technology Press,1991.

[20] 李庆和. 基于 GIS 和 USLE 的准格尔旗土壤侵蚀量估算[J].
水土保持应用技术,2018(4):16–18.

Li Q H. Estimation of soil erosion in Junge Banner based on GIS
and USLE [J]. Technology of Soil and Water Conservation,
2018(4):16–18.

[21] 崔雪梅. 内蒙古黄土丘陵区土壤侵蚀研究——以准格尔旗为
例[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
Cui X M. The Research on the Soil Erosion of Zhungeer County in
Loess Hilly Region of Inner Mongolia[D]. Hohhot:Inner Mongo-
lia Agricultural University,2012.

Natural restoration in the loess hilly and gully region under the
disturbance of underground coal mining

WANG Zhimin, YUE Xineng, QIN Yueqiang, CHAI Chenhui, SUN Yufei, FENG Xin
(Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, Tianjin 300301, China)

Abstract: As an important energy base, Ordos is part of the Loess Plateau and has a very fragile ecosystem. A large number of open – pit mines, spoil heaps and subsidence areas have been created with the large – scale coal mining. Chuancaogedan coal mine in Zhungeer Banner was selected as the research object to study the natural restoration effect and methods of collapse fractures in the coal underground mining – induced subsidence areas in loess hilly and gully region. Remote sensing interpretation, soil measurement and other means were used to construct a natural recovery model of edge cracks, based on revised universal soil loss equation (RUSLE). The natural restoration characteristics of collapse fractures were studied and restoration suggestions were put forward. The results show that the collapse areas in loess hilly and gully region have zonal characteristics. The dynamic fractures area could basically recover within one year under natural restoration, and the restoration effect is good. The natural restoration effect of the edge crack area is poor and it is difficult to recover for a long time, with the longest simulated restoration time reaching 26.2 years. The research shows that the restoration of collapse areas should adopt a nature – based zonal restoration method. The research results could provide references for the restoration and governance of collapse fractures caused by underground mining in loess hilly and gully region.

Keywords: underground mining; dynamic fracture; marginal fracture; natural restoration; RUSLE model
(责任编辑:王晗)