

榆林石圪台矿山典型采煤活动对土壤和植被的影响

郝新忠^{1,2}, 石长春^{1,2}, 高振梁¹, 高荣^{1,2}, 张瑞丽¹, 张继平^{1,2}, 马雅莉¹, 乔一娜¹

(1. 陕西省林业科学院, 陕西 西安 710000; 2. 陕西榆林毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 陕西 榆林 719000)

摘要: 为探究陕北典型采煤扰动生境(矸石场、裂缝区、塌陷区)土壤-植被系统的受损特征,以神木市石圪台矿山为研究对象,系统分析了典型采煤扰动生境土壤理化性质及植被生物学指标的变化。结果表明:(1)与对照(未采煤区)相比,矸石场、裂缝区和塌陷区土壤物理性质表现出退化趋势,土壤含水率、硬度均有所下降,电导率和容重上升,其中矸石场、裂缝区的土壤含水率与对照达到显著性差异水平($P < 0.05$);(2)与对照相比,采煤扰动生境土壤养分含量均显著低于对照($P < 0.05$),与对照相比,矸石场、裂缝区及塌陷区的土壤有机质含量分别降低了30.36%、27.38%、37.5%,速效氮含量分别降低了34.92%、37.77%、26.13%;(3)与对照相比,在矸石场、裂缝区以及塌陷区过氧化氢酶分别降低了59.77%、43.68%及51.72%,碱性磷酸酶分别降低3.77%、32.83%、28.78%;(4)与对照相比,矸石场、裂缝区以及塌陷区的植被物种数、密度(乔木)、盖度(草本和灌木)及生物量均显著低于对照($P < 0.05$),其中塌陷区的物种数、密度(乔木)、盖度(草本和灌木)及生物量降幅最大,分别为45.59%、25.69%、35.66%和55.79%。主成分分析结果表明,塌陷区的综合得分最低,为1.639,受损最为严重。本研究结果可为北方采煤区土壤植被系统有效恢复提供一定的科学依据。

关键词: 石圪台矿山; 采煤活动; 土壤; 植被; 影响

中图分类号: S731.6; TD88 文献标志码: A 文章编号: 1001-3776(2023)05-0027-07

Impact of Typical Coal Mining on Soil and Vegetation in Shigetai Mine of Yulin

HAO Xinzong^{1,2}, SHI Changchun^{1,2}, GAO Zhenliang¹, GAO Rong^{1,2}, ZHANG Ruili¹, ZHANG Jiping, MA Yali¹, QIAO Yina¹

(1. Shaanxi Academy of Forestry Sciences, Xi'an 710000, China; 2. National Positioning Observation and Research Station of Maowusu Sandy Land Ecosystem of Shaanxi, Yulin 719000, China)

Abstract: During July and August 2022, soil samples were collected in coal mining habitats including barrow, crack zone and subsidence trough in Shigetai Mine of Shenmu, Shaanxi province, and investigations were implemented on vegetation in the same sites. The results showed that compared with the control (mining area), the soil physical properties of barrow, crack zone and subsidence trough showed degradation trend, with a decrease in soil moisture content and hardness, and an increase in electrical conductivity and bulk density. The soil moisture content in barrow and crack zone had significant difference with that in the control ($P < 0.05$). The content of soil organic matter and nutrient in coal mining habitats was significantly lower than that in the control ($P < 0.05$). Compared with the control, catalase in barrow, crack zone and subsidence trough decreased by 59.77%, 43.68% and 51.72%, and alkaline phosphatase by 3.77%, 32.83% and 28.78%. Compared with the control, the number of vegetation species, arbor density, herb and shrub coverage and biomass of vegetation in barrow, crack zone and subsidence trough was significantly lower ($P < 0.05$). The

收稿日期: 2023-04-04; 修回日期: 2023-08-09

基金项目: 陕西省林业科学院科技创新项目“陕北采煤沉陷区地表受损规律与植被恢复调控”(SXLK2020-0205)

作者简介: 郝新忠, 高级工程师, 从事生态修复和荒漠化防治研究; E-mail: 15109121958@163.com。通信作者, 石长春, 正高级工程师, 从事沙漠治理、生态监测研究; E-mail: 468058917@qq.com。

number of species, arbor density, herb and shrub coverage and biomass in the subsidence trough decreased by 45.59%, 25.69%, 35.66% and 55.79%. Principal component analysis indicated that the comprehensive evaluation of subsidence trough was the lowest, only 1.639.

Key words: Shigetai Mine; coal mining; soil; vegetation; influence

煤炭作为我国重要的一次性能源,在我国能源结构中一直占有主导地位^[1]。陕西省榆林市榆阳、神木、府谷矿区作为我国储量超十亿吨的巨型煤田之一,其探明储量占全国的 12%^[2]。近年来,榆阳、神木、府谷矿区原煤总产量几乎以每年 10×10^6 t 以上的速度递增。然而,数十年的大规模开发使得当地矿区生态已经成为亟待解决的环境问题,成为矿区可持续发展与黄土高原生态文明示范区建设的重大制约因素^[3]。目前,我国煤矿主要以井工开采为主,会形成大范围采空区,地表塌陷并产生大量裂缝^[4],进而带来一系列生态环境问题,如土地退化、地下水位下降、严重干扰植被的发育与演替过程等^[5-7]。

国内外学者针对采煤区对生态环境的影响开展了诸多研究,如采煤塌陷裂缝、土壤理化性质的变化、植被群落的变化等。臧荫桐等^[8]认为,地下采煤活动会引起大量裂隙,增加土壤水分的蒸发强度,严重制约采煤区植被的正常生长。原一哲^[9]对地下采煤引起的土体性质变化进行了研究,为矿区煤炭开采引起的地表损害及分析提供了理论指导。张锦瑞等^[10]认为,采煤塌陷导致土壤有机质及养分含量降低,影响有机物的分解、淋溶和沉积。朱丽等^[11]对排渣场和塌陷区进行了研究,总结出草地、林地的复垦适宜性程度。Li^[12]认为植被自然恢复对于采煤区生境改良效果最好,而土壤质量是植被演替及生态恢复的决定因子^[13],因此,研究采煤区不同生境下土壤理化性质及植被特征是矿区生态环境修复的理论基础。前人对采煤区土壤、植被的变化进行了一系列研究,但大多数局限于单种地貌,得出的结果也不尽相同,以不同采煤扰动生境为研究对象的探索较少。

本研究针对榆林石圪台采煤塌陷区,探究矿区典型采煤扰动生境土壤理化性质及植被生物学指标的变化,以期对采煤区生态环境恢复提供一定的理论支撑。

1 研究区概况

研究区石圪台矿山位于陕西省神木市石圪台村,地理坐标为 $36^{\circ}16' \sim 39^{\circ}17' \text{ N}$, $109^{\circ}12' \sim 110^{\circ}13' \text{ E}$,北临毛乌素沙地,南接黄土高原,是风沙地貌向黄土丘陵地貌的过渡带。研究区域的气候属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,海拔为 1 100 ~ 1 200 m,风沙频繁,冷热多变,年平均气温为 8.4° C ,年均蒸发量为 1 892.4 mm,年平均降水量为 415.7 mm,年平均风速为 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。矿山南北长约为 8.4 km,东西宽约为 8.5 km,总面积为 65.25 km^2 ,矿井采用连续采煤机掘进,长臂后退式综合机械化开采方式。其中,井田范围内塌陷区面积为 250.75 hm^2 ,地表裂缝面积为 6.69 hm^2 ,煤矿排矸场边坡面积约 6 hm^2 ,由于煤矿井下采煤机采煤后支架前移,支架后方的岩层冒落,开采几十米后,就会在支架后方形成较大采空区。采空区上方各岩层在重力作用下,相继发生离层、向下弯曲、裂缝扩展等,甚至断裂后冒落到采空区。随着开采范围的不断扩大,若不及时采取充填等措施,地面上就会形成塌陷区,受此影响,塌陷区周围还会出现很多的裂缝,形成裂缝区,同时,在煤层中夹杂着“黑石头”,这种“黑石头”含煤量极少,不能利用,将其运出煤田堆积在空旷地带形成矸石场。矿区大地构造单元属华北地台鄂尔多斯地块,土壤类型以沙土为主。矿山植被属温带南部草原亚带黄土高原中东部草原亚区。由于煤炭的大量开采与畜牧业的强度利用,自然植被几乎损毁无遗,植被稀疏低矮,植物种类比较贫乏,土地趋于沙化,只有在黄土丘陵区坡度较大的坡顶或侵蚀沟壑内残存着少量的自然植被痕迹,同时受非地带性生态环境的影响,植物种类单一,其地带性植被为典型草原。群落结构简单,主要建群植物有小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla*、中间锦鸡儿 *C. intermedia*、百里香 *Thymus mongolicus*、艾 *Artemisia argyi*、针茅 *Stipa capillata* 等。其中,乔木树种主要有油松 *Pinus tabulaeformis*、杨树 *Populus* sp.、柳树 *Salix* sp.、榆树 *Ulmus pumila* 等;灌木主要有柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii*、沙棘 *Hippophae rhamnoides*、乌柳 *Salix cheilophila* 等;人工牧草主要有草木樨 *Melilotus officinalis*、紫苜蓿 *Medicago sativa* 和斜茎黄耆 *Astragalus adsurgens* 为建群种的沙生植被组合。

2 材料与方法

2.1 样地设置

在研究区中选择矸石场、裂缝区和塌陷区 3 种不同采煤扰动生境, 每种地貌选择 3 块土壤条件相近的地块作为采样地, 同时选择一块邻近、下垫面状况一致的未采煤区样地作为对照。于 2022 年 7—8 月进行土壤取样与植被调查。

2.2 试验方法

2.2.1 植被调查和取样方法 每个样地包含 3 个重复样方, 样方大小草本层样方为 3 m×3 m, 灌木层样方为 6 m×6 m, 乔木层样方为 10 m×10 m。其中, 草本层和灌木层调查每个样方内的物种及其数量和盖度等, 乔木层调查每个样方内的物种及其数量、冠幅和密度等并剪取主要物种地上生物量, 带回实验室, 105 ℃下烘干称量。土壤样品利用土钻按照“S”形法选择 3 个点取土。

2.2.2 理化指标测定 (1) 土壤物理性质测定: 土壤容重测定采用环刀法; 土壤含水率测定采用烘干法; 土壤硬度测定用土壤硬度计。(2) 土壤化学性质测定: 土壤有机质含量测定用重铬酸钾法; 土壤全氮含量测定用半微量开氏法; 速效氮含量测定采用碱解扩散法; 全磷含量测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法; 速效磷含量测定采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法; 全钾含量测定采用 HF 酸消解-火焰光度计法; 速效钾含量测定采用 NH₄COOH 浸提-火焰光度计法; 土壤酸碱度用 pH 计测定。(3) 土壤酶活性测定: 蔗糖酶活性测定用 3, 5-二硝基水杨酸比色法; 脲酶活性测定用比色法; 碱性磷酸酶活性测定用磷酸苯二钠比色法; 过氧化氢酶活性测定利用紫外分光光度法。

2.3 数据处理及分析方法

数据采用 SPSS 23 软件进行统计分析, 结果用平均值±标准偏差(SD)表示, 差异显著性水平为 $P<0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 典型采煤扰动生境土壤物理性质

由表 1 可以得出, 不同采煤扰动生境的土壤物理性质均有一定的退化趋势, 与对照相比, 矸石场、裂缝区以及塌陷区的土壤含水率、硬度均有所下降, 电导率和容重上升。其中, 对照的土壤含水率显著高于矸石场和裂缝区 ($P<0.05$), 相较对照, 矸石场和裂缝区的土壤含水率分别降低了 14.10%和 6.04%。但由于塌陷区和裂缝区地质较为疏松, 其土壤孔隙度均高于对照。综上所述, 采煤扰动不同生境土壤的物理性质、土壤含水率以及硬度低于未采煤区; 电导率和容重高于未采煤区; 土壤孔隙度(除矸石场外)高于未采煤区。

表 1 典型采煤扰动生境土壤物理性质
Tab. 1 Physical properties of soil in typical coal mining habitat

指标	对照	矸石场	裂缝区	塌陷区
含水率/%	5.46±0.16 a	4.69±0.20 b	5.13±0.17 b	4.74±0.16 a
电导率/(ms·m ⁻¹)	9.29±0.32 b	9.35±0.05 b	10.56±0.42 b	13.26±0.24 a
孔隙度/%	42.26±3.10 a	41.51±2.19 a	43.02±1.43 a	43.15±2.47 a
容重/(g·cm ⁻³)	1.43±0.04 ab	1.55±0.03 a	1.51±0.03 ab	1.48±0.02 b
硬度/(kg·cm ⁻²)	2.23±0.06 ab	2.12±0.13 a	1.95±0.16 ab	1.82±0.11 b

注: 同一行不同小写字母表示不同地貌类型差异显著 ($P<0.05$); 下同。

3.2 典型采煤扰动生境土壤养分含量变化

由表 2 可以得出, 典型采煤扰动生境土壤养分含量均低于对照, 其中有机质、速效氮、速效磷及全钾含量与对照中的含量达到显著性差异水平 ($P<0.05$), 相较于塌陷区, 对照土壤有机质、速效氮、速效磷及全钾含量分别提升 60.00%、35.37%、10.15%及 6.19%。与对照相比, 裂缝区和塌陷区土壤 pH 显著升高 ($P<0.05$),

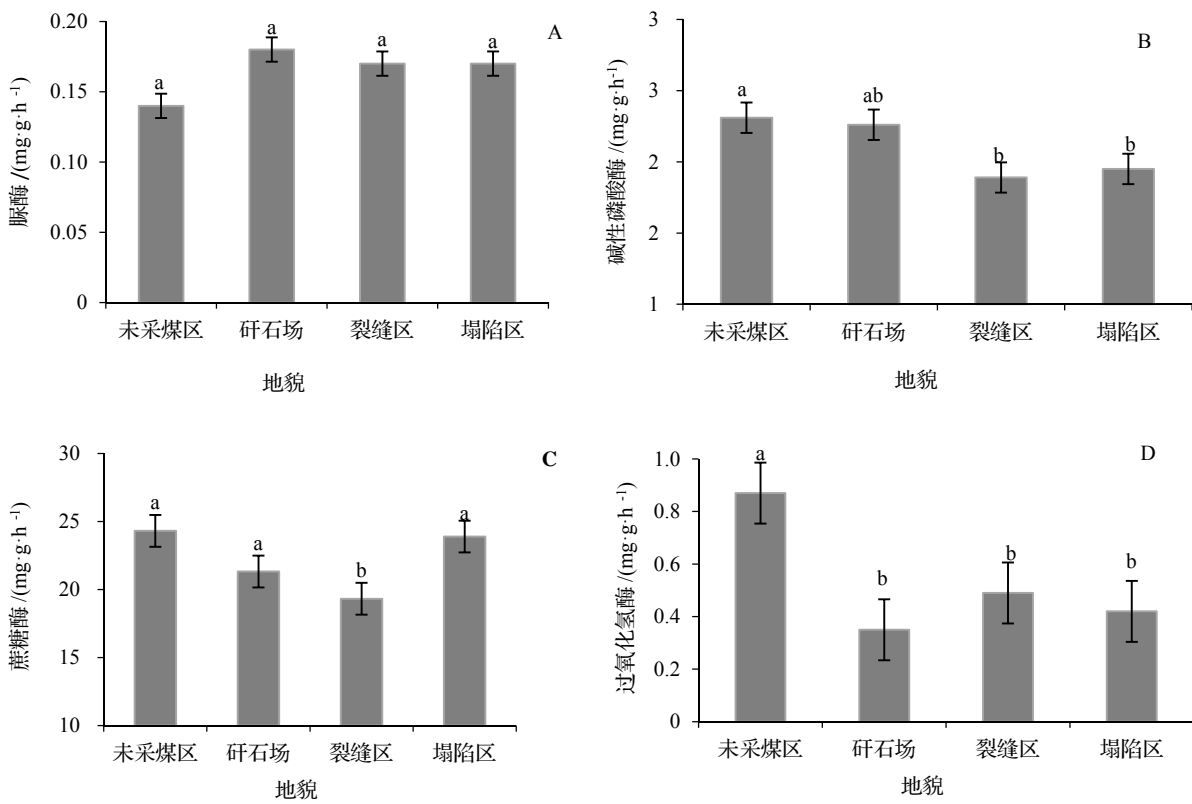
分别比对照提高了 7.89%、7.16%，矸石场的土壤 pH 略有升高，比对照高 0.49%。对照土壤全氮、全磷、速效钾含量也均高于矸石场、裂缝区以及塌陷区土壤，但均未达到显著差异水平。综上所述，采煤后所形成的矸石场、裂缝区以及塌陷区土壤养分含量均低于对照。

表 2 典型采煤扰动生境土壤养分含量
Tab. 2 Soil organic matter and nutrient content in typical coal mining habitat

指标	对照	矸石场	裂缝区	塌陷区
pH	8.17±0.15b	8.21±0.20b	8.80±0.15a	8.87±0.36a
有机质/(g·kg ⁻¹)	1.68±0.25a	1.17±0.22b	1.22±0.17b	1.05±0.11b
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.15±0.04a	0.13±0.03a	0.14±0.04a	0.11±0.02a
速效氮/(mg·kg ⁻¹)	18.64±2.33a	12.13±0.31b	11.60±0.66b	13.77±1.73b
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.31±0.08a	0.24±0.05a	0.18±0.08a	0.18±0.04a
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	5.21±0.28a	3.70±0.35b	3.87±0.27b	4.73±0.23a
全钾/(g·kg ⁻¹)	14.16±0.80ab	13.43±0.79a	12.86±1.02b	12.32±0.48b
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	74.54±4.87a	68.33±2.36a	25.67±2.49b	73.67±5.53a

3.3 典型采煤扰动生境土壤生物学性质

由图 1 可得出,不同采煤扰动生境的土壤酶活性均有一定变化,其中部分指标达到显著性差异水平($P < 0.05$)。与对照相比,矸石场、裂缝区以及塌陷区的土壤脲酶活性均有所提升,分别增加 28.57%、21.43%和 21.48%。对照土壤的碱性磷酸酶、蔗糖酶以及过氧化氢酶活性相较于矸石场、裂缝区以及塌陷区均有一定的提升,其中土壤过氧化氢酶活性的提升达到统计学显著性差异水平。相较于对照,矸石场、裂缝区以及塌陷区过氧化氢酶分别降低了 59.77%、43.68%及 51.72%。综上所述,与对照相比,矸石场、裂缝区以及塌陷区土壤的碱性磷酸酶、蔗糖酶以及过氧化氢酶活性均有一定的下降,脲酶活性则有所提升。



注：图中小写字母 a、b、c、d 表示不同地貌类型差异显著 ($P < 0.05$)；下同。

图 1 典型采煤扰动生境土壤生物学性质
Fig. 1 Soil biological properties of typical coal mining habitat

3.4 典型采煤扰动生境植被特征

由图 2 可以得出, 与对照相比, 矸石场、裂缝区以及塌陷区的植被均受到一定程度的破坏, 其物种数、密度(乔木)、盖度(草本和灌木)及生物量均低于对照的, 并达到显著性差异水平($P < 0.05$)。矸石场、裂缝区及塌陷区的植被情况逐渐变差, 其中以塌陷区最差。与对照相比, 塌陷区的物种数、密度(乔木)、盖度(草本和灌木)和生物量分别降低了 45.59%、25.69%、35.66%和 55.79%。说明采煤后产生的矸石场、裂缝区以及塌陷区对植被影响较大, 其中塌陷区最为显著。

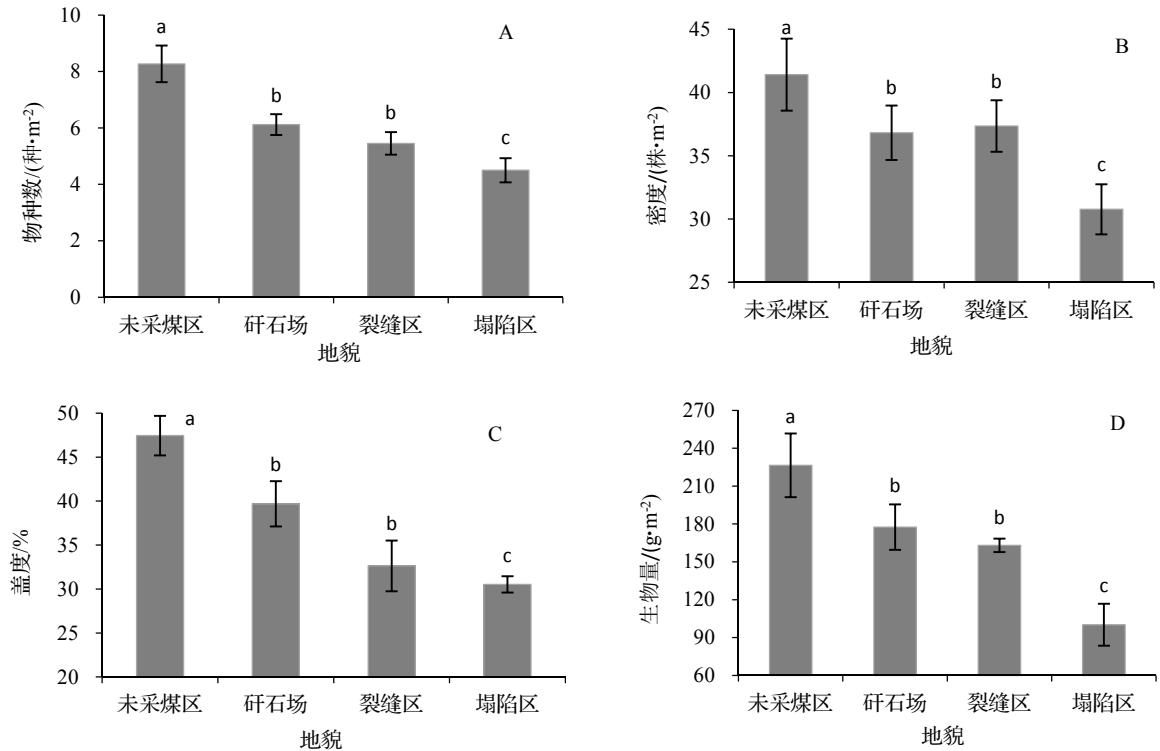


图 2 典型采煤扰动生境植被特征
Fig. 2 Vegetation characteristics of typical coal mining habitat

3.5 建立综合评价体系

由上述分析可得, 未采煤区、矸石场、裂缝区以及塌陷区对土壤物理、化学及植被生理指标均有影响, 本研究利用主成分分析和加权计算, 建立综合评价体系, 通过得分情况说明采煤区不同地貌对当地生态环境的影响程度。

3.5.1 改良效果评价指标相关性分析 运用因子分析法对不同采煤扰动生境土壤质量进行评价, 结果见表 3。

表 3 旋转因子载荷矩阵
Tab. 3 Rotation factor load matrix

指标	F ₁	F ₂	F ₃	指标	F ₁	F ₂	F ₃
含水率	-0.350	0.934	-0.073	速效钾	0.281	0.481	0.831
电导率	-0.868	0.477	0.137	脲酶	-0.603	-0.741	0.295
孔隙度	-0.816	0.555	-0.159	蔗糖酶	0.210	0.832	0.513
容重	0.815	-0.557	0.159	碱性磷酸酶	0.891	0.021	0.453
硬度	0.805	-0.572	0.157	过氧化氢酶	0.676	0.644	-0.357
土壤酸碱度	-0.936	0.127	-0.329	物种数	0.968	0.225	-0.113
有机质	0.861	0.414	-0.294	密度	0.912	-0.061	-0.405
全氮	0.708	-0.283	-0.647	盖度	0.981	0.172	0.094
速效氮	0.626	0.779	0.038	生物量	0.969	-0.046	-0.244
全磷	0.949	0.275	0.153	特征根	12.080	6.410	2.510
速效磷	0.249	0.967	0.044	方差贡献率/%	57.530	30.510	11.950
全钾	0.587	-0.709	0.390	累计方差贡献率/%	57.530	88.040	99.990

由表 3 表明,提取 3 个主成分,各样本方差的累计贡献率为 99.9%,因此可以用这 3 个主成分代表 21 个指标。由表 3 可知,物种数、密度、盖度及生物量在 F_1 上数值较高,代表植被生长状况;含水率、速效磷在 F_2 上数值较高,代表了土壤的理化性质;全氮、蔗糖酶和碱性磷酸酶在 F_3 上数值较高,代表土壤的化学性质以及酶活性。

3.5.2 综合评价 综合计算不同地貌主成分的得分,同时将各因子特征值的贡献率作为权重进行加权求和,可得到不同采煤扰动生境下的土壤-植被综合评价得分情况,见表 4。从表 4 结果可知,按综合得分排名,第一名为未采煤区,第二名为矸石场,第三名为裂缝区,第四名为塌陷区。这充分说明,采煤对生态环境破坏程度越大综合得分越低,通过综合评价得分高低这一指标,为地方政府治理采煤区生态环境提供决策依据。

表 4 典型采煤扰动生境主成分及综合得分排名
Tab. 4 Ranking of principal components and comprehensive evaluation of typical coal mining habitats

不同地貌	F ₁		F ₂		F ₃		综合	
	得分	名次	得分	名次	得分	名次	得分	名次
未采煤区	4.078	1	2.305	1	-0.326	3	3.012	1
矸石场	1.355	2	-2.840	4	1.456	1	-0.062	2
裂缝区	-1.506	3	-1.423	3	-2.100	4	-1.311	3
塌陷区	-3.927	4	1.959	2	0.969	2	-1.639	4

4 讨论

榆林煤炭开采始于 20 世纪 80 年代,经过多年开发,对当地生态环境造成了极大破坏,导致地下水污染、土壤退化以及植被受损等一系列问题,严重制约了当地工农业生产和可持续发展^[16]。研究区的 3 种采煤扰动生境和未采煤区表层土壤相比均发生了不同程度的退化现象,同时含水率下降、孔隙度升高,这与其他研究采煤区土壤物理性质变化情况一致^[17]。在本研究中,塌陷区的土壤退化最为严重,这是由于研究矿区土壤以沙土为主,地表塌陷后土壤团聚体受到破坏,因此导致塌陷区土壤孔隙度增加、硬度下降^[18]。与未采煤区相比,采煤塌陷区土壤中的酶活性有所增强,碱性磷酸酶、蔗糖酶以及过氧化氢酶活性均降低,这与前人的研究结果基本一致^[19-20]。由于采煤后土壤的理化性质及酶活性均受到一定程度的损害,无法提供植被所需养分,导致植被物种数、盖度及密度下降,植被群落丰富度下降后,又会促使土壤理化性质的进一步退化^[21]。因此,在矿区生态恢复中,可以适当通过人工整治加速植被物种的恢复,反哺改良土壤理化性质,以增加地区植被与土壤间的耦合协调性,促进采煤区生态系统的修复质量。

5 结论

- (1) 典型采煤扰动不同生境土壤的含水率、硬度均低于未采煤区,其中未采煤区的土壤含水率显著高于矸石场和裂缝区 ($P < 0.05$),电导率和容重高于未采煤区,土壤孔隙度(除矸石场外)高于未采煤区。
- (2) 采煤后形成的矸石场、裂缝区及塌陷区,土壤的 pH 值高于未采煤区,土壤的有机质和养分含量均低于未采煤区。
- (3) 采煤后形成的矸石场、裂缝区以及塌陷区土壤酶活性与未采煤区相比均有一定下降,同时这些区域对土壤及植被造成不同程度的损害,其中塌陷区受损最为严重。
- (4) 采煤后的矸石场、裂缝区及塌陷区的植被物种数、密度(乔木)、盖度(草本和灌木)及生物量均显著低于未采煤区,其中塌陷区的物种数、密度(乔木)、盖度(草本和灌木)及生物量降幅最大。
- (5) 由主成分分析得知,采煤后的矸石场、裂缝区及塌陷区的主成分综合得分均低于未采煤区,且塌陷区的综合得分最低。
- (6) 榆林采煤塌陷区土壤疏松,更利于植物生长,所以在多数情况下塌陷区的植物多样性要强于未塌陷区的。

