

榆神府覆沙矿区采煤塌陷地表层土壤理化性质演变^①

杜华栋^{1,2}, 赵晓光^{1*}, 张勇³, 聂文杰¹

(1 西安科技大学地质与环境学院, 西安 710054; 2 西安科技大学煤炭绿色开采地质保障
技术研究所, 西安 710054; 3 陕西省水利厅, 西安 710004)

摘要:以榆神府覆沙矿区采煤塌陷地表层土壤为研究对象,运用野外调查取样和实验室分析检测方法,研究不同采煤塌陷年限下(1、2、5、10 a和未塌陷区)土壤理化性质演变特征,探讨采煤塌陷过程中土壤理化性质的响应及其机制。结果表明:与未塌陷地相比,采煤引起地表塌陷初期(1~2 a)土壤体积质量、硬度、黏粒含量、含水量、有机质、速效氮、速效钾、有效磷、全磷和全钾含量均有显著减小,而土壤孔隙度、pH和沙粒含量增加,全氮含量变化不明显,土壤质量总体表现出一定的退化趋势;塌陷区自然恢复条件下上述土壤指标在塌陷5 a后呈现出改善的趋势,其中土壤物理性质、全效养分和土壤水分指标恢复较快,在塌陷10 a后即可恢复至塌陷前水平;但土壤速效养分、pH和有机质经过10 a的土壤自修复仍未完全恢复,采煤塌陷对土壤质量的损害具有一定延续性。采煤塌陷后土壤质量演变过程分析表明,自然恢复条件下塌陷区土壤大体经过3个演替阶段,即退化期(塌陷后1~2 a)改善期(塌陷后5 a)部分恢复期(塌陷后10 a)。

关键词:榆神府矿区;采煤塌陷;土壤理化性质;演变规律;生态恢复

中图分类号:S153 **文献标识码:**A

目前我国一次性能源消费构成中煤炭占71.3%^[1],其中95%以上的煤炭采用井工开采方式。这种开采方式形成大范围的地下采空区,导致周围岩层发生复杂的移动变形,使上覆岩层发生冒落、裂隙和弯曲下沉,地表发生塌陷产生了大量的裂缝、裂隙^[2]。这种由采煤引发的地面塌陷带来一系列生态环境问题,如地下水渗漏、水资源污染、植被退化、土壤侵蚀加剧、土壤质量下降等^[3-5],其中土壤质量是决定矿区植被演替及生态恢复的决定性因子^[6],因此采煤塌陷后土壤质量变化成为矿区生态恢复的热点问题。

地处水蚀风蚀交错带的榆神府矿区煤层埋深浅、地质构造简单使得采空区地表塌陷严重^[7],其引起的地质灾害和水土资源损害,使原本已十分脆弱的生态环境进一步恶化。但采煤塌陷后土壤部分指标的变化趋势尚未有明确结论,如采煤塌陷地土壤含水量^[8-9]、孔隙度^[10-11]等变化,同时采煤塌陷后随时间的推移土壤理化性质的动态演替研究较为薄弱。本文以榆神府矿区的北部核心区井田为研究对象,通过该区覆沙地采煤塌陷区不同年限下土壤理化性质的动态变化研

究,在此基础上探讨采煤塌陷后土壤自然恢复条件下的演化过程,以期为矿区的环境治理和植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择在陕西省神木县北部榆神府矿区煤炭开采年限持续时间较长的大柳塔、活鸡兔、哈拉沟和上湾井田的地表塌陷区(110°00'~110°24'E, 39°11'~39°29'N)。该区属黄土丘陵地貌向风沙地貌的过渡带,海拔100~1300 m。区域年平均降水量415.0 mm,但主要集中在6—9月份且多为暴雨,占全年降水量的76%。年平均蒸发量1788.4 mm,年平均日照时间2875.9 h,年平均气温8.6℃,年平均风速3.2 m/s。矿区的土壤类型主要有栗钙土、粗骨土和风沙土等。研究区植被群落主要为以沙柳(*Salix psammophila*)、沙蒿(*Artemisia desterorum*)、羊柴(*Hedysarum laeve*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)为建群种的沙生植被组合。

该区含煤层呈平缓单斜构造,煤层埋深约为100 m。

基金项目:国家自然科学基金项目(41401306)、西安科技大学博士启动金项目(2014QDJ019)和陕西省水利厅水利科技项目(2015slkj-01)资助。

* 通讯作者(zxgsoil@sina.com.cn)

作者简介:杜华栋(1982—),男,陕西华县人,博士,讲师,主要从事矿山环境修复和植被水土保持机理方面研究。E-mail: dhuadong@gmail.com

煤炭开采方式主要采用综合机械化长臂式开采工艺，综采工作面长 200~400 m，采高 4 m，推进长度数千千米，工作面间留有 20~30 m 宽的护巷煤柱^[7]。随煤炭的大量开采，采空区上覆岩层发生了冒落、裂缝和弯曲等不同程度的采动损害，使得地表出现大裂缝和台阶状断裂，甚至出现塌陷坑。裂缝宽度在 10~50 cm 之间，垂直位移在 0~80 cm。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 样地设置 首先确定采煤后地表塌陷 1、2、5 和 10 a 坡面。每种塌陷年限选择 7 块下垫面状况(海拔、地形等)相近的塌陷地作为研究样地，同时每块样地选择一块邻近且下垫面状况相似、没有受到塌陷影响的对照样地。测定样地 0~60 cm 土层土壤理化性质，每块样地随机选择 5 个点分别取样。

1.2.2 试验方法 在样地内每个取样点分别挖取一个面积约为 1 m × 1 m、深为 1 m 的土壤剖面，用标准环刀 (100 cm³) 取样用于土壤体积质量的测定；用 20 cm × 10 cm 铝制饭盒取原状土用于测定土壤颗粒组成；用水分钻取样用于分析土壤水分含量；用土壤硬度计在土壤剖面内直接测定各土层土壤硬度。同时在土壤剖面分 3 个点取适量土壤样品，带回室内自然风干，进行土壤理化指标的测定与分析。土壤物理指标^[12]：土壤体积质量采用标准环刀法测定；土壤机械组成用简易比重计法测定；土壤孔隙度采用土壤

密度换算法测定。土壤化学指标^[12]：土壤有机质测定采用重铬酸钾法；土壤全氮测定采用半微量开氏法；速效氮测定采用减解扩散法；全磷测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法；有效磷测定采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法；全钾测定采用 HF 消解-火焰光度计法；速效钾测定采用 NH₄COOH 浸提-火焰光度计法；土壤含水量测定采用烘干法；土壤 pH 用 pH 计测定。

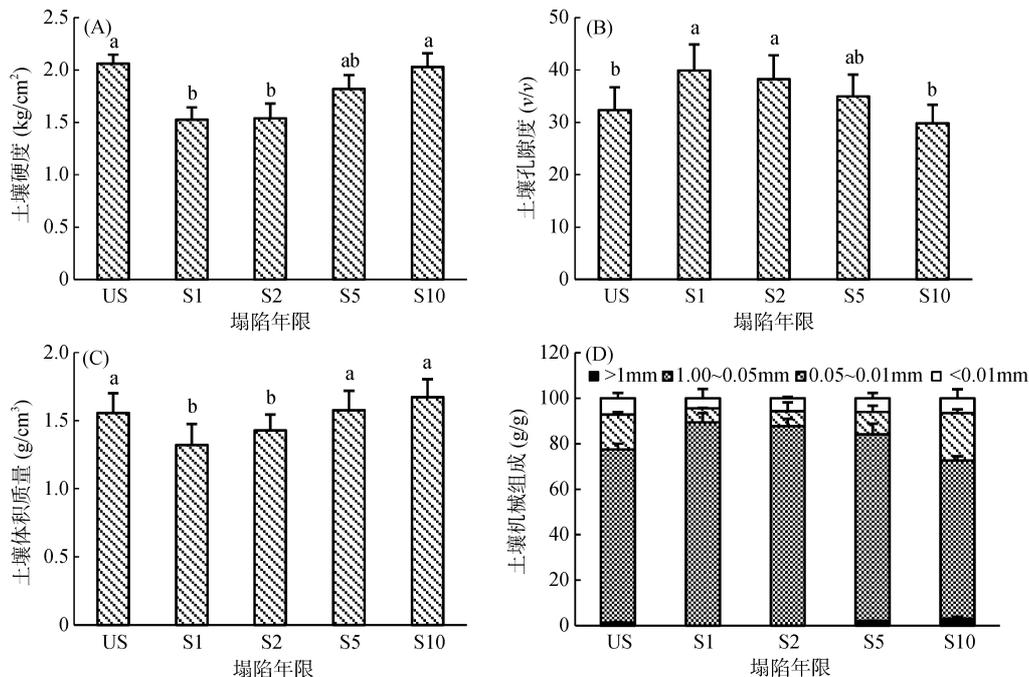
1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS20.0 软件进行统计检验，用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较组间的差异，差异显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ ，用 Excel 2013 作图软件进行绘图；用 SPSS20.0 软件以不同采煤塌陷年限下土壤理化性质为变量，平方欧氏距离作为样地间的相异性指标，采用组间联接法进行不同样地间系统聚类分析；采用 CANOCO4.5 软件进行不同采煤塌陷年限主成分分析(PCA)，将塌陷区与未塌陷区的各样点进行归类、排序。

2 结果与分析

2.1 不同塌陷年限土壤物理性质演变特征

由图 1 可以看出，与未塌陷对照区相比采煤塌陷初期(1~2 a)土壤硬度显著下降了 26%($P < 0.05$ ，图 1A)、



(不同小写字母表示相同土壤深度不同地表塌陷年限间差异显著($P < 0.05$)；图中 S1、S2、S5、S10 和 US 分别代表地表塌陷后 1、2、5、10 a 和未塌陷对照区，下同)

图 1 不同塌陷年限土壤物理性质演变特征

Fig. 1 Evolution of soil physical properties in different subsidence years

孔隙度显著增加了 24% ($P < 0.05$, 图 1B)、体积质量平均显著减小了 15% ($P < 0.05$, 图 1C); 但随着塌陷年限的增加土壤硬度、孔隙度和体积质量逐渐趋于塌陷前水平, 至塌陷 10 a 上述 3 种土壤物理指标和未塌陷样地相比差异不显著 ($P > 0.05$)。此结果是由于采煤塌陷初期的塌陷震动导致研究区结构性较差的风沙土更加松散, 同时土层在沉降过程中土体受剪力作用降低了土壤稳定性, 此研究结果与风沙区地表塌陷后土壤物理性质变化结论基本一致^[10]。后随采煤塌陷时间的推移, 塌陷区风沙土不断地累积, 土壤在各种外力和土体自身重力作用下向下沉使土体稳定, 塌陷地土壤变得紧实, 因此本研究显示地表塌陷 5 a 后土壤硬度和体积质量相应增加而土壤孔隙度减小。

图 1D 显示采煤塌陷引起了 > 1.00 mm 石砾和粒径 0.05 mm 以下的土壤粉粒和黏粒含量相对降低。其中, 粉粒、黏粒质量分数减小, 首先是因为采煤塌陷造成地表裂缝发育, 土壤中细小颗粒在地表径流和地表风的作用下沿地裂缝流失; 同时塌陷后地表植被退化、风蚀作用增强也使地表粉粒和黏粒土壤减小。而

塌陷初期表层土壤石砾质量分数下降推测主要是由于质量较大的石砾在地表震动的作用下沿地表裂缝跌落至土壤深层。但随着塌陷年限的增加, 覆沙区地表裂隙在风蚀、水蚀和重力的作用下不断弥合, 加之植被恢复对土壤物理性质的改善, 地表塌陷 5 a 后土壤粉粒和黏粒组成增加, 土壤颗粒组成上有细化现象 (图 1D)。

2.2 不同塌陷年限土壤水分与 pH 演变特征

不同塌陷年限土壤含水量变化如图 2A 所示, 采煤引起地表塌陷后表层土壤平均含水量较未塌陷样地迅速下降了 60%, 并达到显著水平 ($P < 0.05$), 这与赵永峰^[13]研究风沙地采煤塌陷后土壤水分含量下降相同, 主要原因是由于地表土壤裂缝、地表土壤松散化及地下潜水位下降; 但由于所研究的覆沙区地表裂隙弥合较快^[14], 减小了表层水分的蒸发面积, 同时塌陷引起的土壤孔隙度相对增大加大了降水的入渗速率, 塌陷 5 a 后土壤水分含量和未塌陷样地相比差异已不显著 ($P > 0.05$), 水分含量已基本达到未塌陷样地水平。

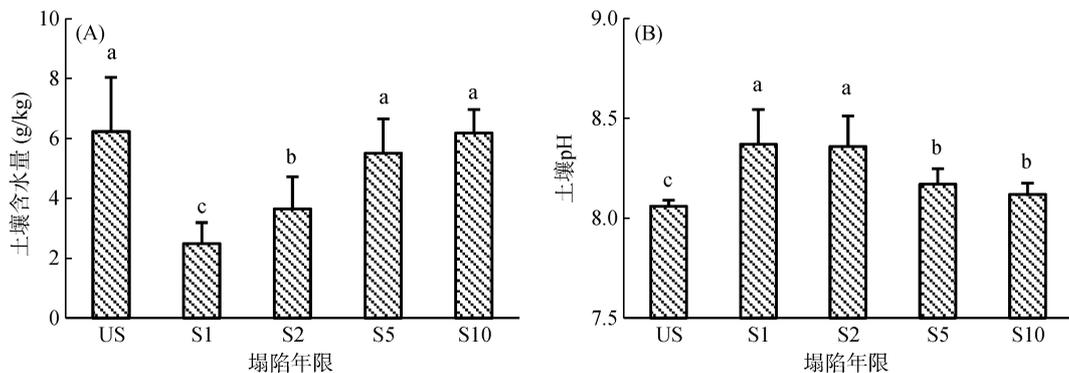


图 2 不同塌陷年限土壤水分与 pH 演变特征

Fig. 2 Evolution of soil moisture and pH in different subsidence years

图 2B 显示塌陷初期土壤 pH 由平均 8.06 上升至 8.36 并达到显著水平 ($P < 0.05$), 后随着塌陷年限的增加逐渐降低, 但塌陷 10 a 后仍未减小至塌陷前水平 ($P < 0.05$)。采煤塌陷初期土壤含水量的降低使土壤微生物活性降低, 也引起植被退化导致地表枯落物量减少, 使得微生物分解有机凋落物形成的有机酸、酚类物质质量减小, 导致土壤 pH 增加^[15], 结果可使塌陷区土壤养分循环量降低^[16], 故塌陷初期 1 ~ 2 a 土壤养分恢复较为缓慢。而随塌陷年限的增加土壤水分逐渐恢复, 土壤中的微生物及酶活性增强, 地表植被恢复亦使植物根系和土壤微生物分泌的有机酸含量增加, 促使土壤 pH 逐渐降低, 但研究区脆弱的生态环境使得土壤 pH 在地表塌陷 10 a 仍未

恢复至未沉陷水平。

2.3 不同塌陷年限土壤养分演变特征

由表 1 可知地表塌陷 2 a 土壤有机质含量最低, 较未塌陷区显著下降了 33% ($P < 0.05$), 自然恢复条件下至塌陷 10 a 仍较未塌陷区显著下降了 10% ($P < 0.05$)。此变化趋势首先是采煤塌陷初期, 土壤物理结构的扰动使得有机质流失增加, 同时植被退化和微生物活性降低也使有机质积累量减小^[17]; 随着塌陷年限的增加, 塌陷地裂缝逐渐弥合, 土壤有机质流失量减少, 加之地表植被的逐渐恢复使得枯落物积累量增多, 土壤有机质出现不同程度的上升; 但研究区土壤有机质受到损害后积累较为缓慢, 土壤自然恢复条件下 10 a 仍未恢复至塌陷前水平。

采煤塌陷后土壤全氮含量略有降低但并未表现出显著差异($P > 0.05$)；与全氮变化趋势不同,地表塌陷扰动初期(1~2 a),土壤全磷平均减小了 17%、全钾减小了 46.6%,都达到显著水平($P < 0.05$)。但与王琦^[10]研究采煤塌陷后全效养分(全氮、全磷和全钾)受到损害后恢复较慢的结果不同,本研究表明塌陷 5~10 a 土壤全效养分含量可基本恢复至未塌陷水平。推测原因是覆沙区地表裂缝迅速弥合而使土壤微生物将全效养分转化为速效养分的速率降低^[18],同时土壤全效养分垂向淋溶量和水平流失量减小,两者共同作用使得塌陷区土壤全效养分受到损害后可迅速恢复。

地表塌陷后 1 a 土壤速效氮和速效钾含量最低,较未塌陷对照区分别显著下降了 34% 和 32% ($P < 0.05$)；而塌陷 2 a 时土壤有效磷含量最低,显著下降了 42% ($P < 0.05$),3 种速效养分之后随塌陷年限的增加缓慢增加,基本上呈现先减小后增加的趋势。首先地表塌陷初期由于地表扰动、水蚀和风蚀作用增强引起土壤速效养分(速效氮、有效磷和速效钾)迅速下降^[19]。后随着土壤物理性质改善和植被恢复,土壤养分得到一定程度恢复。但与土壤全效养分的迅速恢复不同,研究区脆弱的生态环境使土壤速效养分恢复缓慢,塌陷后经过 10 a 的土壤自修复仍然未达到塌陷前水平。

表 1 不同采煤塌陷年限土壤养分指标演变特征
Table 1 Evolution of soil nutrients in different subsidence years

土壤养分指标	未塌陷区	塌陷 1 a	塌陷 2 a	塌陷 5 a	塌陷 10 a
有机质 (g/kg)	1.27 ± 0.28 a	0.85 ± 0.16 b	0.83 ± 0.19 b	0.90 ± 0.11 b	1.14 ± 0.26 a
全氮 (g/kg)	0.12 ± 0.06 a	0.13 ± 0.07 a	0.12 ± 0.09 a	0.13 ± 0.08 a	0.11 ± 0.09 a
速效氮 (mg/kg)	20.55 ± 2.87 a	13.54 ± 1.67 b	15.82 ± 1.18 b	15.95 ± 0.86 b	18.49 ± 2.75 a
全磷 (g/kg)	0.50 ± 0.12 a	0.42 ± 0.08 b	0.41 ± 0.06 b	0.46 ± 0.14 a	0.45 ± 0.09 a
有效磷 (mg/kg)	3.66 ± 0.52 a	2.14 ± 0.35 d	2.24 ± 0.39 d	2.55 ± 0.29 c	3.10 ± 0.33 b
全钾 (g/kg)	19.83 ± 2.64 a	10.59 ± 2.11 c	13.91 ± 1.88 b	18.47 ± 2.68 a	20.00 ± 3.67 a
速效钾 (mg/kg)	77.07 ± 6.68 a	52.03 ± 7.89 c	55.39 ± 8.67 c	62.32 ± 9.74 b	72.11 ± 5.38 a

2.4 采煤塌陷后土壤性质演变过程分析

由图 3 不同采煤塌陷年限间系统聚类树状图可以看出,将相异性水平距离阈值设定为 5 时,未塌陷区与 4 种不同的塌陷年限可分为 3 类:采煤塌陷 1~2、5 和 10 a。应用 CANOCO4.5 软件分析得到不同采煤塌陷年限土壤指标-塌陷年限主成分分析双序图(图 4)。土壤指标用带有箭头的线段表示,连线的长短表示不同塌陷年限与土壤因子关系的大小,箭头连线与排序轴的夹角表示该土壤指标与排序轴相关性大小,箭头所指的方向表示该土壤指标的变化趋势。两个排序轴对样地指标变化的解释量达 82.9%,基本可反映不同采煤塌陷年限土壤质量的变化趋势。结合图 3 和图 4 分析结果,研究区土壤随着塌陷年限的增加大体经过 3 个不同的演替阶段,即退化期(塌陷后 1~2 a) 改善期(塌陷后 5 a) 部分恢复期(塌陷后 10 a)。其中第 1 类塌陷 1~2 a 退化期塌陷区处于非稳定阶段,强烈的地表扰动、风蚀水蚀增强和植被退化,造成了土壤物理性质、速效养分、pH 和有机质的剧烈变化,此阶段土壤质量最差。第 2 类地表塌陷 5 a 后,自然演替状态下土壤物理性质基本恢复至未塌陷前水平,而土壤养分虽逐渐恢复但要滞后于土壤物理

性质的恢复。至第 3 类采煤塌陷后 10 a,塌陷裂缝在风蚀水蚀和地表重力沉降的作用下基本消失,塌陷地土壤逐渐变得稳定,土壤水分养分流失减弱、土壤养分指标逐渐恢复。土壤演替的第 3 类阶段土壤理化性质虽已接近未塌陷区(图 4 中 所示 US 样地集中区),甚至土壤水分在某些样地已超过未塌陷样地,但土壤氮磷钾速效养分和有机质仍未完全恢复,研究区土壤自我修复能力进程缓慢,这与苏敏^[20]认为,塌陷 2 a 后的风沙区土壤理化性质基本可以保持稳定的结果有较大差异。

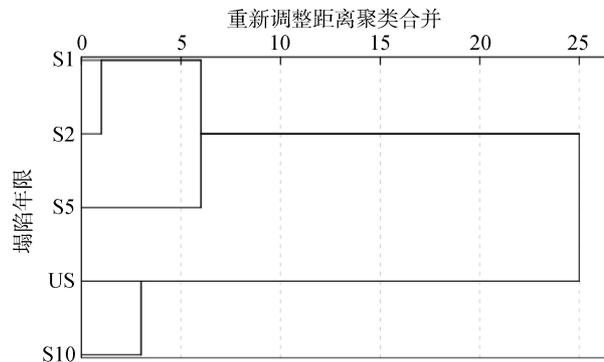


图 3 不同采煤塌陷年限间系统聚类树状图
Fig. 3 Dendrogram of hierarchical cluster in different subsidence years

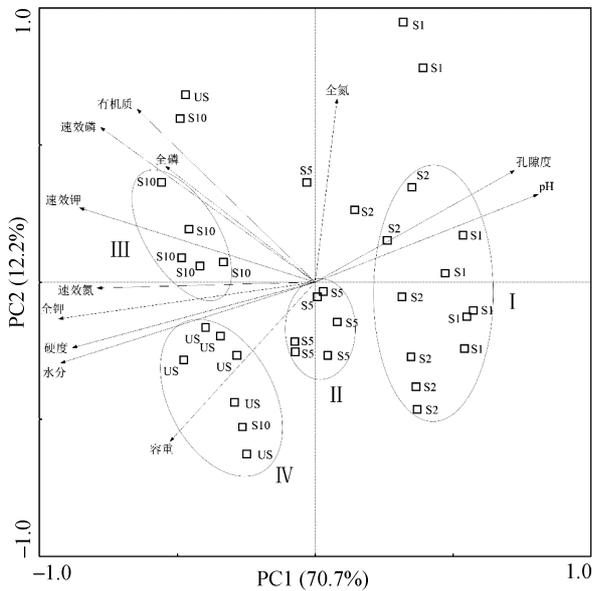


图 4 不同采煤塌陷年限土壤指标-塌陷年限主成分分析双序图

Fig.4 PCA biorder diagram of soil properties-subside years

3 结论

1) 不同塌陷年限土壤物理性质演变特征。塌陷震动导致研究区风沙土结构松散,使得采煤塌陷初期表层土壤硬度、体积质量显著减小,而土壤孔隙度增加,同时 >1.00 mm 石砾和 0.05 mm 以下的土壤粉粒和黏粒含量相对降低;塌陷区地表土壤物理性质 5 a 后逐渐恢复,土壤硬度和体积质量增加而土壤孔隙度减小,土壤颗粒有细化现象。

2) 不同塌陷年限土壤水分与 pH 演变特征。地表塌陷使表层土壤平均含水量迅速下降,但由于覆沙区地表裂隙弥合较快,因此塌陷 5 a 后土壤表层水分含量已基本达到未塌陷样地水平;塌陷初期土壤 pH 增加,后随塌陷年限的增加逐渐降低,但 10 a 仍未降低至未沉陷前水平。

3) 不同塌陷年限土壤养分演变特征。不同塌陷年限土壤全氮含量变化不显著,全磷和全钾在塌陷初期虽都有不同程度的减小,但塌陷 10 a 后可基本恢复至未塌陷样地水平;塌陷初期土壤速效养分(速效氮、有效磷和速效钾)和有机质含量迅速下降,塌陷 5 a 后逐渐恢复,但经过 10 a 的土壤自修复仍未完全恢复至塌陷前水平。

4) 采煤塌陷后土壤理化性质演变过程分析。榆神府覆沙矿区塌陷地土壤随塌陷年限的增加大体经过 3 个演替阶段,即退化期(塌陷后 1~2 a) 改善期(塌陷后 5 a) 部分恢复期(塌陷后 10 a),塌陷 10 a 土壤速效养分和有机质仍未完全恢复,地表塌陷对土

壤速效养分损害具有一定延续性。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2000-2014
- [2] Zhou D W, Wu K, Cheng G L, et al. Mechanism of mining subsidence in coal mining area with thick alluvium soil in China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4): 1855-1867
- [3] Cheng W, Bian Z F, Dong J H, et al. Soil properties in reclaimed farmland by filling subsidence basin due to underground coal mining with mineral wastes in China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(8): 2627-2635
- [4] Gilland K E, McCarthy B C. Microtopography influences early successional plant communities on experimental coal surface mine land reclamation[J]. Restoration ecology, 2014, 22(2): 232-239
- [5] Wright I A, McCarthy B, Belmer N, et al. Subsidence from an underground coal mine and mine wastewater discharge causing water pollution and degradation of aquatic ecosystems[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2015, 226(10): 1-14
- [6] Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, et al. Plant-soil feedbacks: The past, the present and future challenges[J]. Journal of Ecology, 2013, 101(2): 265-276
- [7] 徐友宁, 吴贤, 陈华清. 大柳塔煤矿地面塌陷区的生态地质环境效应分析[J]. 中国矿业, 2008, 17(3): 38-40
- [8] 侯庆春, 汪有科, 杨光. 神府-东胜煤田开发区建设对植被影响的调查[J]. 水土保持研究, 1994, 1(4): 127-137
- [9] 吕晶洁, 胡春元, 贺晓. 采煤塌陷对固定沙丘土壤水分动态的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(7): 152-156
- [10] 王琦, 全占军, 韩煜, 等. 风沙区采煤塌陷不同恢复年限土壤理化性质变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 118-122
- [11] 祝宇成, 王金满, 白中科, 等. 采煤塌陷对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(1): 22-28
- [12] 尚浩博. 资源环境常规分析方法[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2010
- [13] 赵永峰. 神东矿区采煤塌陷对土壤理化性质及土壤含水率的影响//2006 中国科协年会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 103-107
- [14] 范立民, 张晓团, 向茂西, 等. 浅埋煤层高强度开采区地裂缝发育特征——以陕西榆神府矿区为例[J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1442-1447
- [15] 常庆瑞, 安韶山, 刘京, 等. 黄土高原恢复植被防止土地退化效益研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 6-9
- [16] Šimek M, Cooper J. The influence of soil pH on denitrification: Progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years[J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 345-354

- [17] Balesdent J, Chenu C, Balabane M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(3): 215–230
- [18] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68(1): 252–262
- [19] 臧荫桐, 汪季, 丁国栋, 等. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 262–267
- [20] 苏敏. 采煤塌陷区土壤养分循环及对生态环境的影响研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2010

Evolution of Topsoil Physical-chemical Properties After Coal Mining Subsidence in Yu-Shen-Fu Sand Covered Mining Area

DU Huadong^{1,2}, ZHAO Xiaoguang^{1*}, ZHANG Yong³, NIE Wenjie¹

(1 *College of Geology & Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China*; 2 *Institute of Green Coal Mining Geological Security Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China*; 3 *Shaanxi Provincial Department of Water Resources, Xi'an 710004, China*)

Abstract: The soil samples in different years of coal mining subsidence (1, 2, 5, 10 a, and un-subsidence area) at Yu-Shen-Fu Mining areas were collected, and the soil physical-chemical properties were measured. The results showed that soil quality showed a degradative trend in subsidence area compared with un-subsidence area. Soil bulk density, hardness, contents of clays, moisture, organic matter, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, total phosphorus and total potassium were significantly decreased, while soil total porosity, pH, and sand content increased in the early stages of subsidence (1–2 a). However, the change of soil total nitrogen was not obvious in the research period. The above soil indexes showed an improving trend after 5 years natural restoration, soil physical properties, moisture and total nutrients recovered rapidly and reached up to the level before subsidence in 10 years; while available soil nutrients, pH and organic matter has not yet reached level of un-subsidence area. The succession of soil quality under natural restoration can be divided into three stages, namely the degradation stage (1–2 a) improvement stage (about 5 a) partial recovery stage (after 10 a). Those results implied that coal mining subsidence had a certain sustaining damage on soil properties at Yu-Shen-Fu Mining area.

Key words: Yu-Shen-Fu mining area; Coal mining subsidence; Soil physical-chemical properties; Successional rule; Ecological restoration