

DOI: 10.11766/trxb201711090497

采煤沉陷区不同土地利用类型土壤水分、有机质和质地的空间变异性*

孟红旗 熊仁鹏 王崇 高彩玲

(河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454010)

摘要 探索采煤沉陷区坡面微地形上土壤水分、养分和颗粒迁移转化的作用机理, 为促进矿区生态环境综合整治的科学决策提供重要的理论和实践价值。以焦作九里山矿典型平原型采煤沉陷坑内的耕地和林地研究对象, 对比分析了土壤含水率、有机质含量和质地在不同土地利用类型(耕地和林地)、沉陷坡位(中心、坡底、坡中、坡顶和对照)和剖面深度(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm)上的空间变异性。结果表明, 耕地土壤含水率和黏粒含量较林地显著降低($p < 0.05$), 而砂粒含量则显著增加($p < 0.01$)。坡中或坡底处的土壤含水率、有机质和粉粒含量最小, 而砂粒和黏粒含量则最大, 成为整个沉陷坡面上的极值点。在剖面深度上, 土壤含水率、有机质、砂粒含量表现为显著的表层聚集, 黏粒含量则为显著深层聚集的特点。通过对土壤含水率、有机质含量和土壤质地沉陷区坡面微地形空间变异作用机理的分析, 建议平原型采煤沉陷区的土地复垦方向应以耕地为主、林地为辅的基本原则, 在坡中到坡底的等高段复垦为林灌地, 能起到对沉陷区土壤水分与养分流失控制和生态环境效益改善的关键作用。

关键词 采煤沉陷; 土地利用类型; 坡位; 土壤剖面; 土壤质地; 土地复垦

中图分类号 S157.1; S152.3; X752 **文献标识码** A

2016年, 我国煤炭生产量为 1.69×10^9 t油当量, 占世界总产量的46.1%, 较2015年分别下降 1.4×10^8 t油当量和1.6%, “十三五”(2016—2020年)期间, 国内煤炭消费比重也将从62%下降至58%以下, 然而, 在我国一次能源结构中, 煤炭仍将长期是主体能源^[1-2]。煤炭开采在促进国民经济和社会发展的同时, 也引发了严重的土地损毁^[3]和土壤退化, 如采煤沉陷引起的土壤侵蚀与养分流失、土壤酸化、盐碱化和沼泽化等问题^[4-6], 既加剧了矿区人地矛盾, 也严重威胁我国的粮食生产安全。我国“十三五”期间, 全国将新增采煤沉陷土地 6.6×10^4 hm², 其中以耕地为主的中部和东北地区新增 2.8×10^4 hm²; 到2020年, 我

国煤矿稳定沉陷土地治理率需达到80%以上, 新增沉陷土地复垦率60%以上^[2], 总计需完成煤炭开采区 1.20×10^6 hm²的土地复垦任务^[3]。

国内外学者对采煤沉陷区土壤质量的空间变异规律进行了诸多研究, 主要从单一土地利用类型上的坡度和裂缝两个不利因素去考察^[7-9]。随着沉陷深度的增加, 土壤养分能值变化轨迹呈“V”形^[10]。由于重力的作用, 土壤水分和迟效养分有沿坡向下呈递增趋势; 但在坡面中部的拐点处, 大量地表裂缝的形成增加了土壤水分蒸发和养分垂流失, 土壤水分和迟效养分最小^[11-13]。塌陷坡面表层土壤有砂化趋势, 侵蚀作用促使上坡黏粒下移在坡底汇集^[14], 地表裂缝成为水流输沙的

* 国家自然科学基金项目(41402216)、河南省高等学校重点科研项目(16A210049)和河南省高校矿山环境保护与生态修复省级重点实验室培育基地开放课题(KF2014-05)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41402216), the Henan Provincial Higher Education Key Research Project (No. 16A210049) and the Henan Mines Environmental Protection and Ecological Rehabilitation Provincial Key Laboratory Breeding Base Open Topic (No. KF2014-05)

作者简介: 孟红旗(1979—), 男, 河南焦作人, 博士, 副教授, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: mengborse@sohu.com

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2018-01-22; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-02-13

优先流通道, 加剧黏粒的垂向流失, 从而引起表层砂化和深层黏化^[15-18]。采煤沉陷引起土壤理化性质空间异质性的增加, 为满足不同类型土地利用的立地条件提供了可能性, 从而以适应沉陷区非均质的景观^[5]。基于成本和安全考虑, 新沉陷区通常被复垦为林草地^[19]。然而, 聂小军等^[20]研究表明, 沉陷耕地向林地转变, 在有裂缝区表现为减缓土壤碳库损失, 在无裂缝区表现为加剧土壤碳库损失。同时, 由于林木生长不良, 沉陷区部分地块又被周边农民重新恢复为耕地。要避免“一刀切”式的土地复垦方向, 做到因地制宜, 就必须认识沉陷区微地形(具体坡向和坡位)的土壤质量变化在不同土地利用类型上的差异性。现有的文献缺乏对沉陷区不同土地利用类型土壤立地条件的对比分析, 对沉陷区坡面微地形土壤水分、颗粒和养分迁移转化的作用机理研究相对不足^[8]。本研究以焦作九里山矿沉陷区的耕地和林地为研究对象, 对土壤水分、有机质和质地沉陷坡面和剖面深度上的空间变异性进行对比分析, 对于沉陷区的合理分区与选择适宜的土地复垦方向、促进矿区生态环境综合整治科学决策有重要的理论和实践价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

焦作九里山矿现隶属于焦作煤业(集团)有限责任公司, 位于焦作市东北18 km (39.34° N, 113.42° E), 海拔97 m, 属太行山山前平原冲

洪积扇的边缘地带, 总体地形平坦, 地面坡度3‰~8‰。矿区年均气温14.2℃, 降水量578 mm, 蒸发量993 mm^[21], 年均日照时数2 062 h, 光热资源丰富, 是全国粮食高产产区之一。矿区主要土地利用类型: 耕地占比78.2%, 以冬小麦-夏玉米(大豆或花生)为作物; 建筑道路工矿用地占比19.5%; 林地占比2.3%, 以速生杨为主。土壤为石灰性褐土, 质地为壤土-黏壤土, 母质是第四系砂砾石, 土体深厚(13~45 m)。地下水埋深大于10 m。

1.2 样品采集与分析

九里山矿自1983年开采以来形成的沉陷区总面积为540 hm², 呈NE—SW走向, 沉陷深度多在1.2~4.3 m, 最大深度为8.2 m^[22]。位于矿区东北角的沉陷坑直径超过800 m, 深度为6.5 m, 2000年开始沉陷, 2005年后达到初步稳定, 是典型的平原型采煤沉陷坑。坑内及周边以耕地为主, 种植冬小麦-夏玉米, 年均施肥量: 化肥N200 kg hm⁻², P30 kg hm⁻², 有机肥10~15 t hm⁻²。从坑中心到东侧边缘有一片270 m×10 m的速生杨次生林, 种植密度为3.0 m×1.5 m, 林龄18年, 胸径15~38 cm。林下生长小叶槐、酸枣、柽柳等小型灌木, 黄花蒿等杂草。从坑中心到边缘每隔40 m共布置5个土壤采样点, 分别对应中心、坡底、坡中、坡顶和对照(距沉陷坑东侧边缘基准点沉降0.4 m, 因其地面坡度小于1°且无裂缝分布, 将其视作为对照); 距林地北侧60 m, 等高布置对应的5个耕地采样点(图1)。各采样点基本情况见表1。

表1 土壤采样点基本情况

Table 1 Basic information of the soil sampling sites

坡位 Slope position	距中心距离 Distance from center (m)	海拔 Altitude (m)	坡度Slope gradient (°)	林地裂缝分布 Crack distribution	林地植被生长情况 Vegetation growth
中心Center	0	90.53	2.18	无裂缝 No crack	乔木-灌木, 郁闭度50% Trees-shrubs, 50% in canopy density
坡底Bottom	40	92.06	3.24	裂缝和土洞 Cracks and holes	灌木-乔木, 郁闭度40% shrubs-trees, 40% in canopy density
坡中Middle	80	94.33	1.61	裂缝大量分布 Distribution of a large number of cracks	乔木-灌木, 郁闭度80% Trees-shrubs, 80% in canopy density
坡顶Top	120	95.45	1.38	少量长裂缝 A small amount of long fissures	乔木-草本, 郁闭度85% Trees-herbs, 85% in canopy density
对照Control	160	96.41	0.59	无裂缝 No crack	乔木-草本, 郁闭度70% Trees-herbs, 70% in canopy density

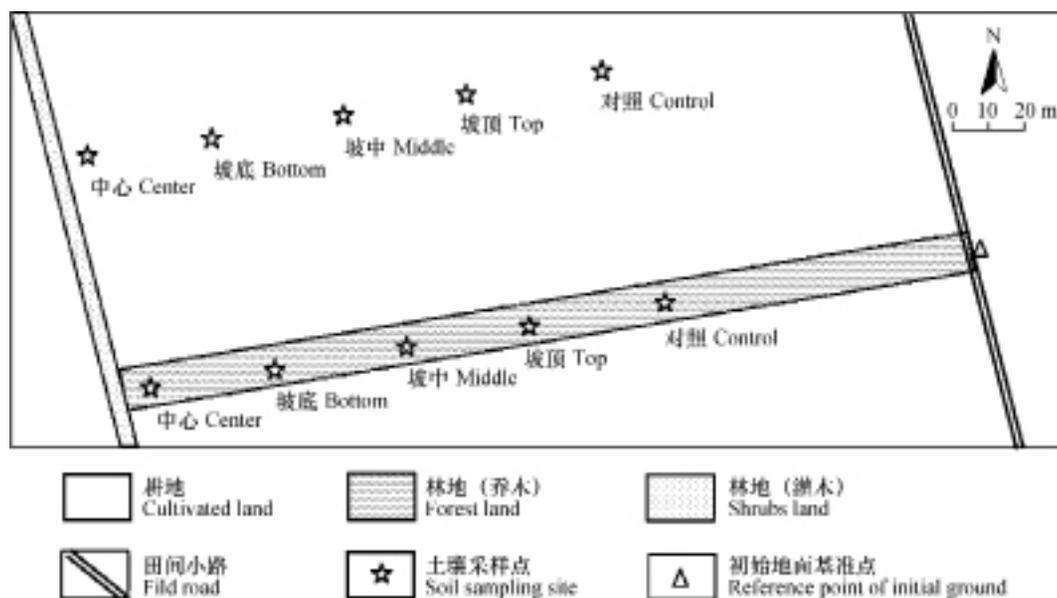


图1 土壤采样点布置方案

Fig. 1 Arrangement of soil sampling points

土壤样品采集于2015年4月份，采样日的7 d前经历一场中雨。每个采样点的1 m范围内平均布置5个钻孔，钻孔避开裂缝且距离树干大于0.5 m。用直径4 cm土钻，每10 cm一层共采集5个土壤层（0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm），每个采样点5个钻孔同层混合，剔除石块和植物根系，再通过2 mm筛，形成1个土壤样品。共采集50个土壤样品。

取1 kg样品风干后密封保存，用于测量土壤质地（比重计法^[23]）；取风干土100 g，研磨，通过80目筛后密封保存，用于测量土壤有机质（重铬酸钾容量法-外加热法^[24]）；取100 g鲜土密封后冰箱内冷冻保存，用于测量土壤含水率（重量法^[23]）。样品测试平行2次，相对误差大于5%，重复测试1次。

1.3 数据处理

采用SPSS一般线性模型（GLM）单变量-主效应模型分别对土壤水分、有机质、砂粒（2~0.02 mm）、粉粒（0.02~0.002 mm）和黏粒（<0.002 mm）含量在土壤利用类型（耕地和林地）、坡位（中心、坡底、坡中、坡顶和对照）和土壤剖

面（0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm）共3个因素进行基于估算边际均值间的线性独立成对比较。测试指标的相关分析采用SPSS模型中Pearson相关双侧检验（ $p=0.05$ 和 0.01 两个水平）。同土壤层（或坡位）土壤理化指标在不同土壤利用类型（耕地和林地）的差异采用SPSS模型中配对样品T检验比较均值。数据变异性小于10%为弱变异；10%~20%为中等变异；大于30%为强变异^[25]。

2 结果

2.1 沉陷区土壤含水率的空间变异性

土壤含水率在坡面微地形的空间变异见表2、表3和图2。由表2可知，土壤含水率的变异性接近强变异的下限值30%，略呈负偏度。在未受到地下水补给的情况下（地下水埋深大于10 m），沉陷区表层土壤明显受到采样前降雨入渗的影响导致含水率偏高，但仍然有部分深层土壤（>30 cm）并未受到此次降雨的补给，从极小值4.40%可以得到证明。

表2 沉陷区土壤理化性质

Table 2 Statistics of soil physical and chemical properties of the subsidence area ($n=50$)

项目 Item	含水率 Soil moisture (%)	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)
均值 Mean	10.29	15.19	38.44	43.04	18.52
标准差 SD	2.80	6.50	6.13	4.26	6.15
变异性 Variability	27.2	42.8	15.95	10.0	33.2
极小值 Minimum	4.40	7.30	26.09	33.44	8.27
极大值 Maximum	16.16	31.51	48.64	51.99	36.30
偏度 Skewness	-0.221	0.905	-0.541	-0.018	0.802
峰度 Kurtosis	-0.394	-0.049	-0.442	-0.533	0.552

由表3可知,林地土壤含水率极显著大于耕地 ($p<0.01$)。在沉陷坡位上,与对照比较,坡中处土壤含水率显著降低2.00%,坡底不显著降低0.81%,且变异性均显著增大为强变异(分别为32%和35%)。土壤含水率在土壤剖面上显著的表层聚集特点表明土壤水分补给完全来自于大气降雨,且补给深度应不大于30 cm。由图

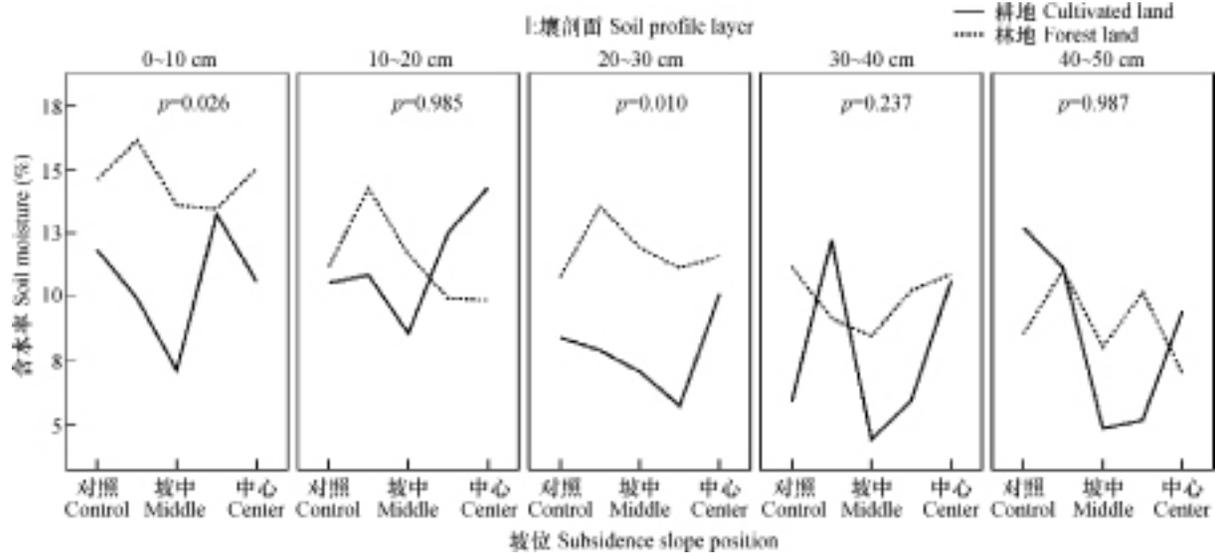
1可知,林地土壤的保水性偏大主要体现在林地0~10 cm和20~30 cm土壤层含水率显著大于耕地 ($p<0.05$),在沉陷坡位上只有坡中处整个剖面土壤含水率表现为林地显著大于耕地 ($p<0.01$)。随着沉陷深度的增加,同一土壤层含水率的变化趋势平均表现为:林地均呈减小趋势,耕地则表现为表层(<20 cm)增大和深层(>30 cm)减小趋势。

表3 沉陷区土壤理化性质空间变异性

Table 3 Spatial variability of soil physical and chemical properties in the subsidence area

项目 Item	含水率 Soil moisture (%)	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	
土地利用类型 Type of land use	耕地 Cultivated land	9.25 ± 2.88 b	15.63 ± 5.48 a	40.77 ± 3.90 a	42.18 ± 4.47 a	17.05 ± 4.63 b
	林地 Forest land	11.34 ± 2.32 a	14.75 ± 7.48 a	36.12 ± 7.08 b	43.89 ± 3.94 a	19.99 ± 7.17 a
	F值 ²⁾	13.171	1.169	13.262	2.582	6.041
	ANOVA	0.001	0.286	0.001	0.116	0.018
沉陷坡位 Subsidence slope position	中心 Center	10.95 ± 2.32 a	16.96 ± 7.07 a	35.56 ± 5.90 b	45.03 ± 3.48 a	19.40 ± 5.82 ab
	坡底 Bottom	9.76 ± 3.12 ab	15.40 ± 4.95 ab	38.60 ± 6.07 ab	39.94 ± 2.96 b	21.45 ± 8.05 a
	坡中 Middle	8.57 ± 3.02 b	13.64 ± 6.52 b	41.88 ± 7.61 a	42.15 ± 3.89 ab	15.96 ± 5.08 b
	坡顶 Top	11.63 ± 2.48 a	15.23 ± 7.58 ab	36.32 ± 5.16 b	44.37 ± 5.05 a	19.31 ± 5.29 ab
	对照 Control	10.57 ± 2.45 a	14.72 ± 6.51 ab	39.84 ± 4.32 ab	43.69 ± 4.36 a	16.47 ± 5.51 b
	F值 ²⁾	3.331	1.752	3.269	2.905	2.911
ANOVA	0.019	0.158	0.021	0.034	0.033	
土壤剖面层 Layer of soil profile	0~10 cm	12.56 ± 2.72 a	25.10 ± 4.30 a	41.97 ± 4.87 a	44.19 ± 3.01 ab	13.84 ± 3.45 c
	10~20 cm	11.37 ± 1.87 ab	17.80 ± 3.68 b	40.29 ± 5.16 a	45.34 ± 4.11 a	14.38 ± 3.87 bc
	20~30 cm	9.82 ± 2.46 bc	13.51 ± 2.56 c	40.49 ± 3.61 a	41.47 ± 1.77 b	18.04 ± 4.25 b
	30~40 cm	8.90 ± 2.66 c	10.37 ± 1.99 d	33.94 ± 5.96 b	42.82 ± 5.04 ab	23.24 ± 6.47 a
	40~50 cm	8.81 ± 2.61 c	9.16 ± 1.35 d	35.52 ± 7.17 b	41.38 ± 5.58 b	23.10 ± 5.24 a
	F值 ²⁾	6.401	50.49	5.991	2.083	11.570
ANOVA	<0.001	<0.001	0.001	0.101	<0.001	

注: 1) 同列相同字母表示同一因素内不同水平间无显著性差异; 2) 该检验基于估算边际均值间的线性独立成对比较 Note: 1) The same letters in the same factor column mean insignificant difference between the different levels (Duncan, $p=0.05$). 2) The test is based on linear independent paired comparison of the estimated marginal mean values



注： p 值表示耕地和林地同一土壤层含水率配对T检验概率。下同Note: p stands for probability of the paired T-test of soil moisture content in the same soil layers of the cultivated land and forest land. The same below

图2 沉陷区土壤含水率的空间变化趋势

Fig. 2 Trend of the spatial variation of soil moisture content in the subsidence area

2.2 沉陷区土壤有机质的空间变异性

由表2可知，沉陷区土壤有机质含量均值为 15.19 g kg^{-1} ，处于4级偏低等级^[26] ($10 \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$)，变异性为强变异，呈正偏度。由表3可知，土壤有机质在不同土地利用类型和坡位上均表现为无显著差异，与对照处比较，坡中处土壤有机质呈不显著降低 1.08 g kg^{-1} ，中心处则呈不显著升高 1.24 g kg^{-1} 。土壤有机质呈明显的表聚特征，表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 上升为3级正常等级 ($20 \sim 30 \text{ g kg}^{-1}$)，深层

$40 \sim 50 \text{ cm}$ 降为5级缺乏等级 ($6 \sim 10 \text{ g kg}^{-1}$)。由图3可知，与耕地同一土壤层有机质含量比较，林地表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 显著增大 ($p < 0.01$)，亚表层 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 和 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 却显著降低 ($p < 0.01$)，深层 ($> 30 \text{ cm}$) 则无显著差异。随着沉陷深度的增加，除林地表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 外，同一土壤层有机质含量平均变化趋势均表现为增大趋势，林地有机质向下坡（中心或坡底）处积累的趋势要大于耕地。从整个剖面深度上看，耕地土壤有机质在坡中和坡

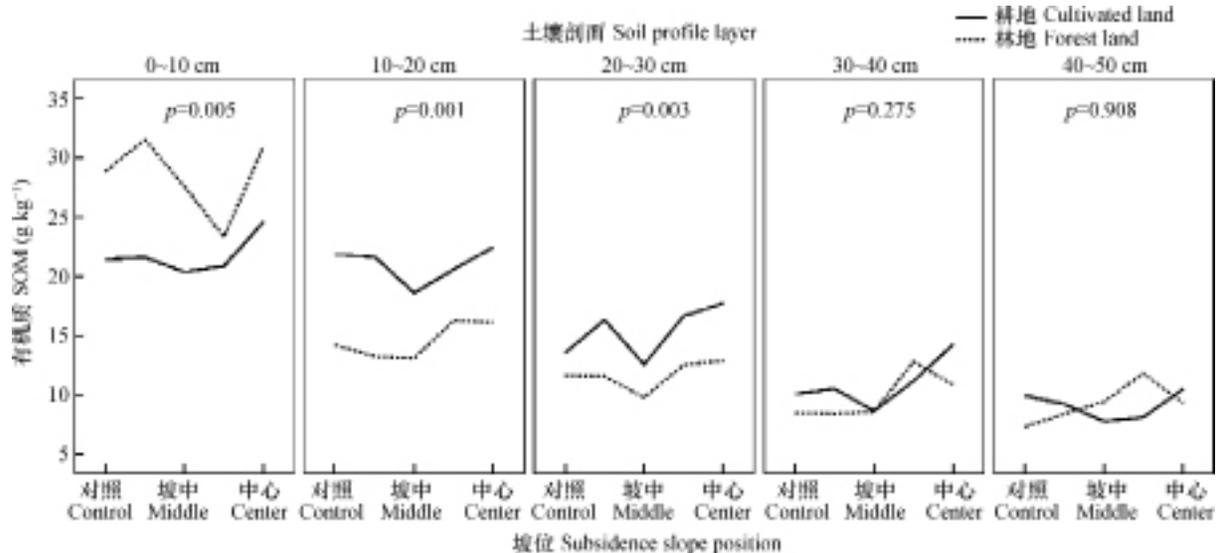


图3 沉陷区土壤有机质的空间变化趋势

Fig. 3 Trend of spatial variation of soil organic matter content in the subsidence area

底处减小的规律较为一致。

2.3 沉陷区土壤质地的空间变异性

由表2可知, 土壤砂粒和粉粒含量均为中等变异(10%~30%)和负偏度, 黏粒含量则为强变异正偏度。结合质地三相图(图4), 沉陷区土壤整体为黏壤土, 表层过渡为壤土—粉质壤土, 深层过渡为壤质黏土—粉质黏土。由表3可知, 与耕地比较, 林地砂粒含量显著减小($p<0.01$), 而黏粒含量则显著增大($p<0.05$), 两者数值的变异性均在林地增大。在沉陷坡位上, 土壤砂粒、粉粒和黏粒含量均存在显著差异($p<0.05$)。坡中处砂粒含量最大, 较对照有不显著增加2.04%, 较坡顶和中心均有显著增加(分别为6.32%和5.56%); 坡底和坡中处粉粒含量偏小, 分别较对照显著降低3.75%和不显著降低1.54%; 坡中处黏粒含量最小, 与对照无显著差异, 较坡底却显著降低5.49%。在土壤剖面上, 土壤砂粒和黏粒含量均存在显著性差异($p<0.001$)。与表层和亚表层土壤比较, 深层(>30 cm)土壤砂粒含量显著减小, 而黏粒含量却显著增大。



图4 沉陷区土壤质地三相图

Fig. 4 Three-phase diagram of soil texture of the subsidence area

由图5可知, 耕地深层(>30 cm)土壤砂粒含量显著大于林地($p<0.05$)。在坡顶和坡底处, 耕地砂粒含量显著大于林地($p<0.05$)。在对照处, 耕地黏粒含量显著大于林地($p<0.01$), 但在坡脚处, 耕地黏粒含量却显著小于林地($p<0.05$)。随着沉陷深度的增加, 同一土壤层上, 林地砂粒含量平均呈下降趋势, 而黏粒含量则平均呈上升趋势; 耕地在坡中和坡底处表现出砂粒含量增加, 粉粒和黏粒含量减小的规律仅在表层(0~20 cm)土壤表

现明显, 深层(>30 cm)土壤砂粒、粉粒和黏粒含量则表现出与林地截然相反的趋势。

3 讨论

3.1 沉陷区土壤水分、有机质和质地空间变异的作用机理

在该研究区, 土壤水分含量是降雨补给与土壤水分蒸发平衡的结果。除去植被类型对降雨截留率的差异外, 4月份分别是林地速生杨的芽萌动期和耕地冬小麦的拔节期, 两种土地利用类型的土壤水分蒸发速率存在明显的差异, 因而降雨一周后, 林地土壤含水率会显著大于耕地($p<0.01$)。在沉陷坡面上, 地表裂缝的存在会阻碍降雨径流的沿坡面流动, 增加垂向流动, 引起坡面局部表层土壤水分补给量减少, 而深层土壤水分补给量相对增加, 并且裂缝也会引起表层土壤水分垂直蒸发增加^[11-12,28-29], 因此会导致土壤含水率在剖面深度上的“逆序”分布^[30]。由图2可知, 尽管由于耕作行为对地表裂缝的封堵, 耕地上坡位(对照→坡顶→坡中)形成优势流通道对土壤水分垂直迁移过程的影响仍然是明显的, 土壤含水率“逆序”分布在此处较为典型。在下坡位(坡底→坡中→中心), 由于坡度增加, 耕地地表形成了较为明显的地表径流^[31], 水分垂直入渗和对深层土壤补给的机会减少, 因而含水率在耕地坡中和坡底处的深层土壤出现最小值。在整个坡面上, 林地土壤水分迁移以入渗壤中流为主, 且含水率剖面规律较为一致。

土壤有机质含量是有机碳投入水平与土壤有机碳矿化水平平衡的结果。两种土地利用类型下, 有机碳投入水平和方式存在明显差异: 林地主要通过落叶返还作为有机碳投入的主要形式, 此外农民放羊时发生的动物啃食和羊粪投入, 以及墓地周边的小面积烧荒行为也影响有机碳的投入。林地的碳投入多积累在土壤表层, 形成一定厚度的凋落物腐殖层, 表层土壤0~10 cm有机质含量显著较亚表层和深层土壤高($p<0.01$), 导致较为明显的土壤有机质表聚现象^[32]。林木生长状况影响凋落物的碳投入水平^[33](表1), 因而在坡顶处的表层土壤有机质含量达到最大值(31.51 g kg⁻¹), 而在亚表层则存在非常明显的有机质降低, 成为土壤碳损失的“源”^[20];

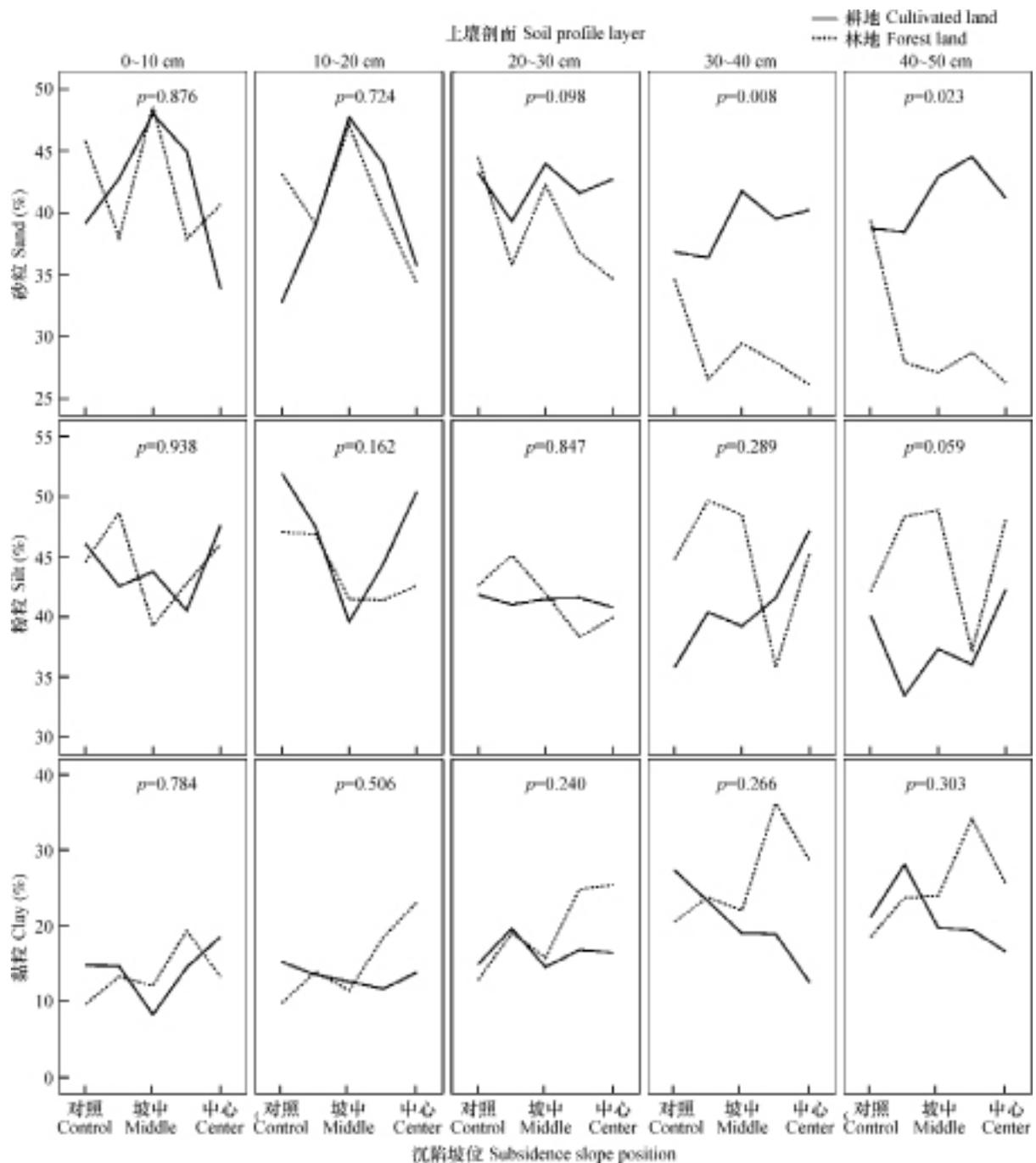


图5 沉陷区土壤质地的空间变化趋势

Fig. 5 Trend of spatial variation of soil texture of the subsidence area

在坡底处地表裂缝以亚表层先形成土洞再引起表面塌陷^[34]的形式存在, 乔木根系生长不良, 林地自然演替为以耐旱耐盐碱的灌木为主, 而亚表层和深层土壤有机质含量在坡底处的升高可能来源于上坡面黏粒的迁移和积累, 成为土壤碳积累的“汇”^[14,20]。耕地的有机碳投入形式包括: 有机肥投入、作物根系和秸秆还田等管理措施, 以及旱季的喷灌措施通过增加作

物生物量增加碳投入水平。耕地的碳投入导致耕地0~20 cm土壤层有机质含量较深层显著升高, 且耕作行为导致0~10 cm和10~20 cm土壤层有机质含量无明显差异; 耕地20~30 cm土壤层有机质含量亦较深层(>30 cm)土壤显著增大, 且较林地同层土壤显著增大, 这可能源于作物根系的影响, 也可能源于耕作行为对亚表层裂缝的封堵而引起的表层有机质的垂直迁

移,形成表层碳“源”向亚表层碳“汇”的垂直迁移模式。

沉陷区土壤质地在不同坡位上表现出的显著差异 ($p < 0.05$),表明不同粒径的土壤颗粒在面临坡度增加和地表裂缝不利因素下的分选分级现象。在塌陷初期的非稳定期,土体重构后变得疏松、孔隙度增大、含水率增加^[35-36],有效养分相对充足且流失速率较大,土壤碳氮比、碳磷比下降,土壤有机质和缓效养分库面临矿化和风化速率增加的风险^[20,27]。在地表裂缝和耕作行为的双重影响下,沉陷区耕地的表层疏松土壤倾向于整体向亚表层和深层迁移混合,土壤颗粒无明显分选分级现象,由此导致土壤质地的相对均质化,耕地砂粒和黏粒含量的变异性较林地减小(表3)。在强降雨情况下,耕地地表相对裸露,易形成表面侵蚀流^[31],在坡度较大的坡中处对土壤细颗粒的搬运能力最大,土壤砂化作用明显且一直持续至坡脚处(图6)。此外,耕地黏粒在坡顶的深层土壤和中心的表层土壤有一定的富集效应,这可能与土壤重力水分在此处滞留有关。中心处表层黏化会导致一定程度的地表板结,影响耕作和作物出芽率。与之相反,耕地改为林地后,由于无耕作行为的干扰和较大林冠层的遮挡,林地地表裂缝得以持续存在,降雨地表径流形成微弱^[37],入渗壤中流携带上坡处黏粒迁移,在土壤深处和下坡处的坡底富集,土壤颗粒分选分级现象明显,同时也导致粉粒在坡顶处存在明显的富集效应。

3.2 沉陷区合理分区与适宜土地复垦方向的选择

沉陷区坡面微地形上土壤理化性质的异质性增

加为满足不同类型土地利用的立地条件提供可能。尽管林地在土壤保水性,削减地表径流和土壤侵蚀方面具有优势,但在土壤固碳能力和防止土壤黏粒迁移流失方面并不具有优势^[20,37],甚至于剔除表层0~10 cm土壤层,林地的土壤固碳能力较耕地显著降低 ($p < 0.01$)。在沉陷区上坡位(对照→坡顶→坡中),地表坡度相对较小 ($< 2^\circ$),从土壤学和经济学的角度,耕地的优势均较林地明显,耕作行为导致的地表裂缝被封堵,可有效控制黏粒向下坡处迁移和亚表层有机质的快速损耗;而在下坡位(坡底→坡中→中心),地表坡度相对较大 ($> 2^\circ$),林地或林灌草结合的优势较耕地明显,既能有效控制地表径流和土壤侵蚀,减少表层砂化的范围和中心处表层黏化现象,又能有效避免亚表层土壤有机质的快速损耗现象。进入塌陷中心,地势变得相对平缓,若面积较大可继续恢复为耕地。根据沉陷区土壤养分能值演变规律^[10],在沉陷深度1.5~2.0 m处,土壤养分能值最小,基本对应于本研究点的坡中处(表1)以及井下采煤巷道的边界^[38]。因此,平原型采煤沉陷区的土地复垦方向应以耕地为主,林地为辅的基本原则。在上坡位(沉陷深度小于2 m或地表坡度小于 2°)的大部分沉陷区应尽量复垦为耕地,通过平整土地、布置阶地和喷灌设施来改善农业生产条件,避免黏粒流失和土壤持续退化。在矿区沉陷的第一阶段地表初步稳定后^[38],在坡中至坡底的等高段(即对应于井下采煤巷道边界两侧)应及时复垦为林灌地,参照本塌陷区地形图,宽度可设置40~60 m,面积约占整个沉陷区的10%~20%,能起到对沉陷区土

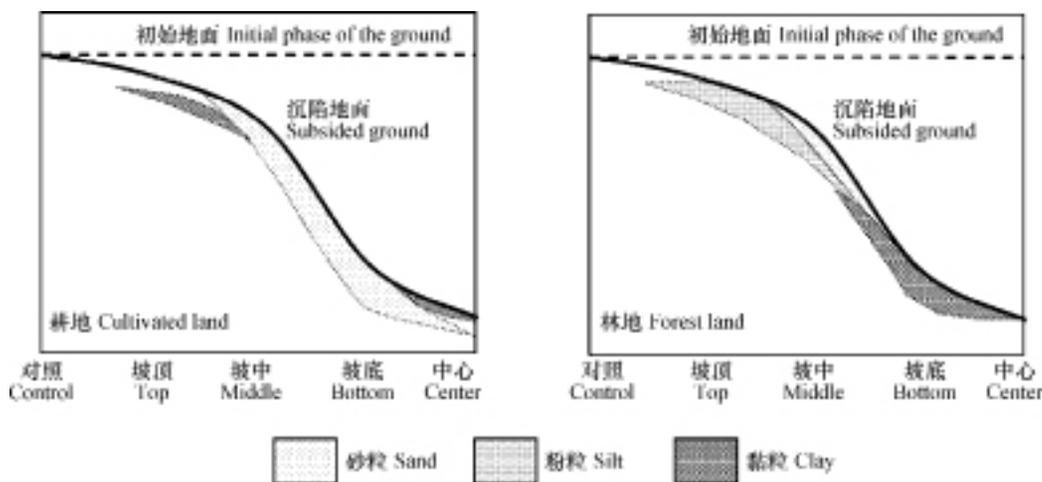


图6 沉陷区耕地和林地土壤质地的空间变异

Fig. 6 Spatial variability of soil texture in the cultivated land and forest land in the subsidence area

壤水分与养分流失控制和生态环境效益改善的关键作用。

4 结 论

在典型平原型采煤沉陷区坡面微地形上, 耕地土壤含水率和黏粒含量较林地显著降低 ($p < 0.05$), 而砂粒含量则显著增加 ($p < 0.01$)。林地土壤理化性质主要受坡度增加的影响, 入渗壤中流的沿坡面流动导致土壤有机质、砂粒和黏粒含量在水平方向上的变异程度增加, 在坡底处形成明显的深层 (> 30 cm) 土壤黏粒积累和碳“汇”。耕地土壤理化性质主要受裂缝的影响, 垂直优先流导致土壤质地垂直方向上的变异程度减小; 同时, 受坡度增加的影响, 水平表面流产生并导致在耕地的坡中到坡底处形成明显的表层 ($0 \sim 20$ cm) 土壤砂粒积累和碳“源”。平原型采煤沉陷区的土地复垦方向应以耕地为主, 林地为辅的基本原则。在上坡位和塌陷中心复垦为耕地, 可避免黏粒流失和土壤持续退化; 在坡中到坡底的等高段复垦为林灌地, 能起到对沉陷区土壤水分与养分流失控制和生态环境效益改善的关键作用。

参 考 文 献

- [1] 碧辟 (中国) 投资有限公司. BP世界能源统计年鉴 (2017版). [2017-07-05]. https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2017-.html
BP company. BP world energy statistics yearbook (2017 edition) (In Chinese). [2017-07-05]. https://www.bp.com/zh_cn/china/reports-and-publications/_bp_2017-.html
- [2] 国家发展改革委. 煤炭工业发展“十三五”规划 (公开发布稿). [2016-12-31]. <http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/W020170605639770457747.pdf>
National Development and Reform Commission. Coal industry development “Thirteen Five Year Plan” (public release) (In Chinese). [2016-12-31]. <http://www.ndrc.gov.cn/fzgggz/fzgh/ghwb/gjjgh/201706/W020170605639770457747.pdf>
- [3] 周妍, 周伟, 白中科. 矿产资源开采土地损毁及复垦潜力分析. 资源与产业, 2013, 15 (5): 100—107
Zhou Y, Zhou W, Bai Z K. The damaged lands and their reclamation potential in mining districts (In Chinese). Resources & Industries, 2013, 15 (5): 100—107
- [4] 赵明鹏, 张震斌, 周立岱. 阜新矿区地面塌陷灾害对土地生产力的影响. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14 (1): 77—80
Zhao M P, Zhang Z B, Zhou L D. The influence of land collapse on land productivity in Fuxin diggings (In Chinese). Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14 (1): 77—80
- [5] Lechner A M, Baumgartl T, Matthew P, et al. The impact of underground longwall mining on prime agricultural land: A review and research agenda. Land Degradation & Development, 2016, 27 (6): 1650—1663
- [6] 张敬凯, 母晓培, 侯合明, 等. 大峪沟矿区采煤塌陷对土壤含水率的影响. 矿山测量, 2017, 45 (1): 59—61
Zhang J K, Mu X P, Hou H M, et al. Analysis on the influence of mining subsidence on soil moisture content in Dayugou mine (In Chinese). Mine Surveying, 2017, 45 (1): 59—61
- [7] 吴艳茹. 半干旱地区采煤塌陷对土壤性质影响进展研究. 内蒙古师范大学学报 (哲学社会科学版), 2011, 40 (5): 109—112
Wu Y R. Effect of coal-mining subsidence in semi-arid areas on soil properties (In Chinese). Journal of Inner Mongolia Normal University (Philosophy & Social Science), 2011, 40 (5): 109—112
- [8] 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. 土壤, 2016, 48 (1): 22—28
Zhu Y C, Wang J M, Bai Z K, et al. Recent research progresses of influences of coal mining subsidence on soil physical and chemical properties (In Chinese). Soils, 2016, 48 (1): 22—28
- [9] 史沛丽, 张玉秀, 胡振琪, 等. 采煤塌陷对中国西部风沙区土壤质量的影响机制及修复措施. 中国科学院大学学报, 2017, 34 (3): 318—328
Shi P L, Zhang Y X, Hu Z Q, et al. Influence mechanism of coal mining subsidence on soil quality and restoration measures in west China aeolian sand area (In Chinese). Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2017, 34 (3): 318—328
- [10] 陈秋计, 孔云峰, 刘昌华, 等. 基于能值理论的开采沉陷地养分变化研究. 农业环境科学学报, 2007, 26 (6): 2125—2128
Chen Q J, Kong Y F, Liu CH, et al. Changes of nutrient in subsidence land based on energy (In

- Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26 (6): 2125—2128
- [11] 马迎宾, 黄雅茹, 王淮亮, 等. 采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (3): 497—504
Ma Y B, Huang Y R, Wang H L, et al. Effects of collapse fissures caused by coal mining on soil moisture in slope lands after rain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 497—504
- [12] 苏敏. 采煤塌陷区土壤养分循环及对生态环境的影响研究. 河北邯郸: 河北工程大学, 2010
Su M. Test study on soil nutrient cycling of coal mining subsidence area and its impact on the ecological environment (In Chinese). Handan, Hebei: Hebei University of Engineering, 2010
- [13] 程静霞, 聂小军, 刘昌华. 煤炭开采沉陷区土壤有机碳空间变化. *煤炭学报*, 2014, 39 (12): 2495—2500
Cheng J X, Nie X J, Liu C H. Spatial variation of soil organic carbon in coal-mining subsidence areas (In Chinese). *Journal of China Coal Society*, 2014, 39 (12): 2495—2500
- [14] 张合兵, 聂小军, 程静霞. ^{137}Cs 示踪采煤沉陷坡土壤侵蚀及其对土壤养分的影响. *农业工程学报*, 2015, 31 (4): 137—143
Zhang H B, Nie X J, Cheng J X. ^{137}Cs tracing of soil erosion and its impact on soil nutrients across subsidence slope induced by coal mining (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31 (4): 137—143
- [15] 王琦, 全占军, 韩煜, 等. 采煤塌陷对风沙区土壤性质的影响. *中国水土保持科学*, 2013, 11 (6): 110—118
Wang Q, Quan Z J, Han Y, et al. Effects of mining subsidence on soil properties in windy desert area (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11 (6): 110—118
- [16] 程方奎. 煤矿开采塌陷区土壤裂隙优先流对地表水土流失控制作用模拟研究. 合肥: 安徽理工大学, 2016
Cheng F K. Simulation study on soil crack preferential flow and its impacts on soil and water loss in coal mining subsidence areas (In Chinese). Hefei: Anhui University of Science and Technology, 2016
- [17] 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. *水土保持学报*, 2006, 20 (5): 52—55
Wang J, Gao Y, Wei J S, et al. Influence of mining subsidence on physical and chemical properties of soil in windy desert area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (5): 52—55
- [18] 何金军, 魏江生, 贺晓, 等. 采煤塌陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响. *煤炭科学技术*, 2007, 35 (12): 92—96
He J J, Wei J S, He X, et al. Ground subsidence caused by mining affected to soil physics features in loess hills (In Chinese). *Coal Science and Technology*, 2007, 35 (12): 92—96
- [19] 薛建春, 蔡松. 生态脆弱矿区土地利用动态变化研究——以平朔矿区为例. *水土保持研究*, 2011, 18 (6): 204—207
Xue J C, Cai S. Study on dynamic change of land use in ecological fragile mining area — A case study of Pingshuo mining area (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18 (6): 204—207
- [20] 聂小军, 吕洋, 刘昌华, 等. 土地利用与裂缝对采煤沉陷土壤养分的影响. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 36 (3): 73—78
Nie X J, Lü Y, Liu C H, et al. Impacts of land-use and ground fissure on soil nutrients in coal-mining subsidence landscapes (In Chinese). *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2017, 36 (3): 73—78
- [21] 杜琼, 张勇. 焦作市1951—2010年气候变化特征分析. *人民黄河*, 2014, 36 (1): 61—64
Du Q, Zhang Y. Characteristics of climate change of Jiaozuo City in 1951—2010 (In Chinese). *Yellow River*, 2014, 36 (1): 61—64
- [22] 王锐, 蔡太义, 张合兵, 等. 焦作采煤沉陷区土地综合整治与生态重建. *湖北农业科学*, 2013, 52 (14): 3283—3285
Wang R, Cai T Y, Zhang H B, et al. Comprehensive consolidation and ecological reclamation of coal mining areas in Jiaozuo (In Chinese). *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52 (14): 3283—3285
- [23] 谢晓梅. 土壤与植物营养学实验. 杭州: 杭州大学出版社, 2014
Xiao X M. Experiments on soil and plant nutrition (In Chinese). Hangzhou: Hangzhou University Press, 2014
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2013
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [25] 张承中. 环境规划与管理. 北京: 高等教育出版社, 2007
Zhang C Z. Environmental planning and management (In Chinese). Beijing: Higher Education Press,

- 2007
- [26] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995
National Soil Survey Office. Chinese soil (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1995
- [27] 崔鲁楠. 淮南矿区不同塌陷类型土壤典型特性研究. 合肥: 安徽大学, 2016
Cui L N. Study on soil typical characteristics of different types of subsidence in Huainan mining area (In Chinese). Hefei: Anhui University, 2016
- [28] 姚国征. 采煤塌陷对生态环境的影响及恢复研究. 北京: 北京林业大学, 2012
Yao G Z. Effect of coal mining subsidence on ecological environment and recovery technique (In Chinese). Beijing: Beijing Forestry University, 2012
- [29] 卞正富, 雷少刚. 基于遥感影像的荒漠化矿区土壤含水率的影响因素分析. 煤炭学报, 2009, 34 (4): 520—525
Bian Z F. Lei S G. Affecting factors and analysis of soil moisture for arid mining area based on TM images (In Chinese). Journal of China Coal Society, 2009, 34 (4): 520—525
- [30] 赵同谦, 郭晓明, 徐华山. 采煤沉陷区耕地土壤肥力特征及其空间异质性. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2007, 26 (5): 588—592
Zhao T Q, Guo X M, Xu H S. Spatial variation of soil fertility characters in coal mining subsidence area (In Chinese). Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2007, 26 (5): 588—592
- [31] 陈孝杨, 周育智, 于佳禾, 等. 砂姜黑土区采煤塌陷坡耕地氮磷时空分布与流失特征. 水土保持通报, 2015, 35 (2): 236—240, 245
Chen X Y, Zhou Y Z, Yu J H, et al. Temporal-spatial distribution and loss characteristics of nitrogen and phosphorus from slope farmland in coal mining subsidence areas with lime concretion black soil (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35 (2): 236—240, 245
- [32] 史娜娜, 韩煜, 王琦, 等. 采煤塌陷区土壤碳储量变化及其影响因素分析. 水土保持研究, 2015, 22 (6): 144—148, 154
Shi N N, Han Y, Wang Q, et al. Effects of mining subsidence on soil carbon storage in the semi-arid area (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22 (6): 144—148, 154
- [33] 郝从娜, 刘泽文. 高潜水位开采沉陷区土地利用及其碳储量变化遥感监测. 中州煤炭, 2015, 2015 (6): 111—113
Hao C N, Liu Z W. Study on land use change and its carbon reserve at a high groundwater level mining subsidence area using remote sensing (In Chinese). Zhongzhou Coal, 2015, 2015 (6): 111—113
- [34] 罗小杰. 也论覆盖型岩溶地面塌陷机理. 工程地质学报, 2015, 23 (5): 886—895
Luo X J. Further discussion on mechanism of covered karsts ground collapse (In Chinese). Journal of Engineering Geology, 2015, 23 (5): 886—895
- [35] 赵荟, 朱清科, 秦伟, 等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究. 水土保持通报, 2010, 30 (3): 64—68
Zhao H, Zhu Q K, Qin W, et al. Soil Moisture Characteristics on microrelief of dry south-slope on the Loess Plateau (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30 (3): 64—68
- [36] Wang J M, Wang P, Qin Q. The effects of land subsidence and rehabilitation on soil hydraulic properties in a mining area in the Loess Plateau of China. Catena, 2017, 159: 51—59
- [37] 孟红旗, 赵同谦, 徐华山, 等. 河岸带耕地降雨径流产流特征分析. 农业环境科学学报, 2009, 28 (4): 749—754
Meng H Q, Zhao T Q, Xu H S, et al. Research on the characteristics of the rainfall runoff in riparian farmland (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28 (4): 749—754
- [38] Zhou D W, Wu K, Cheng G L, et al. Mechanism of mining subsidence in coal mining area with thick alluvium soil in China. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8 (4): 1855—1867

Spatial Variability of Soil Moisture, Organic Matter Content and Soil Texture in Coal Mining Subsidence Area as Affected by Land Use

MENG Hongqi XIONG Renpeng WANG Chong GAO Cailing

(School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454010, China)

Abstract 【Objective】 In the primary energy structure of China, coal will remain to be the main component for a long time. The aim of this study was to explore mechanisms for soil moisture, nutrients and particles migrating and transforming in the micro topography of a slope in the coal mining subsidence area, and to provide an important basis of theoretical and practical values for scientific decision-making for comprehensive management of eco-environment in mining areas. 【Method】 Cultivated land and forest land in a plain coal mining subsidence, typical of the JIULISHAN mining in Jiaozuo City, Henan Province, China, were selected as object of the study. Soil samples were collected from various layers (0 ~ 10 cm, 10 ~ 20 cm, 20 ~ 30 cm, 30 ~ 40 cm and 40 ~ 50 cm) of the soil profiles various in position (center, bottom, middle, top and control) along a subsidence slope of cultivated land and forest land for analysis of moisture content, organic matter content and texture. And then a comparative analysis was done of the acquired data for determination of spatial variability of the indices. 【Result】 It was found that the cultivated land was significantly lower ($p < 0.05$) in soil moisture content and clay content (< 0.002 mm) but significantly higher ($p < 0.01$) in sand content (2 ~ 0.02 mm) than the forest land. Along the slope the soils in the middle or bottom were the lowest in soil moisture content, organic matter content and silt content (0.02 ~ 0.002 mm) but the highest in sand content and clay content, while along the soil profiles, significant accumulation of soil moisture, organic matter and sand were observed in the surface layer, but that of soil clay was in the bottom layer. Along the slope of the subsidence area, soil properties of the forest land varied largely with slope gradient, and infiltration flow of soil percolating water intensified horizontal variability of soil organic matter, sand and clay content, forming obvious clay deep soil layers (> 30 cm) and carbon “pools” at the bottom of the slope of forest land. However, in the cultivated land, soil properties were mainly affected by cracks, and priority flow of soil percolating water dulled vertical variability of the soil texture, meanwhile affected by slope gradient, horizontal surface flow appeared, forming obvious sandy surface soil layers (0 ~ 20 cm) and carbon “source” in the middle and bottom of the slope of cultivated land. 【Conclusion】 It is, therefore, suggested that the land in such plain subsidence in coal mining areas should be reclaimed mainly into cultivated land and then into forest land as complement. After the subsidence was temporarily stabilized, as the first phase of land reclamation, the lands in the center of the subsidence and on the upper-slope should be reclaimed into farmland to avoid further loss of clay and soil degradation, while lands at the mid- and down slopes, be turned into contour forest and shrub belts, about 40 ~ 60 m wide and corresponding to the underground coal mining roadway boundary. Both of the stops may play a key role in controlling soil water and nutrient losses and improving eco-environment of the area.

Key words Coal mining subsidence; Land use type; Slope position; Soil profile; Soil texture; Land reclamation

(责任编辑: 卢 萍)