

淮北矿区地表拉张裂隙区耕地土壤主要养分特征

范廷玉^{1,2}, 陈迎香^{1,2}, 路啊康^{1,2}, 颜昭耀^{1,2},
赵一凡^{1,2}, 严家平^{1,2}, 王顺^{1,2}, 王兴明^{1,2}, 魏祥平³, 张燕海³

(1.安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2.安徽省高潜水位矿区
水土资源综合利用与生态保护工程实验室, 安徽 淮南 232001; 3.淮北矿业集团, 安徽 淮北 235000)

摘要: [目的] 分析采煤沉陷导致的地表拉张裂隙对耕地土壤质量的影响, 评估采煤沉陷前后土壤养分变化, 为沉陷区土地采前一采中治理提供理论基础。[方法] 以淮北矿区孙疃矿地表拉张裂隙区为研究区域, 分别在沉陷前(2019年6月)、沉陷后(2019年12月、2020年7月)采集样品, 沉陷前布设5个采样点(T₁—T₅), 沉陷后选择两条典型纵向拉张裂隙, 由沉陷斜坡坡顶到坡底将沉陷区划分为A、B、C3个分区, 在裂隙两侧设置13个采样点, 每个采样点沿深度方向每隔20 cm采集一个土壤样品, 分别测试含水率、有机质、速效钾、速效磷、全氮和全磷含量6个指标。[结果] 拉张裂隙区两次采样土壤含水率、有机质、速效钾、全磷含量存在显著差异($p < 0.01$), 速效磷和全氮差异性不显著($p > 0.05$); 通过主成分分析得到研究区第一、二主成分分别为有机质、全氮、全磷(受负面影响)和含水率、速效钾(受到正面影响); 根据综合养分评价—主成分分析法发现裂隙区综合养分与对照点相比总体下降, 但拉张裂隙区内养分从沉陷斜坡坡顶至坡底逐渐上升。[结论] 地表拉张裂隙在采煤沉陷区分布广泛, 是造成沉陷区耕地质量下降的主要原因。

关键词: 淮北矿区; 地表拉张裂隙区; 土壤; 养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0008-08

中图分类号: S152.9, X825

文献参数: 范廷玉, 陈迎香, 路啊康, 等. 淮北矿区地表拉张裂隙区耕地土壤主要养分特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 8-15. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.002; Fan Tingyu, Chen Yingxiang, Lu Akang, et al. Main soil nutrient characteristics of cultivated land in surface tension fracture area of Huaibei mining area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 8-15.

Main Soil Nutrient Characteristics of Cultivated Land in Surface Tension Fracture Area of Huaibei Mining Area

Fan Tingyu^{1,2}, Chen Yingxiang^{1,2}, Lu Akang^{1,2}, Yan Zhaoyao^{1,2},

Zhao Yifan^{1,2}, Yan Jiaping^{1,2}, Wang Shun^{1,2}, Wang Xingming^{1,2}, Wei Xiangping³, Zhang Yanhai³

(1.School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2.Anhui Engineering Laboratory for Comprehensive Utilization of Water and Soil Resources & Ecological Protection in Mining Area with High Groundwater Level, Huainan, Anhui 232001, China; 3.Huaibei Mining Group, Huaibei, Anhui 235000, China)

Abstract: [Objective] The influences of surface tension fractures caused by coal mining subsidence on the soil quality of cultivated land were analyzed, and the changes in soil nutrients before and after coal mining subsidence were quantified, in order to provide a theoretical basis for the pre-mining and in-mining management of land in the subsidence area. [Methods] The study was conducted in the surface tension fracture area of the Suntuan Mine in the Huaibei mining area. Samples were collected before subsidence (April 2019), and after subsidence (December 2019, July 2020). Five sampling points were randomly located before subsidence. Two typical longitudinal tension fractures were selected after subsidence, and the subsidence area was divided into three zones from the top to the bottom of the subsidence slope. Thirteen sampling points were located on both sides of each fracture. At each sampling point, one soil sample was collected every 20 cm of soil depth. Sample collection was completed in December 2019 and July 2020. Six soil indicators were monitored: water

收稿日期: 2022-07-02

修回日期: 2022-07-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“动态沉陷区氮素在积水区—包气带中迁移转化机制研究”(41402309); 淮北矿区开采沉陷地拉张裂隙控制(淮北矿业集团 2019 年项目); 临涣矿区沉陷水域水资源优化配置(淮矿技合字 2021-14); 2019 年淮南市科技计划项目

第一作者: 范廷玉(1982—), 女(汉族), 江苏省连云港市人, 博士, 教授, 主要从事矿山生态环境研究。Email: ayufty@163.com。

content, organic matter, fast-acting potassium, fast-acting phosphorus, total nitrogen, and total phosphorus. [Results] There were significant differences in soil moisture content, organic matter, available potassium, and total phosphorus between the two samplings in the tension fracture area ($p < 0.01$), but there were no significant differences in available phosphorus and total nitrogen ($p > 0.05$). Principal component analysis showed that the first principal components were organic matter, total nitrogen, and total phosphorus (positive), and the second principal components were water content and fast-acting potassium (negative). Based on the comprehensive nutrient evaluation-principal component score analysis, the integrated nutrient score increased with time. However, the nutrients in the tension fracture zone gradually increased from the top to the bottom of the subsidence slope. [Conclusion] Surface tension fractures were widely distributed in the coal mining subsidence area, leading to a decline in soil quality.

Keywords: Huaibei mining area; surface tension fracture area; soil; nutrient

煤炭仍在中国一次能源结构中占据主导地位^[1]。井工开采导致的采煤沉陷区^[2],极易发生土壤侵蚀、养分流失、盐碱化、沼泽化等不利现象^[3],导致土壤肥力下降、土地减产,影响了土地正常使用,加剧了矿区人地矛盾。

目前针对采煤沉陷拉张裂隙区的土壤研究主要集中在沉陷区土壤中肥力指标改变、土壤的酶活性、土壤的机械组成、土壤微生物群落的改变等。在地表沉陷过程中,土层翻转、错位,土壤剖面层结构被破坏,土壤颗粒和质地组成发生改变,土壤养分与水分流失,最终导致土壤质量的退化^[4]。如山西省平朔煤矿井工开采导致土壤有机质和全氮的含量降低,空间变异性增大,空间自相关性减弱^[5]。宁夏不同塌陷年龄的沉陷区土壤水分、全氮、溶解性有机碳、氨氮、硝态氮、速效磷和速效钾出现不同程度的显著下降现象,土壤蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶活性较对照区有所下降,土壤含砂率上升^[6]。有学者发现裂隙的产生为养分和水分的迁移转运提供了新途径,坡面上径流和泥沙流会裹挟养分和土壤颗粒进行迁移^[7],不同元素在时空分布表现不同,如淮北砂姜黑土塌陷区坡耕地铵态氮和全磷在塌陷初期较未塌陷区显著降低,沉陷后期土壤铵态氮和全磷含量相差不大^[8]。焦作九里山煤矿土壤沙粒和黏粒多积累在坡中和坡地处,粉粒则聚集在坡顶处,土壤氮钾的有效性则在坡底凹陷处达到最高水平,磷在坡顶裂缝区达到最高值^[9-10]。沉陷裂隙对土壤中水和溶质的迁移起到重要的作用^[11],也对区域的农作物产量产生影响,如黄淮海煤炭开采区裂隙 60—90 cm 范围内显著影响了小麦穗数和产量^[12]。根据对黄土高原的研究表明土壤沉陷后土壤微生物丰度、均度下降,土壤微生物与环境因子的联系加强,促进了微生物群落的演替与优势菌种的确定,该研究中 *Streptomyces* 和 *Acidibacter* 作为优势菌种出现在该研究区中^[13]。

地表拉张裂隙区别于地质灾害中的地裂缝,地裂

缝是浅部岩土体在自然或人为因素作用下产生开裂或错动,并在地表形成具有一定长度和宽度的裂缝或变形带的宏观地质现象,规模大,常呈带状分布^[14]。拉张裂隙具有形成规模相对小、广泛分布于沉陷盆地的边缘和盆底、且不稳定的特点,包括横向裂隙(平行于切眼方向),主要发育在当前开采位置前方 150 m 范围,裂隙间距 8~12 m 不等,位于沉陷盆地底部,随着工作面推进方向分布,闭合—开裂交替,最后趋于闭合;纵向裂隙(平行于风巷、机巷),主要发育在风巷、机巷外围 60—150 m 范围,一般会发育多条,呈一定间隔出现,位于沉陷盆地四周,随着工作面推进不断向前延展,裂隙宽度及深度逐渐发展,趋于稳定并长期存在^[15]。有研究表明^[16-17]:中国东部采煤沉陷区进行农业耕种时普遍存在着裂隙区漏水漏肥的问题,而目前实施沉陷区土地综合利用均是在划定的沉陷区范围内采取均一的工程措施或者耕种方式,普遍出现了裂隙区产量不高、复垦效果不理想的现象,影响了采煤沉陷综合治理的整体质量。因此,拉张裂隙区是采煤沉陷地高效利用的短板,也是进行沉陷区土地精细化提质增效的关键区域,而目前中国东部沉陷区土地的研究未针对拉张裂隙区的土壤性质与变化趋势做专门的研究。因此,为探讨拉张裂隙区土壤肥力情况,本文以孙疃矿地表拉张裂隙区土壤为研究对象,在拉张裂隙形成初期、形成 7 个月后两个时间段,进行了土壤样品采集,研究有机质、氮、磷、钾等养分指标的时空变化,旨在为沉陷区土地采前—采中治理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

孙疃煤矿隶属于淮北矿业集团有限责任公司,位于安徽省淮北市濉溪县境内,淮北平原中部,区内地势平坦,地面标高 25.50~27.00 m,平均 26 m,东南部主要为丘陵区域,而西北部则为平原地区,地势为

自东南方向西方倾斜。矿区属暖温带半湿润气候,四季分明,冬冷夏热。年均无霜期为 203 d,最长 232 d,最短 180 d。年平均温度为 12.6 °C,7—8 月最高,平均温度为 28.9 °C。矿区内主要土地利用类型为耕地,作物以冬小麦—夏玉米为主。建筑用地或其他类型用地较少。孙疃煤矿 1047 工作面走向长 560 m,倾向宽度 220 m,采高约 3.3 m,采煤方法为综采法,开采时间自 2019 年 7 月 15 日至 2019 年 12 月底,主采煤层为 10 煤,采深—380.4 m 至—427.3 m,工作面切眼方向为 150°,机巷、风巷方向为 60°。通过现场调查,1047 工作面由于开采活动影响形成了不同的地表拉张裂隙,横向裂隙宽度和深度相对较小,裂隙宽度从几毫米到几厘米不等,深度从几十厘米至 2~4 m 不等;纵向裂隙长度从十几米到一两百米不等,宽度从几厘米到几十厘米不等,深度从几米至几十米不等^[18]。在 2020 年 7 月进行采样时,沉陷区中心位置出现了积水现象。

1.2 样品收集和分析

点位布设结合拉张裂隙的现场发育和分布情况,确定沉陷区的典型拉张裂隙,参考《土壤环境监测技术规范(HJ/T166-2004)》《农田土壤环境质量监测技术规范(NY/T395-2012)》^[19-20]等标准。2019 年 6 月(开采前)在 1047 工作面上方地表布设 5 个参照点,2019 年 7 月,1047 号工作面开始采煤,分别在 2019 年 12 月,2020 年 7 月采集裂隙区 13 个采样点土样,共采集 31 个点位。每个采样点用分层采样器沿深度 1 m 方向每隔 20 cm 采集一个土样(0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm),合计 155 个土壤样品,土样采集后剔除石块等杂物,封存运回实验室。2019 年 12 月采样区沉陷坡度约 1.5°,2020 年 7 月沉陷坡度约 2.5°。在沉陷区风巷方向一侧自高到低选择两条典型近乎平行的主要纵向拉张裂隙 C₁,C₂,长约 70 m,裂隙宽度 2~15 cm,两条裂隙距离 25 m,沿着两条纵向拉张裂隙将沉陷区分成自高到低的 A,B,C,3 个区域,参考土壤质量相关研究文献^[12,21-22],综合考虑裂隙影响范围,自沉陷盆地边缘向盆底设置一条长约 100 m 垂直于裂隙 C₁,C₂ 的垂线,沿着垂线在裂隙两侧布设 12 个采样点,A 区 4 个点位 F₁—F₄,B 区 4 个点位 F₅—F₈ 分别分布在 C₁ 裂隙和 C₂ 裂隙两侧,每个点位间隔 0.5 m,F₄ 与 F₅ 点距离 23 m,C 区 F₉—F₁₂,每个点间隔 15 m,F₁₃ 为对照点,设置在未沉陷耕地区域。

1.3 测试指标及分析方法

根据《土壤质量指标与评价》^[23]提出的主导性、生产性和稳定性选取原则,结合拉张裂隙区的环境状

况,以及土壤有机质、氮、磷、钾等养分指标的空间异质性及影响因素是农田土壤的研究热点^[24-25],本研究选取土壤有机质、全氮、全磷、速效钾、速效磷作为养分评价因子。取适量鲜土密封后冰箱内冷冻保存,用于测量土壤含水率(重量法^[26])。取适量风干土,去杂,研磨过筛后密封保存备用,分别测试土壤有机质(重铬酸钾容量法—外加热法)、全氮(凯氏定氮法)、全磷(氢氧化钠碱融—钼锑抗分光光度法)、速效钾(乙酸铵浸提—火焰光度法)、速效磷(碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法)^[27],每个样品测试平行 3 次,相对误差大于 5%,重复测试 1 次。

1.4 数据处理

采用 SPSS 一般线性模型(GLM)单变量模型分别对土壤含水率、有机质、速效磷、速效钾在采样时间、采样位置(A 区、B 区、C 区)和土壤剖面(0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm)共 3 个因素进行基于边际均值的线性独立成对比较,并进行配对 T 检验。采用 SPSS 主成分分析对相同土层不同采样时间所得数比较均值。采用 Origin 软件绘制表层土壤含水率、有机质、速效磷、速效钾、全氮和全磷含量变化图。

1.5 养分评价研究方法

1.5.1 评价指标标准化 养分评价是将土壤养分情况进行量化的一种方法。由于不同评价指标之间的单位与量纲不同,因此需要对数据进行统一处理,达到各指标间量纲统一化,使各个指标间有可比性。隶属度函数计算值一般在 0.1~1.0 之间,计算值越高代表土壤养分越适合植物生长,1.0 代表完全适合植物生长,而 0.1 代表土壤养分会成为植物生长的限制因素。不同的指标选择的隶属度函数也不同,本研究选择 S 型隶属度函数对指标进行计算,得到结果^[28]。

土壤中部分指标在一定范围内随着含量增加对植物生长的贡献率也增加,当含量低于或高于这个范围时,其贡献率将维持在低水平或高水平不再变化。公式为:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x < x_a) \\ 0.1 + \frac{0.9(x - x_a)}{x_b - x_a} & (x_a \leq x < x_b) \\ 1 & (x \geq x_b) \end{cases} \quad (1)$$

其中: x 是土壤的测定值; x_a 和 x_b 为根据第二次全国土壤普查所选择的转折值(表 1)。

1.5.2 土壤养分评价—主成分分析法 对数据进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验和 Bartlett 球形检验,判断是否适宜进行主成分分析。根据主成分分析法求得各指标的公因子方差所占总方差的比例作为

权重 a_i 并计算综合土壤养分系数 S , 计算公式如公式(2)所示^[29]:

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \times F(x_i) \quad (2)$$

式中: a_i 为第 i 个土壤养分指标的权重系数; n 为指标数量; $F(x_i)$ 为各项指标的隶属度值。

表 1 土壤养分指标隶属度函数转折点取值
Table 1 Turning point value of soil nutrient index membership function

转折点	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
x_a	6	3	50	0.5	0.2
x_b	40	25	150	2.0	2.5

2 结果与分析

2.1 土壤性质时空变化

研究区土壤 3 次采样的各指标统计结果见表 2。从时间上看,拉张裂隙形成初期与形成后 7 个月土壤含水率、有机质、速效磷、速效钾、全氮、全磷含量等各指标变异性表现为弱变异、强变异两种特征,变异程度排序为:全磷>有机质>速效磷>全氮>速效钾,有机质呈正偏度,其他均属于负偏度。拉张裂隙的两次土壤指标中含水率、有机质、速效钾、全磷存在极显著差异($p < 0.01$),速效磷和全氮差异性不显著($p > 0.05$);

对比拉张裂隙形成前、未沉陷时采样的两类对照点,总体上土壤的含水率变化不大,主要表现为季节性波动;土壤有机质主要包括土壤植物、动物、微生物的残体、分泌物、排泄物^[30],与当地的土壤类型、施肥方式、作物管理模式等自然因素和人为因素有关^[31],有机质含量沉陷后期相比初期减少了 7.3%~23%,可能由于初期采样时是冬季,作物秸秆还田及生物残体导致了腐殖质的富集,其受自然和人为因素扰动较大;无论是沉陷前后对比还是与同时期的未沉陷区域对比,速效磷持续升高,速效钾表现为季节变化,夏季高于冬季,研究区一直作为耕地使用,种植期间会施用尿素、复合肥、磷酸二氢等用于补充养分,特别是夏季玉米出苗、拔苗期会增加钾肥的占比,这可能是 2020 年 7 月沉陷后期速效钾大量上升的原因,且沉陷后地势降低,沉陷区中心位置出现了积水现象,养分随沉陷斜坡的水土流失等在沉陷盆地聚集,导致整体沉陷区速效养分平均值升高,表明速效养分更容易随降雨发生流失和坡底集聚现象^[28,32]。全磷持续降低,呈富氮富钾贫磷的特点^[25],这是由于土壤中的磷大部分来源于基岩的风化,而表层土壤磷直接来源于凋落物中的磷,并通过植物的表聚作用在表层土壤积累^[30]。如果施肥量减少,会直接导致土壤磷素含量降低。土壤氮的来源除了施肥,还包括生物固氮作用,所以全氮虽相较于未沉陷区降低,但受人为扰动迹象比磷素小^[9]。

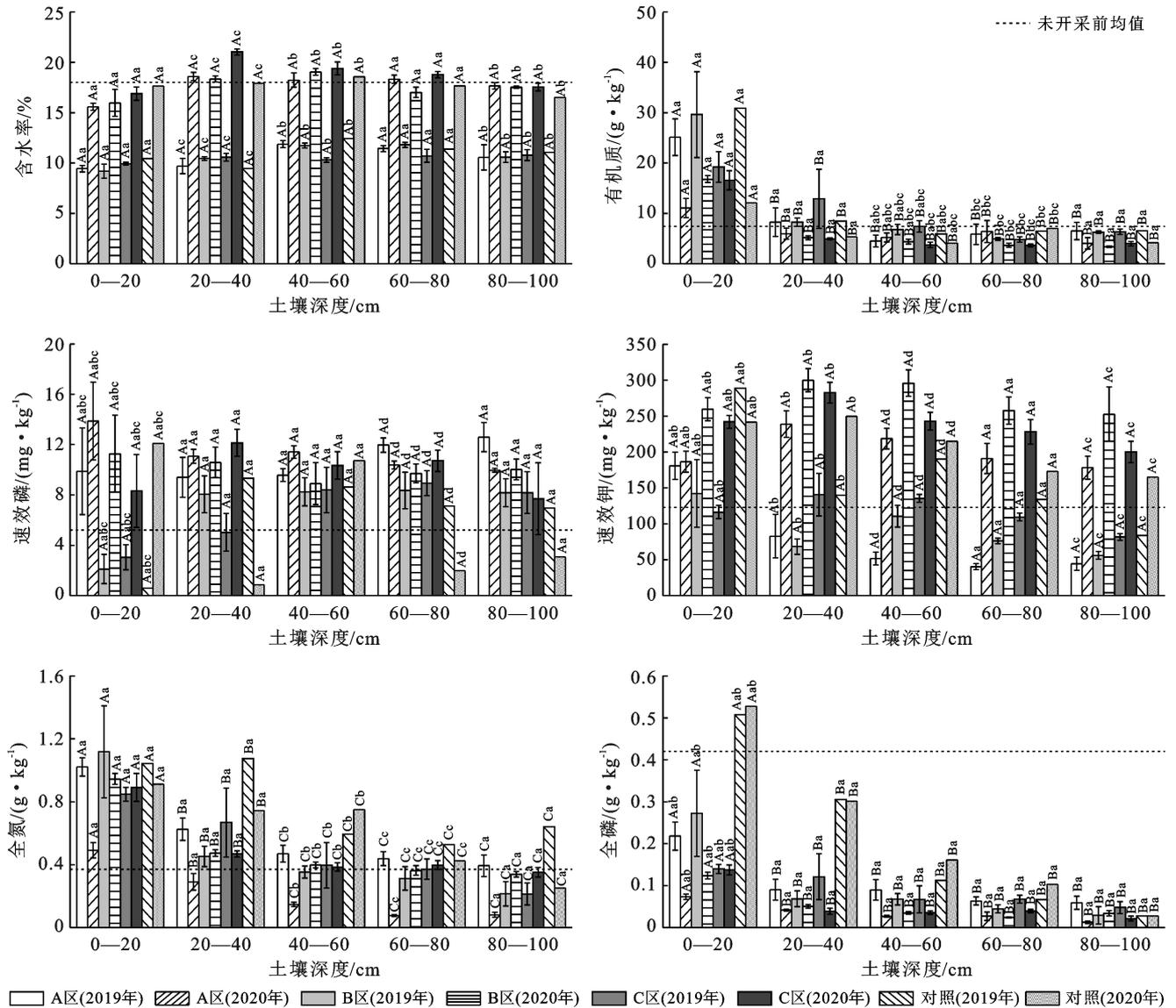
表 2 淮北矿区拉张裂隙区土壤指标统计结果

Table 2 Statistical result of soil index of tensile fracture zone in Huaibei mining area

项目	时间	均值	标准差	偏度	峰度	CV	min	max	对照
含水率/ %	201906	17.75	1.47	-0.56	0.07	0.08	14.10	20.27	—
	201912	10.59	1.40	-1.73	6.29	0.13	4.00	12.92	10.96
	202007	17.92	1.56	-0.38	1.93	0.09	12.30	21.77	17.50
有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	201906	7.14	7.71	1.60	1.20	1.10	0.41	26.61	—
	201912	10.79	9.29	2.06	4.10	0.86	2.36	46.16	11.65
	202007	6.62	4.73	1.61	1.54	0.71	1.50	22.09	8.60
速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	201906	5.21	6.59	2.06	5.45	1.29	0.03	28.75	—
	201912	8.42	4.01	-0.05	-0.26	0.48	0.58	18.48	6.52
	202007	10.03	3.67	-0.58	1.05	0.37	0.86	18.62	5.70
速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	201906	120.40	2.60	0.72	1.43	0.23	73.25	197.20	—
	201912	101.74	5.91	1.11	1.07	0.55	21.25	288.94	167.36
	202007	236.01	4.38	0.20	-0.17	0.21	142.23	358.26	208.10
全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	201906	0.37	0.28	1.09	-0.17	0.77	0.09	1.02	—
	201912	0.53	0.33	1.47	3.21	0.62	0.03	1.83	0.76
	202007	0.40	0.25	1.00	0.97	0.63	0.04	1.15	0.60
全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	201906	0.64	0.50	1.96	3.94	0.80	0.20	2.31	—
	201912	0.10	0.09	2.52	8.27	0.89	0.01	0.51	0.20
	202007	0.05	0.04	1.61	1.92	0.78	0.00	0.17	0.22

由图 1 可知,拉张裂隙区表层土壤含水率:A 区 < B 区 < C 区 < 对照区,沉陷初期表层有机质、全氮、全磷含量依此为:B 区 > A 区 > C 区,有效磷主要集中在 A 区,含量随着沉陷斜坡降低。土壤水分和全磷含量随着坡度的降低而增高。表层土壤有机质、

速效钾、全氮含量依此为:B 区 > C 区 > A 区。速效磷表现出了随坡度的降低而降低的“逆序”现象,这可能是因为裂隙会增加土壤氧化还原电位,利于其释放与矿化并且速效磷易集中在坡面中部的特性导致的^[33-34]。



注:大写字母表示不同土层差异性;小写字母表示同一土层差异性($p < 0.05$)。

图 1 淮北矿区拉张裂隙区土壤各指标垂向分布

Fig.1 Vertical distribution of soil indexes in tension fracture zone of Huaibei mining area

从土壤剖面来看,拉张裂隙区土壤 7 个月间含水率、有机质、速效磷、速效钾、全氮、全磷在垂直剖面层主要表现为表层集聚与均匀分布现象。土壤有机质、全氮、全磷在土壤剖面层上表现为极显著的表层集聚现象($p < 0.01$),并且随着土层深度的增加含量逐渐减小。其中有机质、全磷表现最为明显,表层土壤含量是其余土层的 1.5 倍以上。沉陷区一直作为耕地使用,其养分的主要来源为人工施肥与农作物、生物

残体的腐殖质,造成了这些养分表层集聚的现象。土壤水分、速效钾在 5 个土层中分布较为均匀,含量相差不大。拉张裂隙形成 7 个月间土壤速效钾存在差异性,形成初期表层土壤速效钾高于其他土层,经过 7 个月后速效钾主要集中于 20—60 cm 土层向两端减小。

0—20 cm 土壤耕作层是植物赖以生存的基础,是植物生长汲取养分的主要土层,更容易受到外界环

境的影响。虽然径流与泥沙流会造成斜坡养分流失但裂隙的拦截作用则会使得部分养分堆积到裂隙区,拉张裂隙形成后土壤整体环境发生改变,这些改变受微生物群落和植物变化、土壤构造变化、淋溶、坡度径流、和裂隙渗流影响^[35-37]。沉陷初期的土壤变得疏松、孔隙率增大、含水率增加,有效养分相对充足且流失速率较大、土壤有机质和迟效养分面临矿化和风化速率增加的风险^[38]。在耕地区,由于沉陷作用改变了地面坡降,导致了拉张裂隙的产生,从而加剧了水土流失,降低了耕地的土壤质量。裂隙与坡度是影响土壤水与养分运移的重要因素。在降雨过程中,雨水在沉陷形成的坡面上容易形成明显的地表径流裹挟着土壤中的元素进行迁移,造成养分流失的现象,坡度增大,经过雨水的冲刷溶解态养分与颗粒态养分迁移到低洼地区形成养分聚集的现象^[32, 39]。

2.2 主成分分析

对拉张裂隙区的土壤各指标进行主成分分析,结果见表 3。前 3 个主成分的累计贡献率已达 93.69%。其中第一主成分中的有机质、全氮、全磷特征向量系数较大(均大于 0.8),方差贡献率已达 52.40%,主要反映综合养分情况,其值越大说明土壤养分含量越高;第二主成分中的含水率与速效钾特征向量系数较大(均大于 0.7),累计贡献率已达 80.25%,第 2 主成分主要表征土壤湿度与速效钾的含量,其值越大,土壤水分含量及土壤速效钾含量越高。土壤速效钾易溶于水,这可能是第 2 主成分中养分指标为速效钾的原因。第 3 主成分中速效磷的特征向量系数为 0.85,累计贡献率为 93.69%,单个贡献率为 13.43%,代表了速效磷的含量。

表 3 淮北矿区拉张裂隙区土壤性质 3 个主成分的特征向量系数与贡献率

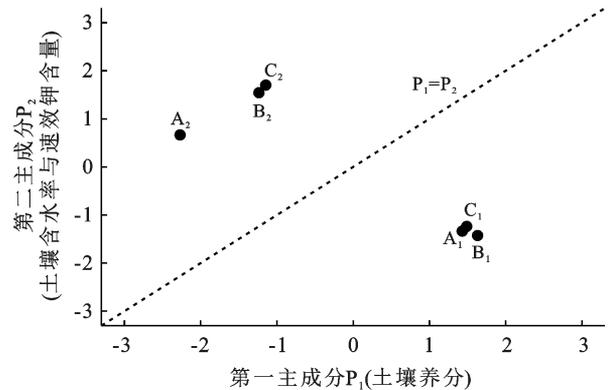
Table 3 Eigenvector coefficients and contribution rates of three principal components of soil properties in tension fracture zone of huabei mining area

项目	主成分			
	1	2	3	
特征向量系数	含水率	-0.591	0.752	-0.103
	有机质	0.923	0.227	0.926
	速效磷	-0.501	0.157	0.850
	速效钾	-0.149	0.946	-0.154
	全氮	0.888	0.313	0.121
	全磷	0.939	0.188	0.160
	方差贡献率/%	52.407	27.846	13.431
累计方差贡献率/%	52.407	80.255	93.686	

前两个主成分的累计方差贡献率已经达到 80.25%,说明含水率、有机质速效磷等 6 个指标反应

研究区大部分理化性质。根据已得到的 6 个指标的标准化值及前 2 个主成分的特征向量系数计算各个区域(A 区、B 区、C 区)所对应的第 1,2 主成分值,绘制散点图(图 2)。

如图 2 所示,拉张裂隙区土壤在 7 个月前后各指标所得的第 1,2 主成分值差异明显。沉陷初期所得主成分值集中分布在 Prin1=Prin2(以 $P_1=P_2$ 表示)右下方,而沉陷 7 个月后的土壤主成分值分布在 $P_1=P_2$ 左上方。这表明拉张裂隙区土壤指标中受影响最大的为有机质、全氮、全磷。其次是含水率、速效钾。受影响最小的是速效磷。其中第一主成分受负面影响,土壤养分水平下降。第二主成分受正面影响,土壤含水率及速效钾含量上升。



注:A₁为沉陷初期 A 区;B₁为一沉陷初期 B 区;C₁为沉陷初期 C 区;A₂为沉陷 7 个月后 A 区;B₂为沉陷 7 个月后 B 区;C₂为沉陷 7 个月后 C 区。

图 2 淮北矿区沉陷各区域第 1,2 主成分值散点图

Fig.2 Scatter diagram of first and second principal component values of subsidence areas in Huabei mining area

2.3 养分评价

根据公式(1)计算结果绘制隶属度雷达图(图 3)。拉张裂隙形成 7 个月前后各土壤指标隶属度函数值最小值均为全氮、全磷,分别为 0.16 与 0.13 左右。其次为有机质、速效磷、速效钾。说明全氮、全磷一直是研究区土壤整体养分水平的限制因素,在此过程中,土壤有机质、全氮、全磷隶属度值下降,速效磷、速效钾上升。

选择有机质、速效钾、速效磷、全氮、全磷为评价指标,并基于公因子方差求出的权重系数,有机质(0.226) > 全磷(0.224) > 全氮(0.221) > 速效钾(0.192) > 速效磷(0.137)。代入公式(2)得到综合养分系数,结果见图 4。未开采前研究区土壤综合养分得分均值达到 0.285 左右,沉陷 7 个月间沉陷地区土壤综合养分得分先降低后提高。沉陷初期土壤养分综合得分与对照区相差 15%~30%左右,沉陷 7 个月

后土壤养分略低于对照区,虽然土壤整体有机质、全养分指标含量下降,但速效养分含量的上升特别是速效钾的大量增加导致了上述现象,侧面印证了研究区土壤养分得分较低。地表拉张裂隙形成后,土壤表层平均养分得分下降,沿坡度方向,不同位置点的养分得分由:A区>B区>C区变为:B区>C区>A区。这表明土壤养分在塌陷的影响下发生不同程度的流失。A区由于裂缝的存在,水肥流失严重,土壤养分最为短缺;B区的养分情况不同于A区,当裂隙深度较浅时,土壤养分会随降水运移到塌陷中心,造成C区土壤养分富集;当裂隙发育较大,会造成由坡顶向坡底迁移的养分在裂隙处中断流失,造成B区养分大于C区。研究区深层土壤综合养分得分均上升到相似水平。这与郭晓明^[35]的研究结果一致,综合养分得分会随着坡度的变化不规则变化,但地势高的A区域面临着更大的养分流失的风险。淮北地区研究区拉张裂隙区土壤养分变化与沉降坡面的水土流失与拉张裂隙拦截的综合作用密不可分,土壤中黏粒在降雨等外力作用下,会沿着坡面迁移,同时也会被拉张裂隙截留,改变迁移路径,随着优先流往下迁移;同时,土壤中可溶性元素会随着水土流失迁移,但不同指标的分子结构不同,在整个过程中呈现了不同的迁

移特性^[15],导致了拉张裂隙区土壤性质与养分改变的复杂性,每种营养元素在作物生长中的作用都是独一无二的,例如氮元素是构成蛋白质、酶等的重要元素,高含量的钾不能替代,所以在拉张裂隙区,不同区域表现出了养分水平的差异性,为了保持采煤沉陷拉张裂隙区的土壤质量,应根据不同区域的土壤限制性因子进行有针对性地补充相关元素,进行分区提质增效。

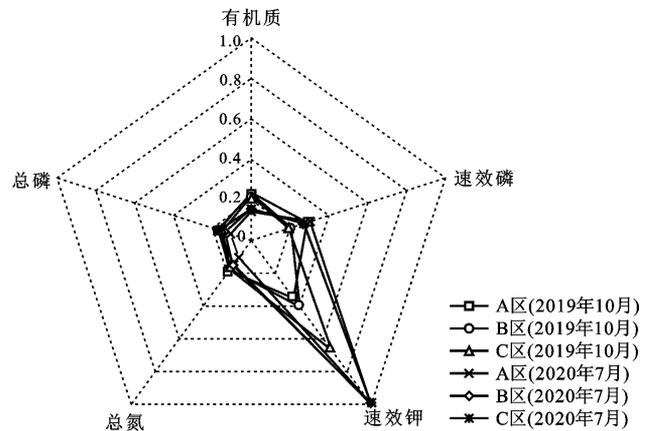
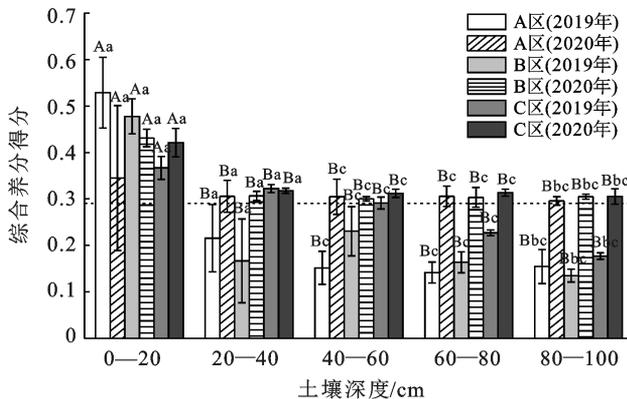


图3 淮北矿区各项土壤指标隶属度函数值雷达图

Fig.3 Radar chart of membership function value of soil indexes in huabei mining area



注:大写字母表示不同土层差异性;小写字母表示同一土层差异性($p < 0.05$)。

图4 淮北矿区养分评价综合得分

Fig.4 Comprehensive score map of nutrient evaluation in Huaibei mining area

3 结论

(1) 采煤沉陷导致的拉张裂隙对含水率、有机质、速效磷、速效钾、全氮、全磷等土壤各指标均存在影响。拉张裂隙区土壤有机质、全磷含量极显著下降($p < 0.01$),含水率、速效钾含量极显著上升($p < 0.01$),全氮含量下降,速效磷含量上升。

(2) 主成分分析结果表明拉张裂隙区土壤有机质、全氮和全磷受沉陷影响最大,其次为速效钾、含水

率,影响最小为速效磷;

(3) 养分评价结果表明研究期内表层土壤综合养分发生明显变化,沉陷初期拉张裂隙区土壤养分得分沿沉陷盆地边缘向盆底降低,土壤养分的限制因子为全氮、全磷,沉陷7个月后位于沉陷盆地低区的B、C两区土壤养分得分明显高于沉陷盆地边缘的A区,整体养分得分也上升,原因是可能是施肥、沉陷斜坡水土流失、优先流等作用导致土壤的养分综合得分均上升,这为我国东部采煤沉陷区土地高效利用提供了理论参考。

[参 考 文 献]

- [1] Dodson J, Li Xiaoqiang, Sun Nan, et al. Use of coal in the bronze age in China [J]. *The Holocene*, 2014, 24(5):525-530.
- [2] 陈超,胡振琪.我国采动地裂缝形成机理研究进展[J].*煤炭学报*,2018,43(3):810-823.
- [3] 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[J].*矿山测量*,2017,45(1):59-61.
- [4] 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.
- [5] Jing Zhaorui, Wang Jinman, Zhu Yucheng, et al. Effects of land subsidence resulted from coal mining on soil nutrient distributions in a loess area of China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,177:350-361.
- [6] Ma Kang, Zhang Yuxiu, Ruan Mengying, et al. Land subsidence in a coal mining area reduced soil fertility and led to soil degradation in arid and semi-arid regions [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(20):3929.
- [7] 谢放放,李保莲,焦俊党,等.开采沉陷区土壤特性空间变化及其作物响应[J].*河南理工大学学报(自然科学版)*,2021,40(4):89-97.
- [8] 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[J].*水土保持通报*,2015,35(2):236-240.
- [9] 孟红旗,郭晓明,杨英,等.采煤沉陷坡面土壤氮磷钾养分有效性的空间变异性[J].*土壤学报*,2020,57(4):844-854.
- [10] 孟红旗,熊仁鹏,王崇,等.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[J].*土壤学报*,2018,55(4):911-922.
- [11] 吴群英,冯泽伟,胡振琪,等.生态脆弱矿区地表裂缝动态变化对土壤含水量的影响[J].*煤炭科学技术*,2020,48(4):148-155.
- [12] Luo Zhanbin, Ma Jing, Chen Fu, et al. Cracks reinforce the interactions among soil bacterial communities in the coal mining area of loess plateau, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(24):4892.
- [13] 骆占斌.黄土高原矿区采煤扰动后土壤微生物群落结构变化及驱动机制研究[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2019.
- [14] 卢全中,李聪,刘聪,等.地裂缝分类及地面沉降区构造地裂缝防治对策[J].*地球科学与环境学报*,2021,43(2):366-375.
- [15] 范廷玉,钟建,王顺,等.高潜水位矿区地表拉张裂隙区土壤特征研究[J].*安徽理工大学学报(自然科学版)*,2021,41(3):15-21.
- [16] 李阳,郑刘根,程桦,等.采煤沉陷区表层土壤氮、磷和有机质分布特征及相关性分析[J].*环境污染与防治*,2015,37(10):52-57.
- [17] 曹振环,王金满,刘鹏,等.采煤塌陷区农田整治规划设计技术的研究进展[J].*江西农业大学学报*,2016,38(4):782-791.
- [18] 冯宇.淮北矿区地表拉张裂隙发育特征及防控技术研究[D].安徽 淮南:安徽理工大学,2020.
- [19] 中国环境监测总站,南京市环境监测中心站.土壤环境监测技术规范:HJ/T 166-2004[S].国家环境保护局发布,2012.
- [20] 农业部环境保护科研监测所.农田土壤环境质量监测技术规范:NY/T 395-2012[S].中华人民共和国农业部发布,2012.
- [21] 刘英,雷少刚,宫传刚,等.采煤沉陷区土壤含水量变化对柠条叶片叶绿素荧光的响应[J].*生态学报*,2019,39(9):3267-3276.
- [22] 毕银丽,伍越,张健,等.采用 HYDRUS 模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律[J].*煤炭学报*,2020,45(1):360-367.
- [23] 徐建明,张甘霖,谢正苗.土壤质量指标与评价[M].北京:科学出版社,2010.
- [24] 姜霓雯,童根平,叶正钱,等.浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素[J].*生态学报*,2022,42(6):2430-2441.
- [25] 王佟,章梅,徐辉,等.青海木里煤田聚乎更矿区土壤肥力及重金属风险评价[J].*煤田地质与勘探*,2022,52(4):113-120.
- [26] 谢晓梅.土壤与植物营养学实验[M].浙江 杭州:浙江大学出版社,2014.
- [27] 鲍士旦主编.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [28] 林圣玉,李英,张华明,等.鄱阳湖区坡耕地土壤肥力质量评价[J].*中国水土保持*,2018(11):60-63.
- [29] 张凯旋,商侃侃,达良俊.上海环城林带不同植物群落土壤质量综合评价[J].*南京林业大学学报(自然科学版)*,2015,39(3):71-77.
- [30] 陈永春,赵萍,郑刘根,等.淮南潘一矿采煤沉陷复垦区土壤肥力时空变化特征[J].*环境监测管理与技术*,2021,33(3):21-24.
- [31] 赵士诚,曹彩云,李科江,等.长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2014,20(6):1441-1449.
- [32] 薛海龙,许文年,刘大翔.两种边坡生态修复模式土壤肥力与酶活性的变化[J].*水土保持通报*,2016,36(4):182-187.
- [33] Guo Xiaoming, Zhao Tongqian, Chang Wenke, et al. Evaluating the effect of coal mining subsidence on the agricultural soil quality using principal component analysis [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2018,78(2):173-182.

- [13] 王玲,施建军,史慧兰,等.氮磷添加对环青海湖高寒草原牧草营养成分和土壤养分的影响[J].草业科学,2019,36(12):3065-3075.
- [14] 黄军,王高峰,安沙舟,等.施氮对退化草甸植被结构和生物量及土壤肥力的影响[J].草业科学,2009,26(3):75-78.
- [15] 王琦,师尚礼,曹文侠.国际草田耕作制度研究进展[J].草原与草坪,2013,33(2):85-91.
- [16] 刘捷.浅谈国内外牧草品种选育与人工草地建植技术进展[J].天津农林科技,2006(3):36-37.
- [17] 何飞,赵忠祥,康俊梅,等.氮磷钾配比施肥对紫花苜蓿草产量及品质的影响[J].中国草地学报,2019,41(5):24-32.
- [18] 谢开云,何峰,李向林,等.我国紫花苜蓿主产田土壤养分和植物养分调查分析[J].草业学报,2016,25(3):202-214.
- [19] 王平,王天慧,周雯,等.禾—豆混播草地中土壤水分与种间关系研究进展[J].应用生态学报,2007,18(3):653-658.
- [20] 刘明健,张永亮,贾玉山,等.豆禾混播对草地土壤碳氮磷含量的影响[J].中国草地学报,2021,43(8):50-57.
- [21] 李昂,吴应珍,台喜生,等.甘肃沿黄灌区种植豆禾混播牧草对土壤盐分和养分的影响[J].草地学报,2021,29(4):664-670.
- [22] 霍雅媛,曹宏,柴守玺,等.不同豆禾牧草混播对土壤质地及肥力的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(3):238-244.
- [23] 李洪影.生物措施对松嫩平原盐碱退化草地改良效果的研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2014.
- [24] 汤洁,梁爽,林年丰,等.黄花草木樨改良盐碱土及修复生态环境研究:以松嫩平原吉林西部为例[C].美国科研出版社,2012:757-761.
- [25] 李强.不同恢复措施对松嫩平原退化草地的作用[D].吉林 长春:东北师范大学,2010.
- [26] 张永亮,于铁峰,郝凤,等.施肥与混播比例对豆禾混播牧草产量及氮磷钾利用效率的影响[J].草业学报,2020,29(11):91-101.
- [27] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [28] 姜哲浩,康文娟,柳小妮,等.施肥和补播对高寒草甸草原载畜能力的影响[J].草原与草坪,2018,38(6):68-78.
- [29] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011,31(18):5207-5216.
- [30] 齐鹏,刘晓静,刘艳楠,等.施氮对不同紫花苜蓿品种氮积累及土壤氮动态变化的影响[J].草地学报,2015,23(5):1026-1032.
- [31] 张进霞,刘晓静,郝凤,等.氮磷调控对紫花苜蓿氮积累与土壤氮磷营养的影响[J].草地学报,2016,24(1):61-68.
- [32] 郝凤,刘晓静,齐敏兴,等.磷水平和接根瘤菌对紫花苜蓿根系形态特征和根瘤固氮特性的影响[J].草地学报,2015,23(4):818-822.
- [33] 于铁峰,郝凤,张永亮,等.沙地豆禾混播草地土壤酶与土壤养分对混播比例的响应[J].草地学报,2021,29(6):1217-1223.
- [34] 徐志闻,刘亚斌,胡夏嵩,等.基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J].农业工程学报,2019,35(5):148-154.
- [35] 季波,何建龙,杜建明,等.不同补播配置模式对宁夏荒漠草原土壤有机碳和全氮储量的影响[J].中国草地学报,2021,43(3):60-66.
- [36] White J, Hodgson J. New Zealand Pasture and Crop Science [M]. Oxford University Press,2000.
- [37] Fan Jingwei, Du Yanlei, Wang Bingru, et al. Forage yield, soil water depletion, shoot nitrogen and phosphorus uptake and concentration, of young and old stands of alfalfa in response to nitrogen and phosphorus fertilisation in a semiarid environment [J]. Field Crops Research, 2016,198:247-257.
- [38] 陈宝书.豆科和禾本科牧草之间的竞争[J].牧草与饲料,1993,4:23-27.

(上接第 15 页)

- [34] Zhang Shaoliang, Jiang Lili, Liu Xiaobing, et al. Soil nutrient variance by slope position in a Mollisol farmland area of Northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2016,26(4):508-517.
- [35] Shi Peili, Zhang Yuxiu, Hu Zhenqi, et al. The response of soil bacterial communities to mining subsidence in the West China aeolian sand area [J]. Applied Soil Ecology, 2017,121:1-10.
- [36] Zhen Qing, Ma Wenmei, Li Mingming, et al. Effects of vegetation and physicochemical properties on solute transport in reclaimed soil at an opencast coal mine site on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2015,133:403-411.
- [37] 马康,杨帆,张玉秀.西北干旱半干旱区煤炭井工开采对土壤肥力质量的影响研究进展[J].中国科学院大学学报,2020,37(4):442-449.
- [38] 崔鲁楠.淮南矿区不同塌陷类型土壤典型特性研究[D].安徽 合肥:安徽大学,2016.
- [39] 郑海金,王辉文,杨洁,等.地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J].中国水土保持,2015(2):36-39.