

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.02.019

赵义博, 雷少刚, 刘英. 胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素. 土壤, 2020, 52(2): 356–364

胜利矿区土壤养分空间变异特征与影响因素^①

赵义博^{1,2}, 雷少刚^{1,2*}, 刘英^{1,2}

(1 中国矿业大学国土资源研究所, 江苏徐州 221116; 2 矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏徐州 221116)

摘要: 研究矿区土壤养分空间变异特征对矿区土地复垦与生态保护具有重要意义。选取胜利矿区土壤作为研究对象, 基于地统计学和 GIS 技术分析土壤养分的空间变异性, 并探讨地形因子和土地利用类型对其影响。结果表明: 研究区土壤 pH、有机质、速效氮、有效磷、速效钾平均含量分别为 8.07、21.59 g/kg、82.91 mg/kg、8.21 mg/kg、257.34 mg/kg; 除 pH 属于弱变异外, 其他养分均属于中等强度变异; 各项养分指标均具有一定的趋势效应。pH 的最适模型是球面模型, 有机质、速效钾的最适模型是线性有基台模型, 速效氮、有效磷的最适模型是指数模型。pH、有机质、速效氮表现为中等空间自相关性; 有效磷、速效钾呈弱空间自相关性。pH 由中部向四周逐渐降低; 有机质、速效氮高值区集中在西部高程较大的位置, 低值区分布在受人类扰动较强的中东部; 有效磷、速效钾没有呈现一定的分布规律。坡度、坡向、高程、地形湿度指数是造成土壤养分格局差异的主要地形因子; 从土地利用方式看, 采矿扰动是养分含量较低的重要原因, 矿业用地养分含量显著低于耕地和草地。

关键词: 土壤养分; 地统计学; 胜利矿区; 空间变异; 影响因素

中图分类号: S159 文献标志码: A

Spatial Variability and Influencing Factors of Soil Nutrients in Shengli Mining Area

ZHAO Yibo^{1,2}, LEI Shaogang^{1,2*}, LIU Ying^{1,2}

(1 Institute of Land and Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2 Engineering Research Center of Mine Ecological Construction, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: It is of great significance for the land reclamation and ecological protection of mining areas to study the spatial variability characteristics of soil nutrients in the mining areas. In this paper, based on the geostatistics and GIS techniques, the spatial variability of soil nutrients and the effects of topographic factors and land use types on the spatial distribution of soil nutrients were studied in the Shengli mining area. The results showed that the average values of pH, soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium were 8.07, 21.59 g/kg, 82.91 mg/kg, 8.21 mg/kg and 257.34 mg/kg, respectively. pH showed a weak variation while other soil indexes showed the moderate variation. All soil indexes had a certain trend effect, the spherical model was optimal for pH, the linear platform model was optimal for organic matter and available potassium, and the exponential model was optimal for available nitrogen and phosphorus. There were moderate spatial autocorrelation of pH, organic matter and available nitrogen; but the spatial autocorrelation of available phosphorus and potassium were weak. pH decreased gradually from the middle to the four sides, organic matter and available nitrogen were higher in the west region with high elevation, but lower in the central and eastern regions under strong disturbance of human beings, whereas available phosphorus and potassium were irregularly distributed. Slope, aspect, elevation, and topographic wetness index were the main topographic factors contributing to the pattern differences of soil nutrients. From the point of view of land use, mining disturbance is the important reason for low nutrient content, the nutrient content of mining land is significantly lower than that of farmland and grassland.

Key words: Soil nutrients; Geostatistics; Shengli mining area; Spatial variability; Influential factors

①基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0501107)和国家科技基础性工作专项(2014FY110800)资助。

* 通讯作者(lsgang@126.com)

作者简介: 赵义博(1993—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事遥感与 GIS 在土地复垦与生态重建中的应用研究。

E-mail: ybzhaol1993@163.com

采矿活动给社会经济发展提供大量物质基础的同时，对环境也造成了极大的破坏。露天采矿需要剥离煤层上方的表土，不仅对采矿场造成土地损毁，排土场的堆积压占也导致土地资源损失和生态失衡。我国露天煤场多位于干旱、半干旱地区，生态环境脆弱，水土流失严重，常年的采矿活动导致土壤肥力变化剧烈。近年来为了恢复矿区生态环境，陆续开展了土地复垦工作，由于复垦过程产生扰动，完全改变了土壤原有的理化结构，复垦后的土壤条件将直接影响当地农业生产，进而影响到整个区域生态环境建设的成效^[1-2]。

土壤养分是综合评价土壤肥力水平的重要指标，也是决定植被生长演替的重要因素。土壤在形成和演化过程中受气候、地形、土地利用等多种因素制约，因此土壤养分表现出普遍的空间变异性。土壤养分的空间分布格局是土壤异质性的具体表现。近年来，地统计学结合 GIS 技术在研究土壤养分空间异质性的中广泛应用。Foroughifar 等^[3]利用数据分析和地统计学方法研究了伊朗 Dasht-e-Tabriz 农田不同土壤性质的空间异质性；俞月凤等^[4]从大尺度区域出发，对喀斯特区域内石灰土养分的含量水平、空间变异进行了分析。目前，土壤养分空间变异研究多集中在耕地、林地等区域^[5-8]，而针对矿区的研究较少。胜利煤田是中国最大的褐煤基地，大量的开采破坏了区域生态环境，探明土壤养分空间变异性是恢复生态多样性和土地生产能力的基础环节。因此，本文以胜利矿区为研究对象，采用地统计学和 GIS 技术，分析土壤 pH、有机质(SOM)、速效氮(AN)、有效磷(AP)和速效钾(AK)等主要养分指标的含量水平、空间变异特征，并采用典型对应分析(CCA 排序)及单因素方差分析方法探讨地形因子和土地利用类型对土壤空间分布格局的影响，以期能为矿区土地复垦提供基础数据和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟锡林浩特市周边胜利矿区，包括胜利一号露天矿、西二矿、西三矿、胜利东二号露天煤矿以及乌兰图嘎锆矿，地理坐标 43°54'15" ~ 44°13'52" N, 115°24'26" ~ 116°26'30" E, 海拔 960 ~ 1 270 m。地处中纬度西风气流带内，属中温带半干旱大陆性气候，月均温度最低 -21.64 °C，最高 19.0 °C，年平均降水量 294.74 mm。矿区地貌形态由构造侵蚀地形、剥蚀堆积地形、侵蚀

堆积地形、熔岩台地等 4 种地貌单元组成。栗钙土、草甸栗钙土和草甸土是该区域主要的地带性土壤，多为砂壤质地，多风地段往往就地起沙，易于遭受侵蚀。本区植被类型为典型草原，主要包括克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、双齿葱(*Allium bidentatum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)、冰草(*Agropyron mongolicum*)等。主要土地利用类型包括露天采坑、排土场、耕地、草地、建设用地等。锡林河是胜利矿区最大的一条河流，全长 175 km，如今下游段已成为季节性河流，除春汛、暴雨期间有水外，其余时间是一干河床^[9-10]。

1.2 样品采集与制备

本研究于 2017 年 8 月进行土壤样品的采集，采用网格法对样点进行初步布设，网格大小为 1 km × 1 km。在实际采样过程中，根据胜利矿区土地利用类型与土壤环境特点，在网格内选择具有代表性、能够反映区域环境质量的位置采样，对有污染源的地区加密取样，样点共计 152 个，具体分布如图 1 所示。采样深度为 0 ~ 20 cm，每个样品由中心点及周边 3 m 范围内的 4 个子样混合组成，约 1.0 kg。采样时进行 GPS 定位，在装有土样的自封袋上做好标记并对现场拍照。将带回的土壤样本置于无尘、通风、避光的地方自然风干，剔除石块、植物根系、树叶等杂物后，经研磨、过 120 目筛，混匀，装入纸袋待测。土壤 pH 采用电极电位法测定，有机质用重铬酸钾-外加热法测定，速效氮采用碱解-扩散法测定，有效磷采用钼锑抗比色法测定，速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度

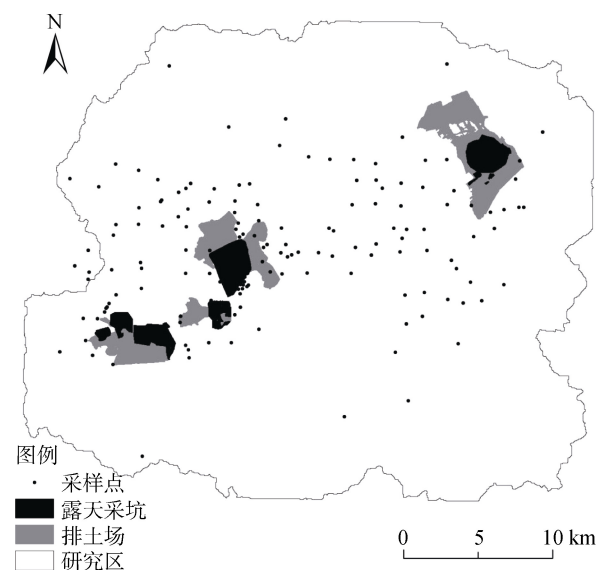


图 1 研究区与样点分布图

Fig. 1 Study area and sampling sites

法测定。

1.3 数据处理

本研究数据采用平均值 ± 3 倍标准差识别异常值,在此范围之外的数据标记为特异值,分别用正常数据的最大值和最小值代替特异值。利用 SPSS 24.0 软件对样本数据进行描述性统计分析、K-S 检验和单因素方差分析。基于软件 Canoco 4.5 对地形因子与土壤养分进行典型对应分析(CCA 排序)。通过地统计学软件 GS+9.0 进行半变异函数分析和理论模型拟合。在 ArcGIS 10.4 平台进行趋势效应分析、克里金插值和交叉验证,以及进行图幅编辑,制作土壤养分空间分布图。

2 结果与讨论

2.1 土壤养分的描述性统计

表 1 为研究区土壤养分的描述性统计结果。胜利矿区土壤 pH、有机质、速效氮、有效磷、速效钾平均含量分别为 8.07、21.59 g/kg、82.91 mg/kg、8.21 mg/kg、257.34 mg/kg。参照全国第二次土壤普查养分分级标准^[11],有机质属于中等水平,速效氮和有效磷属于缺乏水平,速效钾属于丰富等级。根据 Nielsen 和 Bouma^[12]标准, pH 的变异系数为 8.19%,表现出弱的变异性;其他 4 项指标变异系数在 44.38%~72.09%,

均属于中等强度变异,其中有效磷的变异系数最高,为 72.09%。土壤速效养分较 pH、有机质的变异系数高,这主要是养分在土壤中的化学性质和成土母质决定的^[13]。在显著性水平 0.05 的单样本 K-S 检验下, pH 和有机质符合正态分布,速效氮、有效磷、速效钾经 Box-Cox 变换后服从正态分布。

2.2 土壤养分的趋势效应

受成土因素、自然地理条件及人类采矿活动的影响,区域土壤属性的空间分布常呈明显的趋势特征,在空间插值分析中不容忽视。运用 ArcGIS 10.4 的地统计模块获得土壤养分的趋势效应(图 2)。图中 X 轴表示正东方向, Y 轴表示正北方向, Z 轴表示各点实测值的大小。左后投影面上曲线表示东-西向全局性的趋势效应,右后投影面上曲线表示南-北向全局性的趋势效应。从图 2 中可以看出,土壤 pH 与有效磷趋势效应相同,在东-西及南-北方向均呈倒“U”字形,为二阶趋势效应;有机质在东-西方向投影线中部略有下凹,由东向西逐渐升高,呈二阶趋势效应,南-北向投影线呈线性,趋势效应为一阶;速效氮东-西方向呈“U”字形,南-北方向呈倒“U”字形,均为二阶趋势效应;速效钾在东-西方向投影线中部略有下凹,趋势效应为二阶,在南-北方向的投影为直线,由南向北逐渐升高,趋势效应为一阶。

表 1 土壤养分因子描述性统计特征
Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil nutrient factors

土壤养分	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)	偏度	峰度	K-S 检验
pH	6.67	9.35	8.07	0.66	8.19	0.12	-0.43	0.20
有机质(g/kg)	4.10	43.30	21.59	9.58	44.38	0.48	-0.15	0.20
速效氮(mg/kg)	11.01	179.98	82.91	42.72	51.52	0.51	-0.49	0.20*
有效磷(mg/kg)	2.04	25.93	8.21	5.92	72.09	1.65	2.31	0.20*
速效钾(mg/kg)	40.19	573.23	257.34	133.22	51.77	0.77	-0.02	0.20*

注: * Box-Cox 变换后的数据结果。

2.3 土壤养分的空间变异特征

用 GS+ 9.0 软件拟合半方差函数,以残差(RSS)最接近于 0、决定系数(R^2)最接近于 1 为标准选择最佳的拟合模型。由表 2 可知, pH 的最适模型是球面模型,有机质、速效钾的最适模型是线性有基台模型,速效氮、有效磷的最优半方差模型为指数模型。土壤养分各项指标的块金值(C_0)均为正值,说明在当前采样尺度范围内,存在由于采样、测定误差等随机因素引起的空间异质性。土壤指标均具有一定的基台值(C_0+C),说明其受地形、土壤母质等自然因素影响。块金效应($C_0/(C_0+C)$)表示随机因素引起

的异质性占系统总异质性的比例。按照 Cambardella 等^[14]划分标准, pH、有机质和速效氮的块金效应在 0.501~0.614,表现为中等的空间自相关性,说明其空间变异是由结构因素和随机因素共同引起的;有效磷和速效钾的块金效应均大于 0.75,表明随机因素的影响占主导地位。胜利矿区土壤养分特性受开采、土地复垦、放牧等因素影响较大,人为因素的差异性和随机性使得土壤养分空间变异不尽相同;坡度、高程等地形差异造成土壤侵蚀与运移,增强了结构因素的差异,因此不同位置、不同养分指标表现出不同程度的空间变异^[15]。土壤养分因子 5 项

指标的变程在 1.350 ~ 17.240 km，说明它们各自的空间自相关范围相差较大，空间异质性对尺度的依

赖程度不同，应根据各项养分指标的特征调整采样间隔。

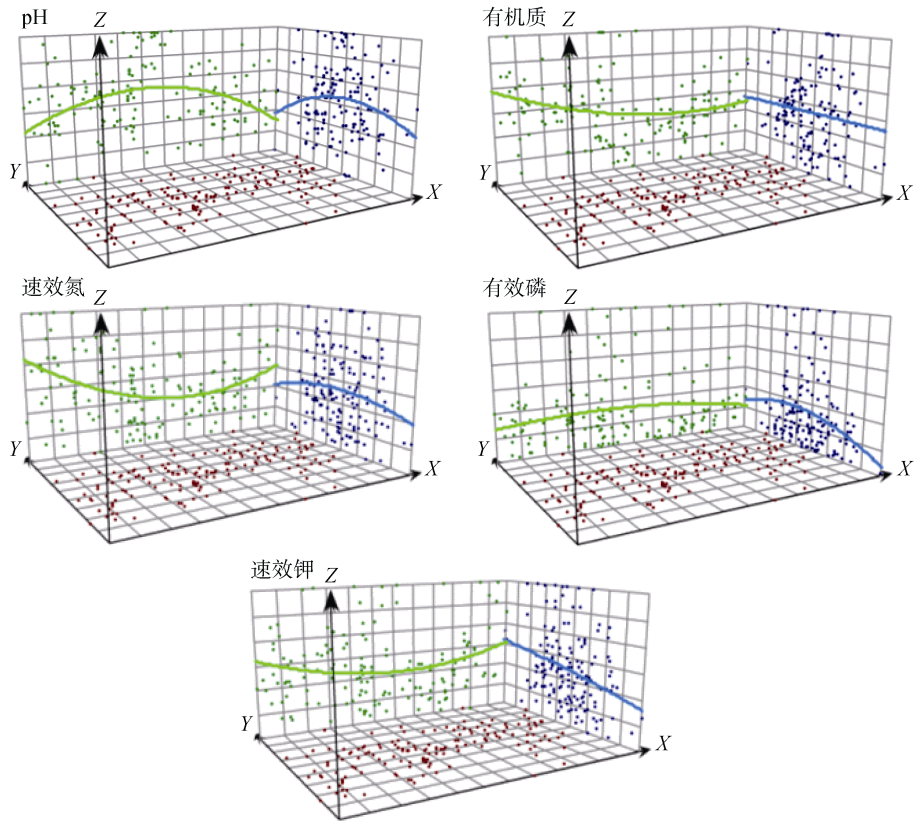


图 2 土壤养分因子趋势效应示意图
Fig. 2 Trend effects of soil nutrient factors

表 2 土壤养分因子半方差模型及参数

Table 2 Semivariance models and parameters of soil nutrient factors

土壤养分	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 $C_0/(C_0+C)$	残差 RSS	决定系数 R^2	变程(km)
pH	球面模型	0.018	0.035	0.501	1.061×10^{-4}	0.747	10.43
有机质	线性有基台模型	0.034	0.055	0.614	3.403×10^{-4}	0.342	17.24
速效氮	指数模型	0.034	0.067	0.512	2.435×10^{-4}	0.592	2.10
有效磷	指数模型	0.172	0.200	0.857	1.295×10^{-3}	0.483	1.35
速效钾	线性模型	0.052	0.065	0.801	1.291×10^{-4}	0.629	16.98

2.4 土壤养分的空间分布格局

采用 GS+ 9.0 软件拟合各养分指标的半方差函数理论模型，考虑各向异性和趋势效应，按照全国第二次土壤普查养分分级标准，通过 ArcGIS 10.4 普通克里金插值绘制胜利矿区土壤养分空间分布图(图 3)。为了进一步了解其丰缺状况，本文结合土壤数据的分级标准，统计各等级所占的面积和比例(表 3)。研究区土壤呈中性至强碱性，这与戴万宏等^[16]研究中国地带性土壤 pH 分布得到的结果一致。pH 呈由中部向四周降低的趋势，东北部分地区土壤为中性，图上深色区域属于典型的盐碱地，

表现出较强的碱性。胜利煤田地处于干旱、半干旱地区，降水较少，植被稀疏，土壤侵蚀严重，有机质、速效氮含量以中等和缺乏水平为主。其中，有机质含量处于中等和缺乏水平的面积占总面积的 98.78%，速效氮含量处于中等和缺乏水平的面积占 84.46%。有机质和速效氮的相关性分析显示，二者相关系数达 0.49，呈显著正相关关系，从插值结果(图 3)也可以看出，二者的空间分布较为相似：含量较高的土壤位于西部高程较大的位置，低值分布在中东部人类活动干扰相对较强的区域。这可能是由于东二号露天矿周边多是退化草地，缺乏植被和

凋落物的积累,锡林河干涸后沉积沙暴露及东南角堆煤场的影响造成的。研究区土壤有效磷处于缺乏状态,中等及以下水平的面积为 695.17 km²,占土地总面积的 86.67%。矿业用地有效磷含量较低,

中部及北部耕地位置出现高含量斑块。速效钾含量相对较高,很丰富和丰富水平占总面积的 97.44%。同样受到锡林河附近的盐沼湿地和东南部的堆煤场影响,这两个位置速效钾含量偏低。

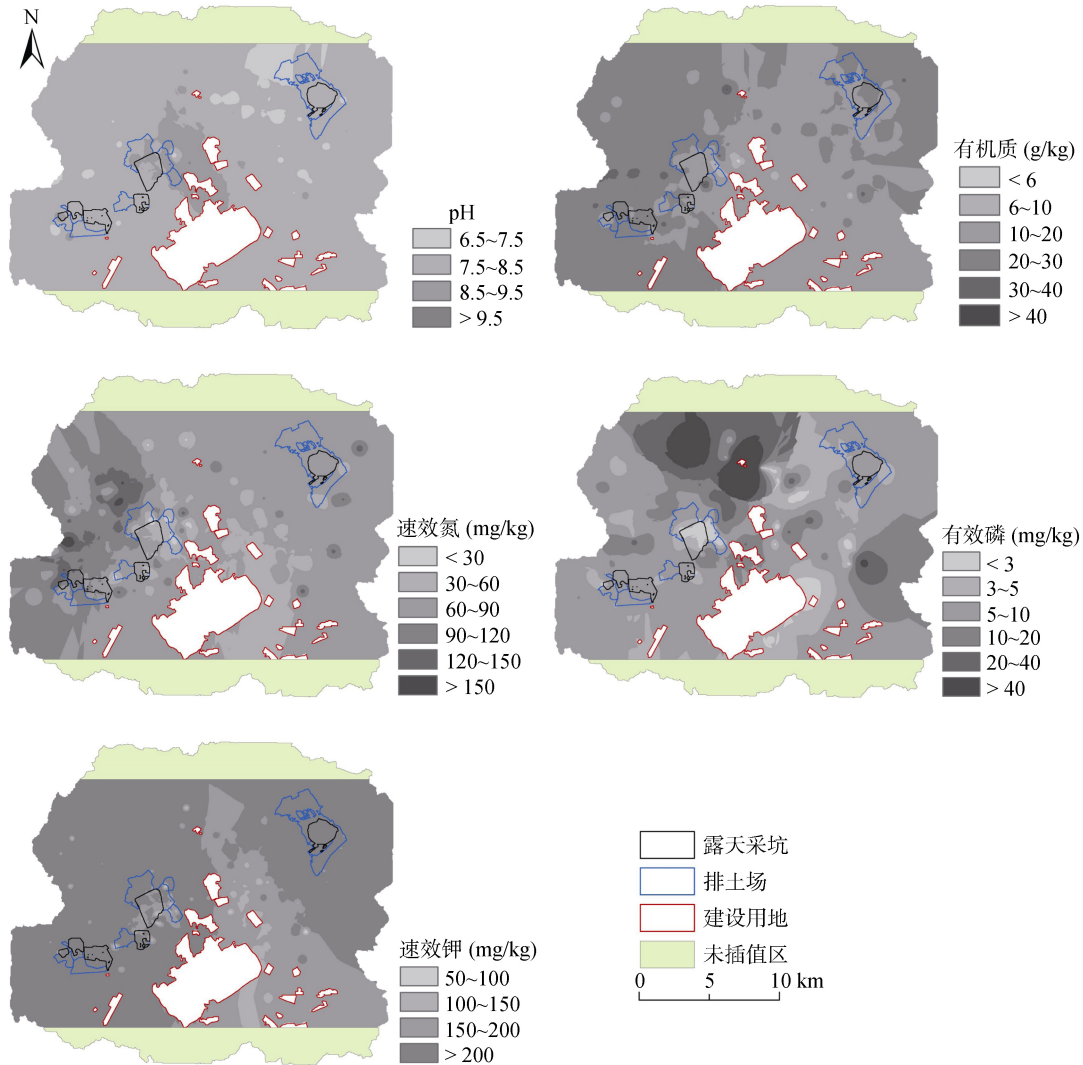


图 3 土壤养分因子空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of soil nutrient factors

表 3 土壤养分因子插值结果分级统计
Table 3 Classification statistics of interpolation of soil nutrient factors

等级	有机质		速效氮		有效磷		速效钾	
	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)	面积(km ²)	比例(%)
很丰富	0.02	0.01	1.64	0.20	38.09	4.75	594.03	74.06
丰富	4.74	0.58	21.12	2.63	68.84	8.58	187.53	23.38
中等	417.69	52.07	151.63	18.90	121.86	15.19	20.10	2.51
缺乏	374.66	46.71	525.84	65.56	447.00	55.73	0.44	0.05
很缺乏	4.86	0.61	99.90	12.46	106.38	13.26	0	0
极缺乏	0.13	0.02	1.97	0.25	19.93	2.49	0	0

2.5 土壤养分空间分布的影响因素

2.5.1 地形因子对土壤养分的影响 典型对应分析(CCA 排序)将对应分析与多元回归相结合,可以直观地反映地形因子(坡度(SLO)、坡向(ASP)、高程(ELE)、地形湿度指数(TWI)和地形起伏度(RA))对土壤养分空间变异的影响程度^[17]。典型对应分析包含 4 个排序轴,即将地形因子重新组合成 4 个互不相关的综合变量,以方差解释累计百分比表示各轴对养分异质性的影响程度。排序图中只显示前两轴,地形因子用带有箭头的实线表示,箭头长度表示该地形因子对土壤养分空间分布影响的强弱;箭头与养分质心的夹角表示地形因子与该养分的相关性,夹角越小,相关性越强;箭头与排序轴之间的夹角表示地形因子与排序轴的相关性,夹角越小,相关性越高。

表 4 地形因子与 CCA 排序轴的相关系数及方差解释累计百分比

地形因子	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴
坡度	0.593	0.505	0.062	0.620
坡向	-0.043	-0.436	0.418	0.497
高程	0.888	-0.049	0.310	-0.240
地形湿度指数	-0.334	-0.253	0.738	-0.057
地形起伏度	0.699	-0.177	-0.292	0.481
方差解释累计百分比	65.7	93.8	98.6	100.0

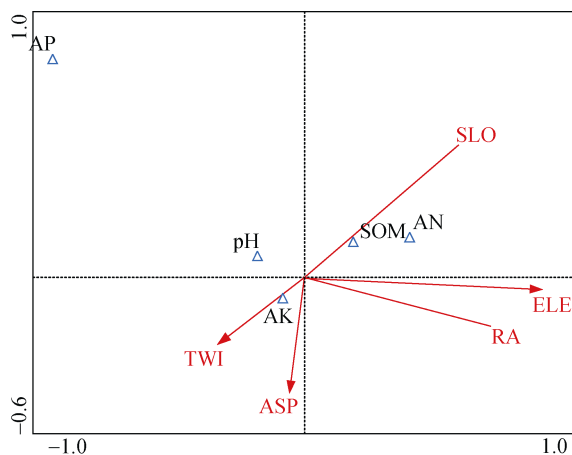


图 4 土壤养分因子与地形因子的 CCA 排序

Fig. 4 CCA ordination of soil nutrient factors and topographic factors

由表 4 和图 4 可知, CCA 排序前两轴的累积解释度达 93.8%, 可以很好地反映土壤养分与地形因子之间的关系。影响第一排序轴的地形因子主要是高程、地形起伏度和坡度, 第二排序轴的决定性地形因

子是坡度。pH 靠近质心, 表征其空间变异受地形因子的共同作用; 有机质主要受坡度的影响; 速效氮受坡度、高程的影响较大; 地形湿度指数和坡向是制约速效钾空间分布的主要因素; 有效磷与各地形因子的夹角均较大, 表明其受地形因子的制约较小, 造成的原因可能有两方面: ①土壤中磷主要来自于基岩(施肥除外), 而基岩又不易被风化; ②土壤中磷素极易被固定, 移动性很弱^[18]。

坡度主要通过影响土壤持水量、表层颗粒运移等因素间接影响土壤肥力水平。基于 DEM 提取胜利矿区坡度, 根据实际情况将坡度分为 9 级, 分别统计不同坡度范围内土壤有机质、速效氮的平均含量(图 5A)。结果表明, 随着坡度增大, 土壤有机质和速效氮平均含量均表现出先升高后降低的趋势, 这与 CCA 排序图中在中等坡度位置取得最大值相符合。在坡度较大区域, 土壤表层有机质、速效氮易受到淋洗作用而损失^[19], 含量降低。

高程不同, 温度、光照、水分等生态因子各异, 这将影响成土母质的再分配, 从而使土壤养分的分布发生变化。对高程与速效氮含量进行单因素回归分析(图 5B), 结果显示随着高程增大, 速效氮含量呈明显增加趋势。德科加等^[20]的研究表明, 土壤氮素的矿化随温度升高而加强, 因此当高程增加时温度降低, 微生物分解速度减缓, 矿化作用减弱。此外, 高程增加伴随着人为扰动减少, 这些都可以促进速效氮含量升高。

坡向制约土壤受到的温度、辐照度、水分等状况, 进而影响土壤养分含量。本文采用四分法^[21]对坡向进行分级, 对研究区不同坡向土壤的速效钾平均含量进行统计(图 5C), 表现为阳坡>半阳坡>半阴坡>阴坡, 这与其他研究关于阳坡土壤速效钾含量低于阴坡的结论^[22-23]不一致, 可能是由胜利矿区的自然环境引起的。研究区多以西北风为主, 风力侵蚀导致阴坡、半阴坡的土壤速效钾流失严重, 又因为迎风坡的关系该方向易形成地形雨, 降雨强度和降雨量比另一侧大得多, 因此阴坡土壤侵蚀强烈, 并导致大量速效钾流失。

地形湿度指数作为重要的地形因子, 也会影响土壤养分的空间分布。利用 DEM 提取胜利煤田地形湿度指数, 并根据研究区实际情况将地形湿度指数分为 8 级, 分别统计各范围内的土壤速效钾平均含量(图 5D), 结果表明, 土壤速效钾平均含量与地形湿度指数呈负相关关系, 与图 4 中地形湿度指数增大, 速效钾含量降低的结果相吻合。高灯州等^[19]及 Güntner

等^[24]的研究结果显示,速效钾吸附能力较弱,流动性较强。地形湿度指数与土壤含水量呈直线相关,因此地形湿度指数增大,土壤淋溶作用加强,速效钾含量降低。

地形起伏度与土壤养分无显著关系,仅影响第一排序轴,可能是坡度、坡向、高程和地形湿度指数的综合作用削弱了其生态效应。

从 CCA 排序图中还可以看出,pH 的质心距离速效钾的质心较近,且分布在 0 刻度的两侧,表明二者

呈显著负相关,与庞凤等^[25]的研究结果一致。这主要是由于随着土壤 pH 增大,降低了钾素的有效性,致使速效钾含量降低。有机质与速效氮的质心距离很近,且分布在 0 刻度的一侧,说明二者具有明显的正相关关系,可能的原因是土壤中氮素主要来自于有机质的矿化,速效氮含量受有机质含量的影响^[18,26]。pH 与有机质、速效氮分别呈显著负相关,但是在 CCA 排序图中关系并不明显,原因可能是受到地形因子的影响,pH 距离有机质和速效氮的质心较远。

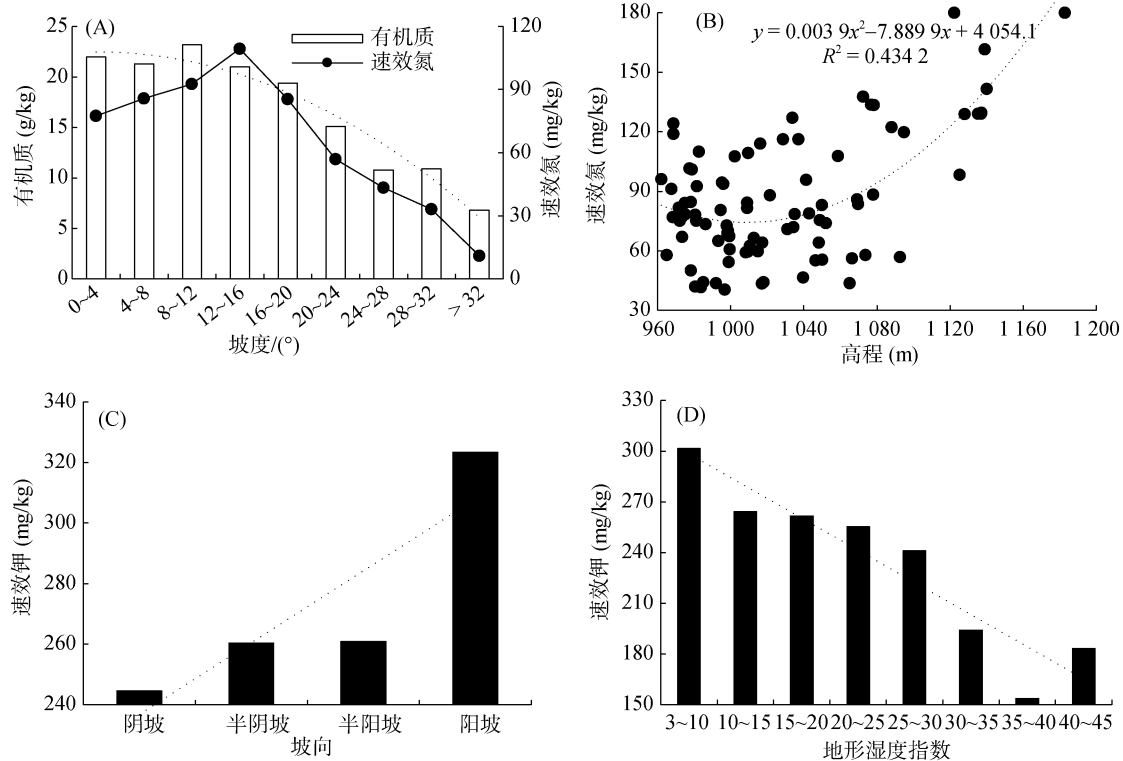


图 5 地形因子与土壤养分因子的关系

Fig. 5 Relationship between topographic factors and soil nutrient factors

2.5.2 土地利用类型对土壤养分的影响 对研究样本进行不同土地利用方式在显著性水平为 0.05 时的土壤养分含量单因素方差分析(表 5)。结果表明,不同土地利用方式之间的土壤 pH、有机质、速效氮、有效磷具有显著性差异($P < 0.05$)。露天采坑和排土场的土壤 pH 明显高于耕地、草地等受工矿活动影响较小的区域,这是由于煤矿开采导致山坡表层土壤盐分逐渐积累,交换性钠离子饱和度升高,所以矿业用地的 pH 高于其他地区^[27-28]。耕地的土壤 pH 低于草地,造成的原因可能有:①施用氮肥、作物带走较多盐基离子导致耕地 pH 降低;②放牧过程中牲畜在草地留下粪便,导致 pH 升高。相关研究表明^[27,29],土壤有机质含量与 pH、土壤

通气性呈负相关,与土壤黏粒含量呈正相关。煤矿开采改变了原有的岩土结构,造成包气带水分含量减少,影响植被生长,导致当地植被覆盖度下降,风化作用加强,致使黏粒含量下降、孔隙度增加;由上文可知露天采坑和排土场的土壤 pH 较其他位置高;再加上排土场土壤质量差,植被恢复缓慢,对土壤有机质含量提高并不明显^[26],因此矿业用地土壤有机质平均含量较低。草地土壤有机质平均含量高于耕地,主要是由于附近牧民长期放牧,在草地表层土壤留下牲畜粪便等有机质。

受挖掘影响,有机氮矿化成易流失的无机氮,硝态氮和活性高的磷从土壤表层淋至较深的土层^[30],因此露天采坑的速效氮、有效磷平均含量都很低。植

被恢复下排土场速效氮的平均含量显著高于露天采坑，但有效磷的差异并不显著。经现场调查了解到，研究区耕地主要以种植马铃薯为主，而查阅资料发现，马铃薯对氮、磷需求比例约为 2 : 1，施入土壤中的磷肥移动性较小，当季利用率低，残留较多，导致耕地速效氮含量偏低，而有效磷含量较高。草地大

规模放牧导致速效钾含量升高，促进草本植物的生长，消耗了大量的磷，因此草地的有效磷含量偏低。

虽然不同土地利用类型下土壤速效钾的含量没有显著差异($P>0.05$)，但露天采坑的土壤速效钾含量仍为最低，植被恢复下排土场的土壤速效钾平均含量高于露天采坑，但与耕地、草地相比还有较大差距。

表 5 不同土地利用类型养分因子平均值的显著性差异检验

Table 5 Verification of significant differences between average nutrient contents under different land use types

养分因子	平均值				F	Sig.
	露天采坑	排土场	耕地	草地		
pH	8.99	8.36	8.10	8.31	3.982	0.032
有机质(g/kg)	0.95	0.98	1.12	2.28	12.319	0.000
速效氮(mg/kg)	29.85	43.57	51.45	103.98	11.124	0.001
有效磷(mg/kg)	3.92	3.92	18.88	5.80	14.433	0.000
速效钾(mg/kg)	202.76	210.42	233.93	247.18	0.052	0.984

注：F 为单因素方差分析检验值；Sig. 为检验显著性。

3 结论

1)胜利矿区土壤 pH 呈中性至强碱性，有机质含量中等，速效氮、有效磷含量缺乏，速效钾含量丰富。除 pH 表现出弱的变异性外，其他 4 种养分指标均属于中等强度变异。

2)土壤养分各项指标均具有一定的趋势效应。pH、有机质、速效氮为中等强度的空间自相关，分布具有一定的规律性，受随机因素和非随机因素共同作用，变程在 2.10 ~ 17.24 km；有效磷、速效钾空间自相关较弱，在全区域的分布特征没有一定的规律性，主要受随机因素控制，变程分别为 16.98 km 和 1.35 km。

3)坡度、坡向、高程、地形湿度指数是影响胜利煤田土壤养分格局特征的主要地形因子。从土地利用类型上看，采矿活动引起土壤扰动是养分含量较低的重要原因，土地复垦对排土场养分的恢复具有一定成效，但与耕地、草地相比还有一定的差距。

参考文献：

- [1] 王雪. 平朔矿区典型土壤养分空间分布及其影响因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [2] 刘孝阳, 周伟, 白中科, 等. 平朔矿区露天煤矿排土场复垦类型及微地形对土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 6-12.
- [3] Foroughifar H, Jafarzadeh A A, Torabi H, et al. Using Geostatistics and Geographic Information System Techniques to Characterize Spatial Variability of Soil Properties, Including Micronutrients[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2013, 44(8): 1273-1281.
- [4] 俞月凤, 何铁光, 宋同清, 等. 桂西北喀斯特地区石灰土养分空间变异特征[J]. 生态学报, 2018, 38(8): 2906-2914.
- [5] Zhang S L, Zhang X Y, Liu X B, et al. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available potassium[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2013, 95(3): 319-331.
- [6] Li C A, Chen G F, Zeng G W, et al. The Study of Soil Fertility Spatial Variation Feature Based on GIS and Data Mining[M]// Computer and Computing Technologies in Agriculture VI. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 211-220.
- [7] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1527-1539.
- [8] 陶睿, 王子芳, 高明, 等. 重庆市丰都县紫色土养分空间变异及土壤肥力评价[J]. 土壤, 2017, 49(1): 155-161.
- [9] 马从安, 才庆祥, 王启瑞. 胜利矿区景观生态的空间格局分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(4): 490-493.
- [10] 杨勇. 锡林郭勒露天煤矿区土壤重金属分布特征与植被恢复研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [11] 李青华, 张静, 王力, 等. 黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 503-514.
- [12] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. Wageningen: Pudoc, 1985.
- [13] 赵明松, 李德成, 张文凯, 等. 淮北平原农田土壤养分空间变异特征——以安徽省蒙城县为例[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 611-617.
- [14] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [15] 马桦薇. 煤炭基地村庄复垦土壤养分时空变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.

- [16] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860.
- [17] Jin J X, Wang Y, Jiang H, et al. Improvement of ecological geographic regionalization based on remote sensing and canonical correspondence analysis: A case study in China[J]. Science China, 2016, 59(9): 1745-1753.
- [18] 张国平, 郭澎涛, 王正银, 等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 113-120.
- [19] 高灯州, 闵庆文, 陈桂香, 等. 联合梯田农业文化遗产稻田土壤养分空间变异特征[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6951-6959.
- [20] 德科加, 张德罡, 王伟, 等. 不同海拔下高寒草甸土壤养分分异趋势及其与地上植物量间的相关性研究[J]. 草地学报, 2013, 21(1): 25-29.
- [21] 张金茜, 巩杰, 柳冬青. 甘肃白龙江流域土壤有机碳与全氮储量的空间格局特征[J]. 土壤通报, 2018, 49(1): 23-30.
- [22] 张彬, 杨联安, 杨粉莉, 等. 苹果主产区土壤养分空间分布特征及其影响因素——以陕西省礼泉县为例[J]. 土壤, 2016, 48(04): 777-784.
- [23] 张宏伟. 土壤速效氮磷钾空间异质分布及影响因素分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- [24] Güntner A, Seibert J, Uhlenbrook S. Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices[J]. Water Resources Research, 2004, 40(5): 312-328.
- [25] 庞凤, 陶晓秋, 张英, 等. 会理县新植烟区土壤速效钾含量空间变异特征及其影响因子[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(1): 32-36.
- [26] 唐骏. 黄土区露天煤矿排土场植被恢复的土壤环境效应[D]. 陕西杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2015.
- [27] 莫爱, 周耀治, 杨建军, 等. 山地煤矿开采对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 86-89.
- [28] 张诗吟. 准东露天煤矿排土场植被恢复的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [29] 牛星, 高永, 齐雅静, 等. 伊敏露天煤矿内排土场土壤特征及其肥力评价[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2012(Z1): 97-101.
- [30] 路晓, 王金满, 李博, 等. 矿山土壤特性及其分类研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(4): 670-678.