

待复垦村庄土壤养分特征研究

——以山西省西部村为例

马桦薇, 师学义, 张美荣, 张琛, 王晶

(中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083)

摘要:掌握复垦村庄土壤养分状况,有助于探究长期作为村庄的土壤养分特点,为土地复垦过程中改善土壤质量与土壤培肥提供依据。以山西省晋城市泽州县西部村煤炭基地复垦村庄为研究区,运用地统计学与GIS相结合的方法,研究土壤中有机质、全氮、速效钾和有效磷养分含量及空间分布特征,并在地理信息系统支持下绘制土壤养分的空间分布图。研究结果表明:土壤这4种养分的变异系数范围为19.78%~29.45%,变异程度较小,有机质、速效钾的半方差拟合模型为球状模型,全氮、有效磷的半方差拟合模型为高斯模型;有机质、全氮、速效钾和有效磷的变程分别为59.70,54.47,55.89,66.87 m,块金系数分别为74.2%,74.9%,69.1%,76.5%,具有中等程度的空间相关性;研究区内4种养分分布略有差异,但整体上均在村庄中部含量较高,逐次向周围递减,土壤养分空间分布格局是在地形变化、人类活动以及其他随机因素共同作用下而形成的。掌握村庄土壤养分的空间分布规律,能够为煤炭基地村庄复垦后耕地质量提升、农田土壤养分精准管理和施肥决策提供一定的依据。

关键词:土壤养分;地统计学;GIS;空间分布;复垦村庄

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0107-06

Research on Spatial Characteristics of Soil Nutrients in Reclaimed Village

—Taking Xigao Village in Shanxi Province as an Example

MA Huawei, SHI Xueyi, ZHANG Meirong, ZHANG Chen, WANG Jing

(School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Understanding the soil nutrient condition in reclaimed village will make a difference on improving soil quality and soil fertility in the course of land reclamation. A reclaimed village in Zezhou County of Shanxi Province was selected as the study area, the spatial variability of soil nutrients in reclaimed village was comprehensively analyzed by a combination of geostatistics with a geographic information system (GIS). The results were shown as follows. (1) The variation coefficient of 4 soil nutrients ranged from 19.78% to 29.45%, which indicated the variation degree of soil nutrients was relatively small. The semi-variance models of 4 soil nutrients were in line with the Gaussian model. (2) The ranges of organic matter (OM), total nitrogen (TN), available K (AK) and available P (AP) were 59.70, 54.47, 55.89 and 66.87 m, respectively, and the nugget factors were 74.2%, 74.9%, 69.1% and 76.5%, respectively, which suggested that the soil nutrients had medium spatial correlation. (3) The maximum values of OM, TN and AP were concentrated in two parts namely northeast and southwest near central regions, and the distribution of AP was descending from the central to the peripheral areas. (4) The spatial distribution pattern of soil nutrients was formed under the influence of the terrain change, human activity and some random factors. Mastering the distribution of village soil nutrients will provide the basis for enhancing quality of arable land after reclamation, precise management of soil nutrients and fertilization decision in villages of coal base.

Keywords: soil nutrients; geostatistics; GIS; spatial distribution; reclaimed village

我国黄土高原地区煤炭基地范围内,由于土地塌陷、水资源枯竭、生态环境恶化等灾害性问题,以及煤炭资源的开发、人口向城镇迁移、新农村建设等原因,

现有大量村庄土地即将被废弃,仅山西省晋城市就有此类可复垦村庄土地面积4 900 hm²,村庄土地的复垦整理已成为该地区土地综合整治的一项重要内容。

掌握黄土高原地区待复垦村庄土壤养分空间分布规律,探究村庄的土壤养分长期存在问题,是村庄复垦过程中保护土壤养分、研究土壤培肥技术的基础和重要环节,可以为村庄复垦提供有利依据。

利用地统计学和 GIS 相结合的方法研究土壤养分的空间变异规律,已成为土壤科学研究热点之一,并得到了国内外学者的广泛关注^[1-5]。从研究尺度来看,目前的研究主要从地块尺度、流域尺度和区域尺度来分析土壤养分的空间变异特征,进而揭示不同空间信息的相似性与相异性。地块尺度属于小尺度研究,可以为提高土壤养分管理效率提供数据支持,也是实现精确施肥的基础。张淑娟等^[6]、胡克林等^[7]采用 GIS 与地统计学相结合的方法对农田的土壤空间分布状况进行了研究;刘国顺等^[8]对缓坡烟田土壤养分空间变异特征进行了研究,并根据影响因素提出了改善烟田土壤养分状况的建议措施。流域尺度属于大中尺度研究,其研究成果有助于特定流域范围农业面源污染的识别,对区域农业生产和环境管理有着十分重要的意义。刘付程等^[9]对太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征进行了研究,研究表明土壤全氮的空间分布体现了地貌过程的影响;王军等^[10]则对黄土高原小流域土壤养分空间异质性进行了研究。区域尺度一般属于大尺度,其研究主要是为了掌握区域土壤质量的状况,实现区域土壤的数字化管理。苑小勇等^[11]利用 GIS 与地统计学方法初步研究了北京市平谷区农田土壤有机质含量的空间分布规律及其影响因素;司建华等^[13]则分别研究了额济纳绿洲和喀斯特木论自然保护区土壤养分空间变异特征^[12-13]。

可以看出,目前的研究多集中于农用地、保护区等土壤养分空间分布,而缺乏对待复垦村庄土壤养分的研究。与农用地、保护区相比,待复垦村庄与人类活动的关系更为密切,受人为影响比较大,其生物群落简单,并且多是人为活动的结果,而村庄复垦作为增加耕地的有效手段和重要来源之一,研究其土壤养分状况对于今后复垦采取针对性措施、增加耕地数量、快速提高耕地质量具有重要意义。因此,本研究将运用地统计学和 GIS 相结合的方法,对煤炭基地复垦村庄土壤养分(主要以有机质、全氮、速效钾、有效磷为指标)空间分布进行分析,揭示其变异规律,探究待复垦村庄的土壤养分的特点及存在问题,以期为复垦后耕地质量提升、农田土壤养分精准管理和施肥决策提供一定的依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

西部村地处山西省泽州县巴公镇,位于东经 112°51'38"—112°52'09",北纬 35°40'01"—35°40'39",交通条件良好,全部为农村居民点用地,土地总面积

为 35.71 hm²。但是,村庄布局相对分散,居住环境恶劣,群众生产生活都不便,并压占大量煤炭资源,为改善农民的生活环境,合理开发煤炭资源,亟待进行整村搬迁改造,村庄土地复垦对北方煤炭基地具有很好的示范意义。西部村地势呈西北高,中部、南部低的簸箕状,海拔高度为 750~850 m。属暖温带大陆性季风气候区,土壤属褐土地带,土层深厚,土壤熟化度较高,土质偏粘,土体干旱。西部村复垦项目完成后可新增净耕地 29.54 hm²,新增耕地率为 82.74%。

1.2 样品采集与分析

针对研究区域条件与情况,本研究选取西部村复垦村庄土壤中的有机质、全氮、速效钾和有效磷作为评价指标,采用 50 m 间隔的“网格法”设置采样点 128 个,并用 GPS 确定每个样点的位置。采样时间是 2012 年 7 月 18 日至 20 日,每个样点在直径 10 m 范围内按“W”形状采集五钻耕作层土壤(0—30 cm),混合均匀后缩至 1~2 kg 装袋。土壤样品在实验室风干,剔除石块等杂质用玛瑙研钵磨成粉末。其中,土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮含量采用开式法(半微量法)测定;速效钾采用乙酸铵提取火焰光度法测定;有效磷采用碳酸氢钠—钼蓝比色法测定^[14]。为了提高试验结果的准确性,每个采样点均设定 5 个化验样本,最后取平均值确定每个样点土壤养分各指标含量水平。

1.3 数据处理

土壤有机质、全氮、速效钾和有效磷数据采用 SPSS 19.0 进行正态分布检验和描述性统计,半方差函数分析及理论模型的拟合在 GS+9.0 中进行,Kriging 插值及空间分布图的制作输出在 ARCGIS 10.0 软件中完成。

半方差函数也称为半变异函数,它表述了区域化变量空间自相关性,是地统计学中研究土壤变异性的关键函数。半方差函数描述了不同距离的变量之间空间变异结构,其公式如下:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i+h) - Z(X_i)]^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$ ——半方差函数值; h ——样点间距,在一定范围内 $r(h)$ 随 h 的增大而增大; $N(X_i)$ ——样点 X_i 处的实测值; $N(X_i+h)$ ——与样点 X_i 距离 h 处的实测值。通过半变异函数可以得到 4 个特征参数,即变程、基台值、块金值和块金系数,能够准确地描述土壤养分状况的空间连续变异状况,反映土壤养分状况不同距离观测值之间的变化。

Kriging 插值是根据区域变量的原始数据与变异函数提供的空间自相关性程度信息对未知点的值进行线性无偏最优化估计的一种方法,是地统计学中目前应用较为广泛的一种最优内插法:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z(X_i) \quad (2)$$

式中: $Z(x_0)$ ——未观测点 x_0 上的内插估计值;
 $Z(X_i)$ ——点 x_0 附近的若干点上获取的实测值;
 λ_i ——考虑了半方差图中表示空间的权重。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量描述统计特征

对样品进行统计分析和 K-S 检验后可知,研究区土壤有机质、全氮、速效钾、有效磷的平均含量分别为 18.13 g/kg, 1.02 g/kg, 300 mg/kg, 20 mg/kg。根据全国第二次土壤普查养分分级标准,研究区有机质、全

表 1 土壤养分含量描述性统计

养分项目	极小值	极大值	均值	标准差	K-S 检验	变异系数/%
有机质含量/(g · kg ⁻¹)	9.80	25.10	18.13	2.90	0.00	16.00
全氮含量/(g · kg ⁻¹)	1.02	1.44	1.17	0.11	0.01	9.35
速效钾含量/(mg · kg ⁻¹)	300.00	331.50	312.14	6.99	0.25	2.24
有效磷含量/(mg · kg ⁻¹)	20.00	25.50	21.85	1.34	0.03	6.12

2.2 土壤养分含量的半方差函数分析

土壤养分含量的空间变异通过半方差函数来描述,半方差函数的计算一般要求数据服从正态分布,否则可能存在比例效应。表 1 显示,只有速效钾、有

表 2 土壤养分含量模型拟合及其检验参数

养分项目	模型	块金值	基台值	变程/m	块金系数/%	决定系数
有机质	球状模型	5.73	22.21	59.70	74.2	1.00
全氮	高斯模型	0.02	0.07	54.47	72.9	0.99
速效钾	球状模型	0.03	0.09	55.89	69.1	0.99
有效磷	高斯模型	7.66	32.57	66.87	76.5	0.99

由表 2 可以看出,有机质与速效钾符合球状模型,全氮和有效磷符合高斯模型。块金值表示取样误差和小于取样尺度下的空间变异,基台值反映了变量在研究区域内总的空间变异强度,块金系数则表明了系统变量的空间相关程度。根据相关文献研究^[15-16]得出的区域化变量相关性程度分级标准可知:若块金系数小于 25%,表明变量具有强烈的空间相关性;若块金系数处于 25%~75%,表明变量具有中等程度的空间相关性;若块金系数大于 75%,表明变量的空间相关性较弱。研究区域内土壤有机质、全氮和速效钾的块金系数均在 25%~75%,表明变量具有中等的空间相关性,而速效钾的块金系数大于 75%,空间相关性较弱,其变异受随机因素和结构因素共同影响。复垦村庄土壤特性受人类活动的影响较大,人类活动的差异性和随机性增大了随机因素的影响,由于地形特征造成对土壤侵蚀与运移则增强了土壤养分空间分布的结构性差异。

变程反映了空间相关性的最大距离。可以认为,变量在变程范围内具有空间相关性,变量之间的距离超过变程时是相互独立的。本研究在 50 m 取样尺

度下 4 种土壤养分的变程在 54.47~66.87 m 之间,空间自相关范围差异不明显,表明该待复垦村庄土壤有机质、全氮、速效钾和有效磷的生态过程基本在相同的尺度上起作用。在复垦村庄内部,人类活动对土壤特性的扰动较大,使得土壤养分分布特征较以往研究的农用地、保护区等差别较大。由平均预测标准差和标准均方差预测误差可以看出,预测精度满足区域差值的要求,可以进行克里金插值。

氮、有效磷较适宜,分别达到四级、三级、二级水平,速效钾含量过高,为一级水平。4 种养分变异系数处于 2.24%~16%,变异程度较小,其中速效钾的变异系数最低,为 2.24%,有机质的变异系数最高,为 16%。对 4 种养分进行 Kolmogorov-Smirnov 正态分布检验,假定 $p > 0.01$,检验结果显示 4 种养分只有速效钾、有效磷服从正态分布,有机质、全氮不服从正态分布。

研究区土壤描述性统计特征见表 1,描述性统计只能反映土壤中养分总体含量特征,不能完全反映研究区域养分含量的空间相关性及结构特征,因此,需要运用地统计学和 GIS 相结合的方法做进一步分析。

效磷服从正态分布,有机质、全氮不服从正态分布。因此,在数据分析前,需对有机质、全氮进行对数转换和异常值剔除,转换后再对 4 种养分进行半方差函数分析,得到理论拟合模型及其检验参数见表 2。

度下 4 种土壤养分的变程在 54.47~66.87 m 之间,空间自相关范围差异不明显,表明该待复垦村庄土壤有机质、全氮、速效钾和有效磷的生态过程基本在相同的尺度上起作用。在复垦村庄内部,人类活动对土壤特性的扰动较大,使得土壤养分分布特征较以往研究的农用地、保护区等差别较大。由平均预测标准差和标准均方差预测误差可以看出,预测精度满足区域差值的要求,可以进行克里金插值。

2.3 土壤养分含量的空间分布特征

利用 ArcGIS 地统计模块进行 Kriging 插值计算后,土壤养分的空间分布如图 1 所示。研究区内 4 种养分整体上均在村庄中部含量较高,逐次向周围递减,具体来说,有机质的高值集中在村庄的西南和东北,全氮的分布高值多集中在村庄的中东部,速效钾的高值分布在村庄的西部及中部,有效磷的高值集中在村庄北部偏东地区。

由于研究对象的尺度较小,造成土壤养分的空间分布差异明显受到地形、土壤类型、人类活动以及其他随机因素的影响,具体可能有以下几个方面:

(1) 从村庄布局来看:随着村庄格局不断变化,

新宅多集中在村庄的外围,而村庄内部多为旧宅,且年久失修无人居住,形成了典型的“空心村”。村庄内部由于人类扰动较弱,植物覆盖度高,堆积较多生活垃圾和动物粪便,微生物活动频繁,土壤质量能够得到有效改善,使得土壤养分得到富集。

(2) 从地势地形来看:经过调查,西部村地形呈“西北高、中部低、东南较高”的状态,高低落差达 100 m 左右,因此可从地势地形的方面对土壤养分分布不均进行解释。坡度的差异性增强了生活废水、雨水、地下水等的冲刷作用,造成了土壤侵蚀,土壤养分在地势较高的地区容易流失,在地形较低的中部地区容易积累。

(3) 从土壤性质来看:一方面,该村庄土壤类型为褐土,土质偏粘,淋溶作用较弱,因此土壤养分丰富,而且有机质含量较高,大多土壤养分不易被雨水和灌溉水淋失,故土壤养分含量整体处于较高水平;另一方面,村庄由于建筑物、道路的修建以及人、畜活动频繁,土壤压实程度较高,特别是周围新建村庄,中部旧村落由于人类活动较少、压实程度相对低一些,

使得中部地区的土壤养分含量高于周围地区。

(4) 从人类活动来看:人类活动与耕种施肥、日常生活、管理习惯等密切相关。首先,待复垦村庄中一些农户种植有菜园,菜园多集中在村庄中部无人使用的空地,村民施用农家肥或其他肥料也会对土壤的养分含量产生一定影响;其次,村中土壤养分与人类日常生活的关系较为紧密,特别是生活污水和生活垃圾的排放,会显著影响着土壤中有效磷的空间分布。最后,人类活动伴随着一定的随机性和规律性,村庄布局不尽合理,缺乏统一的组织与管理,使得部分垃圾的排放随意性较强,有些垃圾定点堆放于无人居住的旧宅区域,因此,土壤中有效磷的分布在随机性因素和结构因素的共同影响下,呈现出由中部向周围递减的状况。

由于本文的研究对象复垦村庄土壤,研究尺度较小,土壤类型、成土母质、气候条件等因素对土壤养分空间分布影响较小,而坡度与人类活动则是土壤养分空间分布的重要因素。因此,在对复垦后耕地进行养分分区管理及精准施肥研究时,应重点考虑。

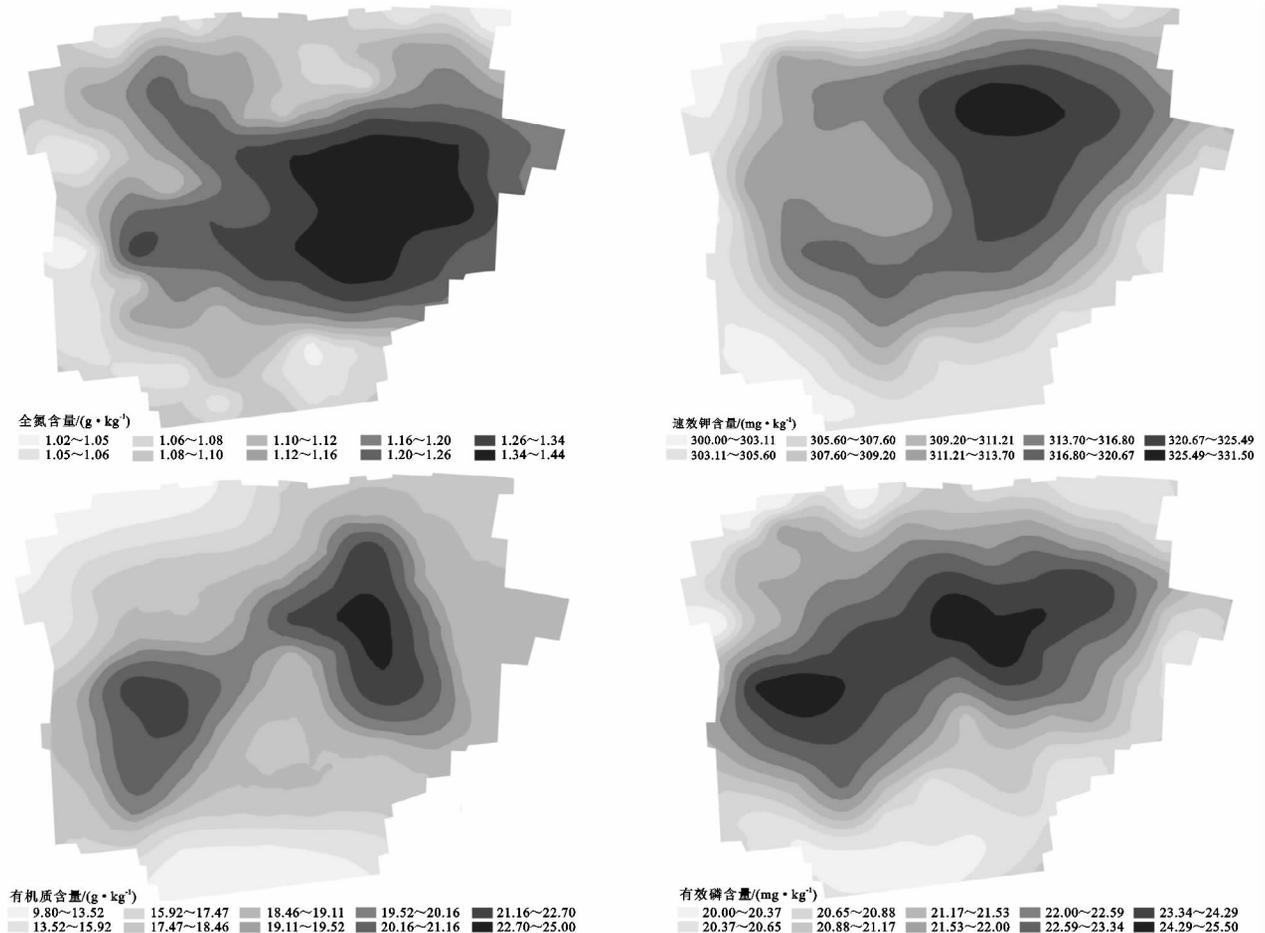


图1 土壤养分的空间分布格局

3 结论与讨论

经典统计分析结果显示,研究区土壤有机质、全

氮、速效钾、有效磷的含量较高,4种养分变异程度较小,其中速效钾的变异系数最低,有机质的变异系数最高。地统计分析结果显示,土壤有机质、全氮、速效

钾、有效磷的变程分别为 59.70, 54.47, 55.89, 66.87 m, 有机质、速效钾的半方差拟合模型为球状模型, 全氮、有效磷的半方差拟合模型为高斯模型, 4 种养分的块金系数分别为 74.2%, 74.9%, 69.1%, 76.5%, 具有中等程度的空间相关性。Kriging 插值分析, 研究区土壤养分的分布呈现出一定的规律性, 4 种养分均在村庄中部含量较高, 逐次向周围递减。各养分含量相对集中不均匀。

本研究采用 GIS 与地统计学结合的方法, 该方法的运用极大地推动了区域土壤养分空间变异的研究, 但目前的研究主要集中在大中尺度的农用地、生态保护区等土壤质量评价, 而关于微观尺度的复垦村庄的研究则较少。待复垦的村庄土壤养分状况对于复垦后耕地质量具有重要影响, 本研究从微观尺度上对待复垦村庄土壤养分的空间分布规律进行分析, 能够为复垦技术的选择提供一定的依据, 为复垦后耕地进行养分分区管理及精准施肥提供基础, 有助于新增耕地质量提高, 等级提升。

研究区土壤养分整体水平较高, 在今后复垦过程中可以发展玉米、棉花、谷子、小麦等农作物的种植, 因地耕种, 提高农业产量; 也可以进行多种作物轮作, 或林地农田间种, 改善土壤质地与肥力, 充分发展土壤潜力优势。

研究区养分含量不均匀, 今后的复垦管理实施中, 宜采取分区、分级别管理。对于村庄中部养分含量较高地区, 应注重提高养分利用率, 提升土壤的保肥能力; 对于村庄周围养分含量相对较低的土壤, 应加强松土, 提高土壤的通透性与孔隙度, 改善土壤容重, 增加土壤肥力。

复垦过程中还应加强水利灌溉建设。一方面, 研究区所处气候较干旱, 易发生土壤侵蚀, 且土壤养分具有分布不均匀的特征, 需要加强灌溉, 均衡土壤中养分含量, 防止养分流失; 另一方面, 研究区地形“西北高、中部低、东南较高”, 在建设水利灌溉时应与地形地势相结合, 发挥地形优势, 规避地形缺陷。

由于受数据获取的影响, 本研究仅分析了西部村耕作层(0—30 cm)土壤有机质、全氮、速效钾和有效磷 4 种养分的空间变异特征与分布规律, 没有对深层土壤及其他养分如碱基氮、全磷、全钾进行分析。在今后的复垦过程中可进行进一步的研究。

本文研究区域为 35.71 hm², 采样密度较大(每 50 m 一个样点), 得到的结果能够为村庄的复垦工作提供指导, 为复垦后农田治理提供辅助参考。地统计方法通过变异函数可以确定变量因子的空间变异程度及空间变异尺度, 在后续研究中应加强待复垦村庄

不同尺度上土壤养分的空间变异特征, 分析不同尺度上空间信息的相异性和相似性, 这能够为我国待复垦村庄土地的整理与复垦提供一定的参考价值。通过对研究区土壤养分的结果分析, 可以总结出该待复垦村庄土壤养分含量有以下特点:

(1) 土壤养分含量平均水平较高。与全国第二次土壤普查养分分级标准相比, 该复垦村庄的养分水平平均达到三级以上, 其中速效钾含量极高, 达到一级以上。与周围农田的养分含量平均水平(经调查, 村庄周围土壤养分含量平均水平为: 有机质 20.13 g/kg, 全氮 0.96 g/kg, 有效磷 10.13 mg/kg, 速效钾 155 mg/kg 相比, 该复垦村庄的养分平均含量处于较高水平。养分含量的高低可以从一定程度上反映土壤的肥沃程度, 但是土壤肥力是土壤物理、化学、生物化学和物理化学特性的综合表现, 养分含量高并不等于土壤肥力高, 土壤肥力高低仍需后续的研究。

(2) 土壤中各养分空间变异大, 分布不均匀。分析显示土壤各养分最高值与最低值相差较大, 例如有机质含量, 最大值为 25.10 g/kg, 最小值为 18.13 g/kg, 相差 6.97 g/kg。通过插值图亦可看出, 该地区土壤养分分布集中在村庄中部, 中部地势较低, 同时旧村落、废弃地及垃圾堆放多在中部地区, 在今后复垦工作中需要对中部地区加以重视。

(3) 土壤受人为影响较大。长期作为村庄的土壤, 人类活动密集, 建筑物、道路等造成土壤压实, 孔隙度降低, 容重增加, 对土壤养分的分布会产生很大的影响; 加之排放的垃圾以及生活废水废物, 在自然条件下经过物理、化学、生物反应, 影响土壤养分含量, 造成土壤养分分布不均匀。

今后的复垦过程中, 应注意改善土壤理化性质, 缩小空间变异程度。具体来说有以下几点参考建议:

(1) 加强农田水利等基础设施建设。由于待复垦区域地形呈“西北高、中部低、东南较高”的状态, 落差达 100 m 左右, 低洼的地方在平整复垦后容易积水, 因此, 在复垦过程中应结合地下水水位的相关数据, 加强灌溉排水设施的建设, 调节、改善农田水分状况和地区水利条件, 促进生态环境的良性循环, 使之有利于农作物的生产。

(2) 分区管理, 促进养分平衡。待复垦的土壤养分含量不均, 且区域的地形因素对耕地种植及施肥具有较大影响, 在复垦过程中应进行相应的农田分区管理, 不同分区之间还应注意分区划分的连续性、施肥改良的差异性, 促进各养分均匀分布, 提高土壤整体肥力。

(3) 复垦后耕地进行适度松土与翻压。由于复垦

前的村庄人为活动较为密集,土体压实现象较为普遍,村庄外围的新宅区域更为显著。因此,在复垦过程中应注意适度松土,有效减少土壤容重,增加土壤透水性,增加土壤养分,促进土壤质量的提升。

(4) 采用生物技术对复垦后的土壤进行改良。由于待复垦的土壤压实程度高,土壤内的生物含量整体水平较正常农田含量低,即使土壤中养分含量高,其保肥性与供肥性可能较低,因此可采用生物制剂,增加土壤生物群落,促进土壤中养分的释放;同时在区域内养分含量较低的地区可进行绿肥种植,可以有效地增加地表植被覆盖,提高土壤养分,改善土壤理化性质,尤其在坡度较大的区域更应加强。

参考文献:

- [1] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region [J]. *Indian Journal of Forestry*, 1995, 18(2):144-152.
- [2] Chang C. Variation in soil total organic matter content and total nitrogen associated with microrelief [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(4):471-473.
- [3] 杨玉玲,田长彦,盛建东,等. 灌溉土壤有机质、全量氮磷钾空间变异性初探 [J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3):26-30.
- [4] 路鹏,彭佩钦,宋变兰,等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析 [J]. *中国农业科学*, 2005, 38(6):1204-1212.
- [5] 自由路,金继运,杨俐苹,等. 基于 GIS 的土壤养分分区管理模型研究 [J]. *中国农业科学*, 2001, 34(1):46-50.
- [6] 张淑娟,何勇,方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2):39-44.
- [7] 胡克林,陈德立. 农田土壤养分空间变异性特征 [J]. *农业工程学报*, 1999, 15(3):33-38.
- [8] 刘国顺,常栋,叶协锋,等. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究 [J]. *生态学报*, 2013, 33(8):2586-2595.
- [9] 刘付程,史学正,于东升,等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征 [J]. *地理研究*, 2004, 23(1):63-70.
- [10] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性 [J]. *生态学报*, 2002, 22(8):1173-1178.
- [11] 苑小勇,黄元仿,高如泰,等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(2):70-76.
- [12] 司建华,冯起,鱼腾飞,等. 额济纳绿洲土壤养分的空间异质性 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(12):2600-2606.
- [13] 刘璐,曾馥平,宋同清,等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7):1667-1673.
- [14] 李海滨,王政权. 空间异质性定量研究理论与方法 [J]. *应用生态学报*, 1998, 9(6):651-657.
- [15] Kravchenko A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5):1564-1571.
- [16] 刘庆,杜志勇,史衍玺,等. 基于 GIS 的山东寿光蔬菜产地土壤重金属空间分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10):258-263.
- [20] 马涛,周金星. 滩地人工杨树林土壤呼吸变化规律与环境因子的关系研究 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6):31-41.
- [21] 杨玉盛,董彬,谢锦升,等. 森林土壤呼吸及其对全球变化的响应 [J]. *生态学报*, 2004, 24(3):583-591.
- [22] 李元,时伟宇,闫美杰,等. 土壤呼吸影响因素概述与展望 [J]. *水土保持研究*, 2013, 20(5):311-315.
- [23] 陈宝玉,刘世荣,葛剑平,等. 川西亚高山针叶林土壤呼吸速率与不同土层温度的关系 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6):1219-1224.
- [24] 周海霞,张彦东,孙海龙,等. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12):2668-2674.
- [25] Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q_{10} of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2):161-169.
- [26] Kutesch W L, Kappen L. Aspects of carbon and nitrogen cycling in soils of Bornhoved Lake district [J]. *Modelling the influence of temperature increase on soil respiration and organic carbon content in arable soils under different management* [J]. *Biogeochemistry*, 1997, 39(2):207-224.
- [27] 张鸽香,徐娇,王国兵,等. 南京城市公园绿地不同植被类型土壤呼吸的变化 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(2):274-280.
- [28] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6):753-760.
- [29] 房秋兰,沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 2006, 30(1):97-103.
- [30] 牟守国. 温带阔叶林、针叶林和针阔混交林土壤呼吸的研究比较 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4):564-570.

(上接第 106 页)