

# 工矿废弃地复垦土地跟踪监测方案制定方法与实证研究

周妍<sup>1</sup>, 罗明<sup>1\*</sup>, 周旭<sup>1</sup>, 黄元仿<sup>2</sup>, 张世文<sup>3</sup>

(1. 国土资源部土地整治中心, 北京 100035; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;  
3. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001)

**摘要:** 由于废弃时间长、成因复杂、不确定性因素多, 历史遗留工矿废弃地复垦后的地力提升与质量改善需较长的过程, 跟踪监测评价工作至关重要。本文基于 3S 技术和地统计学, 整合复垦前、中、后不同阶段不同部门的多源数据, 提出了包含监测点布设、监测指标最小数据集确立、监测手段选择为一体的面向复垦区内的土壤、地表水、地下水和农作物的工矿废弃地复垦跟踪监测方案制定方法, 并以西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦后土地为对象进行实证研究。采用该文提出的方法, 该项目复垦土地跟踪监测分别布设了由面状复垦单元生成的复垦土壤、农作物、地下水、地表水监测点 53、5、5 和 1 个, 以及 1 类点状地物(集水池)和 4 类线状地物(生产路、田间路、沟渠和河流)2 种监测类; 建立了涵盖建设、环境和肥力等 3 方面内容 15 个指标的监测最小数据集。采用变异系数和相对偏差、变异函数变程和全局莫兰指数, 从监测点数量、空间布局 2 个方面验证评价监测点布设方案的合理性。布设监测点数(53 个)与验证计算得到的样本数(51 个)较为接近, 符合数量要求; 实际取样间距(平均 456 m)未超过各监测指标变异函数变程, 无需细化监测单元或监测点; 监测点空间分布特征介于随机或集聚与随机之间, 显著性不明显(0.05 水平), 监测点空间布局比较理想。基于验证评价结果可知, 该文制定的实证区复垦土地跟踪监测方案是合理的, 提出的监测方案制定方法是可行的, 能够指导工矿废弃地复垦后管护与质量提升工作, 为制定工矿废弃地复垦跟踪监测技术标准提供技术支撑与实证依据。

**关键词:** 土地复垦; 土地利用; 工矿; 废弃地; 多源数据; 地统计学; 监测方案

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.031

中图分类号: P962、X833 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0240-09

周妍, 罗明, 周旭, 黄元仿, 张世文. 工矿废弃地复垦土地跟踪监测方案制定方法与实证研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 240—248. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.031 <http://www.tcsae.org>  
Zhou Yan, Luo Ming, Zhou Xu, Huang Yuanfang, Zhang Shiwen. Making method of tracking monitoring scheme for abandoned industrial and mining land reclamation and its empirical research[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 240—248. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.031 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

工矿废弃地是一类特殊的因矿业活动受损的国土空间, 其复垦利用对改善生态环境、优化国土空间开发布局、促进资源节约和生态文明建设具有重要作用。近年来, 《土地复垦条例》、《历史遗留工矿废弃地复垦利用试点管理办法》等法规政策文件相继颁布实施, 有力地推进了中国土地复垦相关工作, 相关法规政策均提出了开展复垦土地跟踪监测和评价的要求, 凸显其重要性<sup>[1]</sup>。由于采样费时费力, 样品测试分析成本高, 确定监测所需要的采样点数目、监测测试指标等十分重要, 如果布点和测试指标确定不当, 不仅没有代表性, 得到的数据也没有意义<sup>[2-3]</sup>。

目前国内外有关土地监测方案的研究主要集中于非重构土壤采样点布设方法, 常用方法主要有主观判断采样、规则网格采样与混合采样等<sup>[4-5]</sup>。在环境因素监测上, 常采用网格法<sup>[6-7]</sup>, 这种方法工作量大, 主观因素对结果的影响也大, 分析效率低, 不能够准确、全面地掌握土壤信息。最优采样方案的确定是土壤环境调查、监测及监测网建设过程中的热点和难点科学问题<sup>[8-9]</sup>。土壤特征的变化并非完全随机, 不同尺度上土壤特征均呈现出相应的空间结构, 具有明显的空间相关性。这种空间相关性的发现表明基于土壤特征随机变异假设的传统土壤采样布点方法具有较大的缺陷, 往往难以避免采样区域局部样点冗余和局部样点密度无法满足精度要求的情况<sup>[2]</sup>。精准农田管理提出了将农业带上数字和信息时代, 3S 为土壤的野外调查提供了众多便利, 结合地统计学的 3S 技术更是准确布设采样点, 进行空间插值运算以全面掌握待监测评价土壤信息的有力工具<sup>[10-11]</sup>。由于废弃时间长、成因复杂、不确定性因素多, 历史遗留工矿废弃地复垦后的地力提升与质量改善需要较长的过程, 复垦后跟踪监测与评价工作尤为重要, 但目前针对性的跟踪监测评价技术不成熟, 体系不完善, 工作缺位, 已然制约了中国历史遗留工矿废弃地复垦工作的推进。对于某一历史

收稿日期: 2016-11-08 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471186、41571217)

作者简介: 周妍, 湖北咸宁人, 博士, 高级工程师, 研究方向为土地复垦政策、技术标准, 以及土地复垦监测监管技术等。北京 国土资源部土地整治中心, 100035。Email: zhouyan053991@163.com。

\*通信作者: 罗明, 吉林长春人, 博士, 研究员, 研究方向为土地整治技术政策、矿区复垦标准等。北京 国土资源部土地整治中心, 100035。

Email: luoming@mail.lrcr.org.cn

遗留工矿废弃地复垦项目而言,不同部门(如国土、农业和环保等)在不同阶段开展了众多的调查评价工作。如复垦前地调、环保等部门开展的土壤地球化学和土壤环境背景调查,复垦过程中国土部门进行的复垦规划设计,复垦后国土、农业等部门进行的复垦项目工程验收和复垦耕地质量等级评定。在跟踪监测前,同一复垦项目产生了多源数据集合。综合考虑历史遗留工矿废弃地复垦后土地这一监测对象的特征,充分利用这些多源数据,提出复垦后土地跟踪监测方案制定方法及具体监测方案,将为全面客观评价复垦土地质量演变过程,进而为制定针对性管护与质量提升措施提供科学依据与技术支撑。

本文基于 3S 技术和地统计学,整合多源数据,提出中国工矿废弃地复垦土地跟踪监测方案制定方法,并以西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦项目为例进行了实证研究。旨在为工矿废弃地复垦后管护与质量提升,进而为制定工矿废弃地复垦跟踪监测技术标准提供科学依据和技术支撑。

## 1 多源数据整合下的工矿废弃地复垦后土地跟踪监测方案制定方法

工矿废弃地类型众多,成因复杂,且复垦时采取的措施多样,导致工矿废弃地复垦后土地监测不同于一般的土地监测。收集整理复垦前中后各个阶段不同部门(国土、农业和环保等)的相关数据与资料,包括:复垦前背景调查、复垦中规划设计、复垦后验收等数据与资料,用同期遥感影像对相关数据进行验证核实,对发现的错误进行纠正,形成工矿废弃地复垦监测方案确定的基础多源数据集合。基于该多源数据集合,借助于 3S 和地统计学,提出包含监测点布设方案、监测指标最小数据集确定、监测手段选择为一体的面向土壤、地下水、地表水、农作物的工矿废弃地复垦监测方案制定方法。具体制定技术流程如图 1 所示。

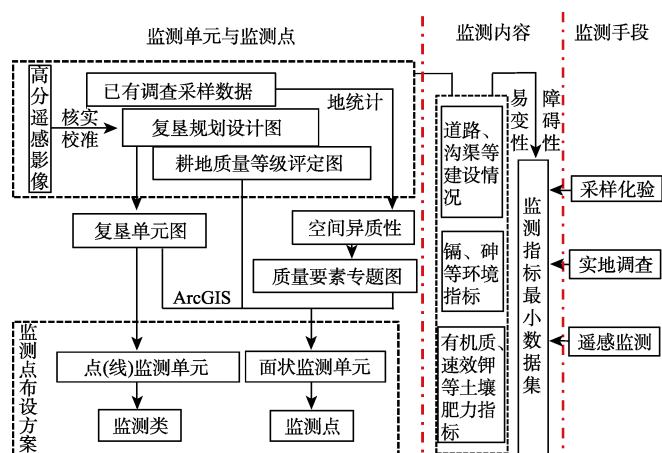


图 1 工矿废弃地复垦土地跟踪监测方案制定技术流程

Fig.1 Technological process of making tracking and monitoring scheme for reclaimed abandoned mine land

### 1.1 跟踪监测单元划分与监测点布设

#### 1.1.1 跟踪监测单元划分与监测点布设一般流程

工矿废弃地复垦土地跟踪监测对象包括点状、线状

和面状监测单元。

收集筛选整合复垦不同阶段、不同部门的多源数据。从国土部门获取“复垦规划设计图”和“耕地质量等级评定图”等资料;并收集地质调查、环保、农业等相关部门的调查采样数据。

运用高分遥感影像,对国土部门的“复垦规划设计图”中复垦单元、复垦措施等进行校准与核实,确保同一复垦单元内复垦方向、复垦措施基本一致,形成复垦单元图。点(集水池)、线状监测单元(道路、沟渠等)可直接从复垦单元图中提取。

根据收集的相关部门调查采样数据及其变异系数,确定具体质量要素,参考《土壤环境质量标准》<sup>[12]</sup>、《耕地地力调查与质量评价技术规程》<sup>[13]</sup>、《农用地质量分等规程》等标准<sup>[14]</sup>,采用地统计学或其与多维分形理论相结合等方法插值获取“复垦土地质量要素专题图(如镉含量等级分布图等)”。

面状监测单元是以复垦规划设计图中的复垦单元为基础,借助 ArcGIS 软件,叠置复垦土地质量要素专题图和复垦耕地质量等级评定图形成。多图层叠置后,将形成若干细碎小图斑。根据属性相似程度(待合并的大小图斑复垦措施和方向相同,且两者所有质量要素中有 50% 以上的要素等级相同),就近将面积相对较小的细碎图斑合并到大图斑中。并按以下 2 个原则确定小图斑面积大小:一是确保合并后各质量要素等级占总复垦面积的比例与叠置前基本相同;二是确保合并后各复垦单元占总复垦面积的比例与叠置前基本相同。以面状监测单元的几何中心作为监测点。

土壤环境质量评价中应该特别注意“点对点”和“同时”两个关键词,这里的“点对点”是指土壤和农产品的样品应该来自同一点位,而“同时”是指采集土壤样品的同时采集生长于该样点的农产品<sup>[15]</sup>。参考矿山历史生产状况和复垦后土壤重金属含量的分布情况,从重金属含量较高,地势较低的土壤监测点中选择不少于 5 个点作为农作物和地下水监测点;若有地表水系,则至少在地表水系下游设置 1 个地表水监测点。最终,形成面向土壤、地下水、地表水、农作物等包含监测点和监测类 2 种的复垦后土地跟踪监测布点方案。

采样人员携带监测点分布图、信息表和 GPS,进行野外采样,并核实采样点位置是否合适,对于分布不尽合理的进行微调,形成最终的监测点布设方案。

#### 1.1.2 质量要素专题图制作方法

如何科学准确地实现复垦质量要素由点到面的扩展,将影响复垦监测单元的划分和监测效果,方案将结合已有数据的变异函数、空间特征等,选择适合不同质量要素的高精度空间预测方法。这些方法包括地统计学以及基于此发展起来的相关方法<sup>[16-20]</sup>。目前使用最多的空间插值方法主要为克里格法,然而,单一克里格法具有平滑效应,无法凸显复垦土地质量要素由于复垦措施的差异导致的突变性。因此,本文将分形理论与克里格法结合,采用多维分形克里格法(Multifractal Kriging, Mkrige)进行复垦土地质量要素的空间预测,以消除其平滑效应对预测结果的影响<sup>[21-25]</sup>。通常,空间变量的平均聚集随着测量尺度的变化而变化<sup>[21]</sup>。按照多维分形理论,

在尺度变化的一定范围内, 二维空间变量  $Z(x)$  在点  $x_0$  附近的平均聚集与测量尺度符合下面的幂率关系

$$C(r) \propto r^{\alpha(x_0)-2} \quad (1)$$

式中,  $C(r)$  为空间变量  $Z(x)$  在尺度测量尺度为  $r$  的范围内的平均值,  $\alpha(x_0)$  称为点  $x_0$  处的奇异性指数。由 (1) 式可以得出

$$\alpha(x_0) = \frac{\ln C(r)}{\ln r} + 2 \quad (\varepsilon \rightarrow 0) \quad (2)$$

进而可以得到 Mkrige 的计算公式

$$z(x_0) = \varepsilon^{\alpha(x_0)-2} \cdot \sum_{x_i \in \Omega(x_0, \varepsilon)} (\lambda_i \cdot z(x_i)) \quad (3)$$

式中  $\varepsilon$  为观测尺度,  $\Omega(x_0, \varepsilon)$  是插值点  $x_0$  的半径  $\varepsilon$  的邻域, 式  $\sum_{x_i \in \Omega(x_0, \varepsilon)} (\lambda_i \cdot z(x_i))$  是普通克里格插值,  $\lambda_i$  为权重系数。

一组实测样本通过空间预测后, 在空间上将产生实测与预测值两组样本数据, 分别从实测值和预测值中取最大(小)的 10% 作为最大(小)特异值组。采用特异值覆盖比率和均方根误差 (root mean squared errors, RMSE) 检验预测方法(多维分形克里格法)对特异值的再现程度以及空间预测精度。以全样本预测结果为对比值, 比较预测值和实测值的特异值。覆盖比率为预测值最小(大)特异值覆盖实测值最小(大)特异值的百分比, 比率越高说明空间预测效果越好<sup>[21-22]</sup>。RMSE 用来评价预测的准确性, RMSE 值越小, 模拟结果越准确<sup>[26-27]</sup>。

## 1.2 跟踪监测内容确定

基于已有的调查取样数据, 采用地统计学、经典统计学方法, 结合《土壤环境质量标准》<sup>[12]</sup>、《耕地地力调查与质量评价技术规程》<sup>[13]</sup>、《农用地质量分等规程》等<sup>[14]</sup>, 分析复垦后土地中障碍因素, 并结合复垦前后土地质量变化, 分析不同复垦土地质量指标的易变性。综合考虑障碍、易变性选择监测指标, 构建涵盖工矿废弃地复垦后土地跟踪监测指标最小数据集。

采用单项污染指数、点位超标率和养分指标丰富程度来反映指标的障碍性。单项污染指标接近 1, 且点位超标率达到 20% 以上的, 以及养分缺乏, 视作该指标存在障碍性。采用变化幅度来反映指标易变性, 当养分(正向指标)呈现减少趋势, 或者重金属(负向指标)呈现增加趋势的, 纳入监测指标范畴。地表水、地下水和农作物监测指标与土壤监测环境指标一致。

## 1.3 跟踪监测手段

土壤、地表水、地下水和农作物样品的采集、处理、贮存及测试, 按照《土壤检测》<sup>[28]</sup>、《土地质量地球化学评估技术要求》<sup>[29]</sup>、《地下水监测技术规范》<sup>[30]</sup>和《地表水和污水监测技术规范》<sup>[31]</sup>进行。建设情况通过遥感监测、实地调查等获取, 遥感监测按《土地利用动态遥感监测规程》<sup>[32]</sup>执行。

## 2 跟踪监测方案合理性验证评价

为了量化验证评价监测方案及其制定方法合理性和可行性, 基于本文提出的复垦后土地跟踪监测方案制定方法确定的实证区跟踪监测方案, 进行采样化验。同时,

通过按照本监测方案采样获取的 2016 年监测数据, 从监测点布设方案(监测点布设数量、空间布局)进行量化验证评价。采用变异系数和相对偏差计算样点数据, 并与实际布设监测点数量对比, 进而验证评价监测点数量是否满足要求; 采用地统计学中变异函数的变程(range)衡量监测点间距<sup>[13,16]</sup>, 采用全局莫兰指数验证评价空间布局合理性<sup>[16-18,29-31]</sup>, 进而确定按本文提出监测方案制定方法确定的监测点位置、分布格局是否合理。

### 2.1 监测点数量验证

参考《土壤环境监测技术规范》<sup>[33]</sup>, 采用变异系数和相对偏差计算样本数进行监测点数量的验证评价。其计算公式如下

$$N = t^2 \cdot CV / m^2 \quad (4)$$

式中  $N$  为样品数;  $t$  为选定置信水平(土壤监测一般选定为 95%)一定自由度下的  $t$  值;  $CV$  为变异系数(%), 根据采集的数据分析获取;  $m$  为可接受相对偏差(%), 土壤监测一般限定为 20%~30%。

### 2.2 监测点空间布局的合理性评价

1) 监测点间距合理性评价。变异函数的变程表示了某种观测尺度下, 空间相关性的作用范围, 其大小表示研究变量空间自相关变异的尺度范围<sup>[21]</sup>。在变程范围内, 样点间的距离越小, 其相似性, 即空间相关性越大。超出变程范围将增加采样点数量。基于 GS+10, 获取监测指标最优的变异函数变程, 对比分析得出的变异函数变程与实际取样的样点间距, 在满足邻域搜索周边 2~5 个监测点的情况下, 取样间距小于变程, 表明符合要求, 无需加密补充采样。

2) 监测点空间布局合理性验证评价。以全局性莫兰指数(Moran's Index, Moran's  $I$ )为基础, 验证监测点布设方案的空间布局是否合理<sup>[34-35]</sup>。Moran's  $I$  是用来衡量集聚特征的一个综合性评价统计特征参数。

全局性 Moran's  $I$  一般过程为

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中  $I$  为莫兰指数;  $n$  为空间数据的个数;  $x_i$  和  $x_j$  分别为  $i$  区、 $j$  区的空间要素的属性值;  $\bar{x}$  为所有空间要素平均值;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵的元素, 空间权重矩阵一般为对称矩阵, 且  $w_{ij}=0$ 。

对于全局 Moran's  $I$ , 一般使用标准化统计量  $Z(I)$  来检验空间要素空自相关性的显著性水平, 其公式为

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{Var(I)}} \quad (6)$$

式中  $Var(I)$  为 Moran's  $I$  的理论方差;  $E(I) = -1/(n-1)$  为 Moran's  $I$  的理论期望值。

Moran's  $I > 0$  表示空间正相关性, 其值越大, 空间相关性越明显, Moran's  $I < 0$  表示空间负相关性, 其值越小, 空间差异越大; Moran's  $I = 0$ , 空间呈随机性分布<sup>[36]</sup>。通过计算, 聚集特征显著则说明制定的布点方案各个方向

过于密集，监测点或单元需要进一步合并；分散（Dispersed）特征明显则说明制定的布点方案各个方向过于分散，监测点或单元需要进一步细分。若 Moran's *I* 具有空间相关性，且显著性不明显（0.05 水平），样点空间聚集特征处于随机（Random）或介于集聚（Clustered）与随机之间，则监测布点空间布设比较理想。采用 GeoDA 软件进行全局莫兰指数的分析。

3 实证研究

3.1 实证区基本概况

按本文提出监测方案制定方法，以西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦项目为例进行实证研究（图 2）。该硫磺矿采选工程始建于 1958 年，主要从事硫磺矿开采和冶炼，2004 年县政府根据当时企业情况进行破产改制，改制后交由乡政府管理。经过 40 余年的矿产开采以及冶炼制硫磺，排弃的磺渣堆积如山，整个矿区生态环境非常恶劣。复垦土地总面积 266.49 hm<sup>2</sup>，其中耕地、林地和草地分别为 197.24、63.49 和 5.76 hm<sup>2</sup>。该项目于 2013 年开始实施复垦工程，按复垦方向，总体上分成耕地、林地和草地 3 大复垦单元。耕地复垦单元主要采取客土、平整、坡改梯、配套基础设施建设、撒播生石灰调节 pH 值等，林地复垦单元采取 V 形整地、穴状种植等。2014 年完成项目工程验收。

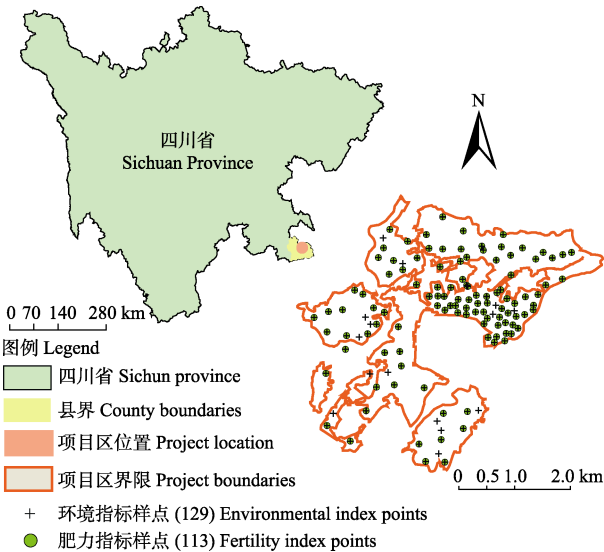


图 2 实证区位置及已有样点分布图  
Fig.2 Location of study area and distribution of pre-existing sampling points

3.2 跟踪监测方案制定所需数据收集整理

收集整理项目所在地区地质环境、工矿生产的历史状况、复垦规划设计、复垦工程实施、以及不同阶段的土壤调查和遥感影像等数据、文字和图件。借助于遥感影像，对相关资料进行校准与核实。

实证区于 2013—2014 年完成主要复垦工程，国土、农业等部门在复垦土地上已开展调查采样工作。2014 年农业部门按照《土壤环境质量标准》<sup>[12]</sup>和《补充耕地质量验收评定技术规程（试行）》<sup>[37]</sup>，完成实证区

复垦耕地质量评定，采集的 16 个样点全部位于本实证区，测试分析了全氮（total nitrogen, TN）、土壤有机质（soil organic matter, SOM）、全钾（total potassium, TK）、全磷（total phosphorus, TP）等肥力指标。2015 年国土地质调查部门按照《土地质量地球化学评估技术要求》<sup>[17]</sup>，在本实证区内采集分析表层土壤样点 138 个，完成实证区复垦耕地地球化学评价。138 个样点全部测试分析了砷（As）、镉（Cd）、铬（Cr）、铜（Cu）、汞（Hg）、镍（Ni）、铅（Pb）、pH 值、硒（Se）、锌（Zn）等环境指标；其中 98 个样点测试分析了全氮（total nitrogen, TN）、土壤有机质（soil organic matter, SOM）、全钾（total potassium, TK）、全磷（total phosphorus, TP）等肥力指标。

参考《数据的统计处理和解释正态样本离群值的判断和处理》<sup>[38]</sup>，结合复垦后土地质量突变性大的特征，剔除 4 个坐标不在项目区内的样点（环境指标样点），以及 2 个 Zn、3 个 Se 和 1 个 SOM 含量与各自平均值的偏差超过标准差的 5 倍以上的异常值，获取环境指标有效采样点 129 个，肥力指标有效采样点 113。由于数据多源，来自不同部门，测试的内容也不尽相同，为最大限度地利用已有的数据，确保分析结果的可靠性，不同指标样本数可以有所不同。

3.3 实证区跟踪监测单元划分和监测点的确定

利用 SPSS20.0 计算已有复垦土地质量指标的统计特征值（表 1）。按照一般对变异系数（*CV*）值的评价，所有指标 10%<*CV*<100%，表明这些指标属于中等变异性，值越大，变异程度越高<sup>[24-27]</sup>。参考《土壤环境监测技术规范》<sup>[33]</sup>，根据变异系数大小，按变异系数大于 40% 的元素参与质量专题图制作。表 1 表明，Cd、Cr、SOM 和 TK 4 个要素变异系数超过 40%。

表 1 已有质量要素的统计特征值  
Table 1 Statistical characteristic value of pre-existing quality factors

指标 Index	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	4.3	27.6	15.43	5.53	35.85
Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.25	3.54	0.95	0.62	65.23
Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )	111	465	182.46	73	40.01
Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	31	161	83.27	30.09	36.14
Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.06	0.47	0.24	0.09	37.39
TN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	767	2 492	1 513.57	387.86	25.63
Ni/(mg·kg <sup>-1</sup> )	39	142	73.46	20.34	27.68
Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )	14.1	55.1	33.11	9.02	27.25
Se/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.22	1.45	0.68	0.19	28.33
Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	64.2	211	127.27	25.36	19.92
SOM/%	0.81	6.2	2.7	1.09	40.35
TK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.31	2.49	1.14	0.46	40.82
TP/mg·kg <sup>-1</sup>	319	1517	810.94	255.09	31.46
pH value	4.41	8.52	6.68	1.1	16.5

注：TN 为全氮，SOM 为土壤有机质，TK 为全钾，TP 为全磷；下同。  
Note: TN is total nitrogen, SOM is soil organic matter, TK is total potassium, TP is total phosphorus. The same below.



采用 Mkrige 法对 Cd、Cr、SOM 和 TK 4 个质量要素进行空间预测, 并采用特异值覆盖比率和 RMSE 检验空间预测精度和效果。Cd、Cr、SOM 和 TK 的特异值覆盖比率分别为 89.13%、92.75%、88.19%、76.32%, 均能较好地反映原始数据的差异性, 消除了平滑效应对空间预测结果的影响。4 个指标的 RMSE 分别为 1.76、1.43、1.98、1.32, 处于 1~2 之间, 空间预测模型拟合效果较好。

基于 Mkrige 法制作实证区复垦土地质量要素专题图 (图 3a-3d)。根据校准核实后的复垦单元图 (图 3e), 整个实证区复垦后土地共包括 123 个面状复垦单元、4 类线状复垦单元 (生产路、田间路、沟渠和河流) 和 1 类点状复垦单元 (集水池)。根据校准核实后的耕地质量等级评定图 (图 3f), 复垦土地质量等级主要以 9、10 等为主。以复垦单元图为底图, 空间叠置复垦土地质量要素专题图、耕地质量等级评定图, 生成 1339 个图斑的监测单元, 按本文确定的合并方法, 以 3 333 m<sup>2</sup> 合并阈值, 就近将相对较小的图斑合并到大图斑中, 共获取 53 个监测单元。

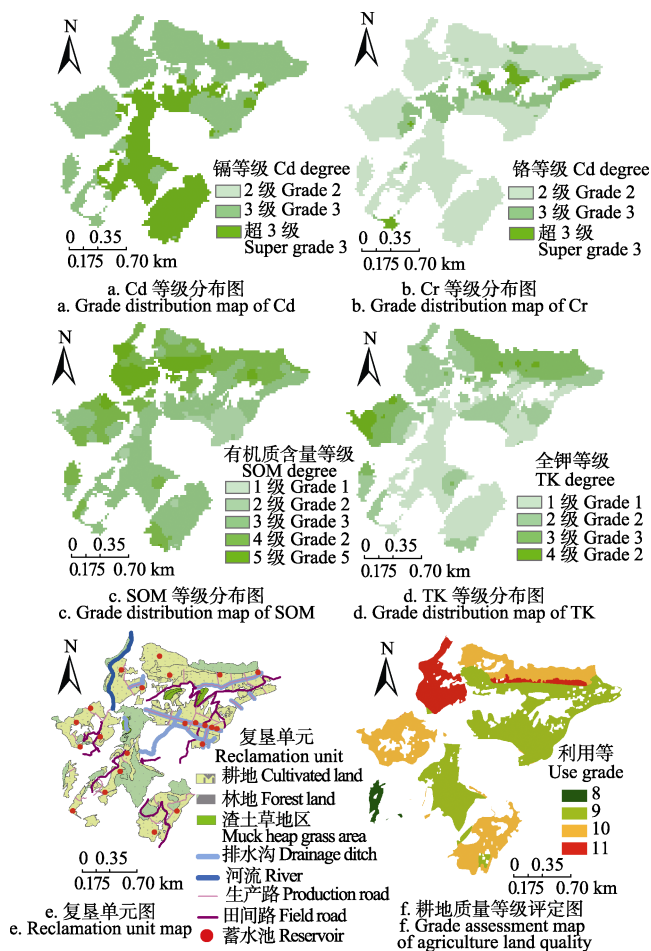


图 3 复垦土地质量要素专题、复垦单元和耕地质量等级评定图

Fig.3 Thematic maps of various land quality factor, land reclamation unit map and agriculture land quality gradation map

基于 ArcGIS10.0 获取监测单元几何中心, 并以几何中心作为监测点。根据复垦单元图, 直接提取监测类, 包括线状监测单元 4 类、点状监测单元 1 类。野外核实后, 除了就近微调 2 个采样点位置外, 其他均未改变。最终共获取土壤监测点 53 个、线状监测 4 类, 点状 1 类

(图 4)。按照本文提出的跟踪监测方案制定方法, 布设与土壤“点对点”的农作物、地下水监测点各 5 个; 在地表水系下游布设 1 个地表水监测点 (图 4)。由于在生成监测点过程中已经综合考虑土地复垦措施、复垦后验收质量、调查采样等状况, 监测点分布具有很强的代表性。

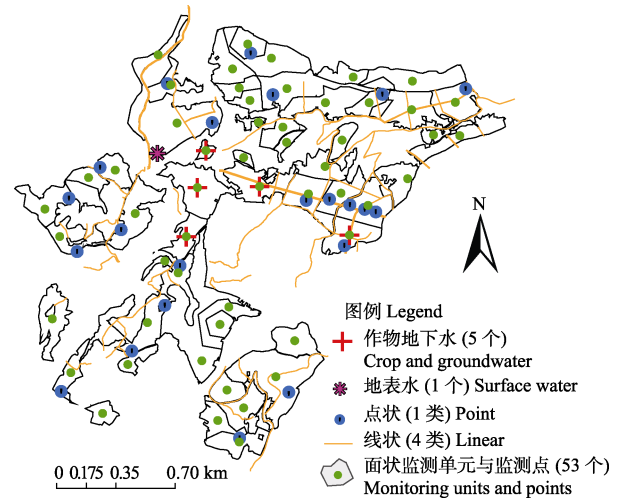


图 4 某硫磺矿采选废弃地复垦监测单元和监测点方案图  
Fig.4 Scheme diagram of monitoring unit and monitoring point of one abandoned sulfur mine land

### 3.4 监测指标最小数据集与监测手段

基于本文提出的监测方案制定方法, 通过计算变化幅度来表征监测指标的易变性。变化幅度为各指标 2015 年数值与 2013 年数值之差除以 2013 年数值的百分数。采用平均值、单项污染指数或等级、点位超标率来反映指标障碍性<sup>[39]</sup>。土壤污染物  $i$  的单项污染指数  $P_i$  按公式 (7) 进行计算<sup>[40]</sup>。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (7)$$

式中  $C_i$  为土壤中  $i$  指标实测浓度;  $S_i$  为污染物  $i$  在 GB 15618 中给出的二级标准值。点位超标率将结合点位的 pH 值来确定该点是否超标, 根据每个采样点的 pH 值大小, 按《土壤环境质量标准》<sup>[12]</sup>分别确定对应点的超标情况。

表 2 表明, 环境指标中 Cd、Cr、Cu 和 Ni 元素的单项污染指数高于或者接近 1, 依次分别为 3.17、0.91、0.83、1.47, 点位超标率也均在 30% 以上, 其中 Cd、Ni 分别达到 92.35%、93.02%; 就变化幅度而言, As、Ni 呈现下降趋势, Cd、Cr、Cu、Hg 四个指标呈现上升趋势, 且 Cd 反弹明显。综合考虑各项因素的单项污染指数、点位超标率、变化幅度等, 将 Cd、Cr 和 Ni 元素纳入监测最小数据集。由于复垦区 Se 含量丰富, 计划发展富硒农产品, 将其纳入监测指标。土壤有机质和全氮均为较丰富, 两者相关性强, 且土壤有机质是土壤肥力的重要指标, 故而将其列入监测指标。项目区钾素严重缺乏, 土壤速效钾是土壤全钾中作物可利用的部分, 更能反映土壤肥力状况, 因此本方案以速效钾 (available potassium, AK) 作为监测最小数据集的一个指标。复垦区为历史上“土法炼磺”的废弃地, 酸化严重, 复垦过程中使用大量生石灰

中和其酸性，但由于生石灰的作用具有一定时效性，且 pH 值大小直接影响到环境指标的污染状况判定，因此，将 pH 值作为监测指标。根据《土地复垦质量控制标准》<sup>[41]</sup>，将地形、配套设施、生产力水平等建设质量指标也纳入监测内容。

表 2 已有指标障碍性与易变性分析  
Table 2 Analysis of obstacles and volatility of pre-existing indices

指标 Index	均值 Mean	障碍性 Obstacles			易变性 Volatility	是否 监测 Monitoring or not
		污染 指数 Pollution index	点位超 标率/% Exceeding rate/%	丰富度/ 酸度 Richness /Acidity	变化 幅度 *Rangeability/ %	
As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	15.43	0.51	0	—	−24.33	否
Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.95	3.17	92.25	—	93.88	是
Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )	182.46	0.91	38.76	—	54.48	是
Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	83.27	0.83	36.47	—	5.38	否
Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.24	0.48	7.75	—	20	否
Ni/(mg·kg <sup>-1</sup> )	73.46	1.47	93.02	—	−12.76	是
Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )	33.11	0.11	0	—	0	否
Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	127.27	0.51	0	—	3.94	否
TN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1 513.57	—	—	较丰富	—	否
SOM/%	2.7	—	—	较丰富	—	是
TK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	1.14	—	—	缺乏	—	否
TP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	810.94	—	—	丰富	—	否
Se/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.68	—	—	丰富	—	是
pH value	6.68	—	—	偏酸	8.79	是

注：\*以 2013 年为基准年，数据采于 2015 年。  
Note: \* taken 2013 as reference year and data was collected in 2015.

上述指标与建设质量指标构成该硫磺矿采选废弃地复垦项目的跟踪监测指标最小数据集（表 3）。地下水、地表水和农作物只监测相应的环境指标。

表 3 某硫磺矿采选废弃地复垦项目跟踪监测内容与手段  
Table 3 Tracking, monitoring content and means of reclaimed project on one abandoned sulfur mine land

监测指标体系	Monitoring index system	监测手段	Monitoring means
建设质量指标	道路工程	实测和遥感结合	
	灌溉设施	实测和遥感结合	
	排水设施	实测和遥感结合	
	平整度	实测和遥感结合	
	有效土层厚度	实测	
	砾石含量	按文献[42]规定方法测定	
	植被覆盖度	按文献[43]规定方法测定	
	单位面积产量	按文献[44]规定方法测定	
环境指标	Cd	按文献[33]规定方法测定	
	Cr	按文献[33]规定方法测定	
	Ni	按文献[33]规定方法测定	
	Se	按文献[33]规定方法测定	
	pH 值	按文献[45]规定方法测定	
土壤肥力指标	SOM	按文献[46]规定方法测定	
	AK	按文献[47]规定方法测定	

注：AK 为速效钾；下同。  
Note: AK is available potassium. The same below.

3.5 跟踪监测方案合理性验证评价

3.5.1 监测点数量验证评价

通过对按照本监测方案采样获取的 2016 年监测数据的分析，所有监测指标的平均变异系数为 85.24%；可接受的相对偏差  $m$  取最低限值 20%。根据公式（4）计算，验证区约布设 51 个监测点。与按监测方案制定方法确定的 53 个较为接近。

3.5.2 监测点空间分布格局的合理性评价

采用 GS+10，确保残差和（residual sum of squares，RSS）最小，拟合各监测指标对应的最优化变异函数，获取各指标准确的变程值<sup>[31,48-49]</sup>。Cd、Cr、As、Ni、Se、pH 值、SOM、AK 的变程分别是 521.78、484.36、1694.31、646.96、651.39、519.75、1335.29 和 546.29 m，多数指标的变程在 500 m 以上。通过对布设的监测点测距，按周边 5 个监测点邻域范围估算，相互之间的间距均不超过 500 m，平均为 456 m。所有的监测指标 Range 均大于该值，表明所有指标总体上均未超过其空间相关性范围，无需细化监测单元或监测点，也即按本文提出的方法制定的实证区监测点间距方案是符合要求的。

利用公式（5）~（6），借助于 GeoDA 和 ArcGIS10.0，计算不同监测指标的全局性 Moran's  $I$  和标准统计量  $Z(I)$ 。GeoDA 空间自相关分析可进一步参考相关文献<sup>[50-51]</sup>。

由表 4 和图 5 可以看出，Cr、Cd、Se、As、pH、SOM、AK、Ni 的莫兰指数（Moran's  $I$ ）分别为 0.09、0.16、0.13、0.18、0.01、0.03、0.21，均为正值，表明监测点之间呈现空间正相关，且具有一定的相似性，这也进一步验证了变程分析的结果。从空间布局特征看，在 0.05 水平下，Cr、Cd、Se、As、pH、SOM、AK 的标准化统计量  $Z(I)$  值分别为 1.05、1.64、1.33、1.73、0.28、0.05，为随机分布；Ni 的  $Z(I)$  值为 2.04 呈聚集，但  $P$  值为 0.06 不显著，处于聚集与随机之间。综上可知，各监测指标具有空间相关性，但显著性不明显（0.05 水平），监测指标空间分布特征处于随机或介于聚集与随机之间，监测点布局比较理想。

表 4 不同监测指标莫兰指数  
Table 4 Different monitoring indice's Moran's  $I$

指标 Index	Cr	Cd	Se	pH	SOM	AK	Ni
$I$	0.09	0.16	0.13	0.18	0.01	0.03	0.21
$Z(I)$	1.05	1.64	1.33	1.73	0.28	0.05	2.04
$P$	0.29	0.11	0.18	0.08	0.78	0.96	0.06

注： $I$  为莫兰指数； $Z(I)$  为标准化统计量； $P$  为显著性水平  $P$  值。  
Note:  $I$  was the Moran index,  $Z(I)$  was the standardized statistic of  $I$ , and  $P$  is  $P$  value of significance level.

综合考虑监测点数量和空间布局，按照本文提出的监测方案制定方法，该项目复垦后土地跟踪监测点布设 53 个，符合数量要求；监测点间距均未超过空间相关性变程范围，且监测点间空间分布处于 Random 或介于 Clustered 与 Random 之间状态，布设监测点符合空间布局要求。通过验证评价，采用本文提出的跟踪监测方案制定方法确定的复垦项目跟踪监测点布设方案可行，且具有一定的科学性。

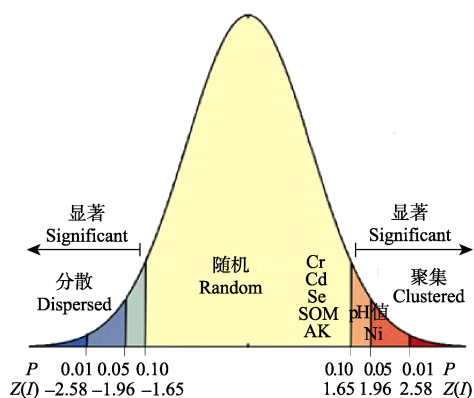


图5 不同监测指标的莫兰指数分析图

Fig.5 Moran's  $I$  analysis of different monitoring indices

## 4 讨论

本文借助于 3S 和地统计学, 结合工矿废弃地复垦特征, 提出了涵盖监测点布设方案、监测指标最小数据集确定、监测手段选择为一体的面向土壤、地下水、地表水和农作物的工矿废弃地复垦项目跟踪监测方案制定方法。实证研究表明, 单就监测点布设方案而言, 与 2015 年 138 个样点相比, 监测点数量下降了 61.59%; 监测指标减少了 50%, 对比图 2 和图 4 可知, 监测点分布更加均匀, 监测内容更加全面, 节约监测成本。综合考虑监测点数量、监测点空间分布特征, 采用本文提出的监测方案制定方法制定的实证区跟踪监测方案是合理的, 本文提出的监测方案制定方法是可行的。

但本文仅以西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦项目作为实证案例, 后续需要进一步结合其他案例进行验证评价, 以证明该监测方案制定方法的普适性; 由于监测对象质量的时间演变, 监测方案具有时效性, 后续每年的监测方案应根据前一年的监测情况, 采用本文提出的跟踪监测方案制定方法进行优化完善。考虑到复垦土壤属于重构土体, 复垦早期土体突变界面明显, 复垦利用前几年质量变化幅度较大的通常在表层土壤, 所以本方案制定方法中未考虑土壤剖面监测点布设。随着复垦时间的推移, 需要布设土壤剖面点, 布设方法等需要进一步研究。

## 5 结论

基于 3S 技术和地统计学, 整合复垦前、中、后多阶段、多部门多源数据, 本文提出了适用于具有污染隐患的历史遗留工矿废弃地复垦项目跟踪监测方案制定方法, 并以西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦项目为例进行了实证研究。

1) 基于本文提出的复垦跟踪监测方案制定方法, 构建了西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦项目 2016 年复垦监测方案, 该复垦项目共需布设 53 个监测点以及 1 类点、4 类线 2 种监测类。

2) 采用变异系数和相对偏差验证评价监测点数量是否满足要求, 通过样点数量计算可知, 监测点数量为 51 个, 与布设的 53 个比较接近, 符合数量要求; 采用变异

函数变程、Moran's  $I$  等验证评价监测点间距、采样点空间位置的合理性, 取样间距在空间相关性变程范围之内, 且空间分布特征处于随机或介于聚集与随机之间。

3) 构建了西南地区某历史遗留硫磺矿采选废弃地复垦项目涵盖建设质量、环境、土壤肥力等 3 方面 15 个指标的最小数据集。

## [参 考 文 献]

- [1] 罗明, 周旭, 周妍, 等. 工矿废弃地复垦利用专项规划研究[M]. 中国大地出版社, 2013.
- [2] 陈天恩, 陈立平, 王彦集, 等. 基于地统计的土壤养分采样布局优化[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (增刊 2): 49—55.  
Chen Tianen, Chen Liping, Wang Yanji, et al. Optimal arrangement of soil nutrient sampling based on geo-statistics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(Supp.2): 49—55. (in Chinese with English abstract)
- [3] 许红卫, 王珂. 田间土壤采样数据的统计特征与空间变异性研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2000, 26(6): 665—669.  
Xu Hongwei, Wang Ke. Statistical parameters of soil sampling data and its spatial variability[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University: Agriculture and Life Science, 2000, 26(6): 665—669. (in Chinese with English abstract)
- [4] 任振辉, 吴宝忠. 精细农业中最佳土壤采样间距确定方法的研究[J]. 农机化研究, 2006(6): 82—85.  
Ren Zhenhui, Wu Baozhong. The research of determine method for the best soil sampling space in precision agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(6): 82—85. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王宏斌, 杨青, 刘志杰, 等. 利用计算机模拟采样确定合理的土壤采样密度[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 145—148.  
Wang Hongbin, Yang Qing, Liu Zhijie, et al. Determining optimal density of grid soil-sampling points using computer simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(8): 145—148. (in Chinese with English abstract)
- [6] 苏全龙, 周生路, 易昊旻, 等. 几种区域土壤重金属污染评价方法的比较研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(4): 1309—1316.  
Su Quanlong, Zhou Shenglu, Yi Haomin, et al. A comparative study of different assessment methods of regional heavy metal pollution[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(4): 1309—1316. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李建波, 王卫华, Su Yiming, 等. 温室土壤含水率与导热率空间分布及相关性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 127—132.  
Li Jianbo, Wang Weihua, Su Yiming, et al. Spatial pattern and interrelation of soil water content and thermal conductivity in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 127—132. (in Chinese with English abstract)

- [8] Lark R M, Bellamy P H, Rawlins B G. Spatio-temporal variability of some metal concentrations in the soil of eastern England, and implications for soil monitoring[J]. *Geoderma*, 2006, 133(3/4): 363—379.
- [9] 谢志宜, 罗小玲, 郭庆荣, 等. 耕地土壤环境质量监测网最优网格尺度识别研究—以珠三角耕地土壤镉为例[J]. *生态环境学报*, 2015(9): 1519—1525.  
Xie Zhiyi, Luo Xiaoling, Guo Qingrong, et al. Identify optimal grid scale on soil environmental quality monitoring network as an example of cultivated soil cadmium in the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(9): 1519—1525. (in Chinese with English abstract)
- [10] Cerri C E P, Bernoux M, Chaplot V, et al. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: Basis for selecting an agronomic experimental area[J]. *Geoderma*, 2004, 123(1/2): 51—68.
- [11] Welsh J P, Wood G A, Godwin R J, et al. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in Cereals, Part II: Wheat[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 84(4): 481—494.
- [12] 土壤环境质量标准: GB 15618-1995[S].
- [13] 耕地地力调查与质量评价技术规程: NY/T 1634-2008[S].
- [14] 农用地质量分等规程: GB/T 28407-2012[S].
- [15] 陈怀满. 耕地土壤环境质量评价中点对点土壤-农产品同时采样的重要性和必要性[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3).
- [16] Coburn T C. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*[M]//*Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, 2000: 437—438.
- [17] Mosammam A M. *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*, second edition[J]. *Journal of Applied Statistics*, 2013, 40(4): 923—923.
- [18] Abzalov M. *Introduction to Geostatistics*[M]//*Applied Mining Geology*. Springer International Publishing, 2016.
- [19] Gómez-Hernández J J, Horta A, Jeanée N. *Geostatistics for environmental applications*[J]. *Mathematical Geosciences*, 2016, 5(1): 1—2.
- [20] Seyedmohammadi J, Esmaeelinejad L, Shabanpour M. Spatial variation modeling of groundwater electrical conductivity using geostatistics and GIS[J]. *Modeling Earth Systems & Environment*, 2016, 2(4).
- [21] 陈光, 高然, 张世文, 等. 基于多维分形法的土壤养分空间预测[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 159—168.  
Chen Guang, Gao Ran, Zhang Shiwen, et al. Spatial prediction of soil nutrients based on multi-dimensional fractal methods[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 159—168. (in Chinese with English abstract)
- [22] Yuan Feng, Li X, Jowitt S M, et al. Anomaly identification in soil geochemistry using multifractal interpolation: A case study using the distribution of Cu and Au in soils from the Tongling mining district, Yangtze metallogenic belt, Anhui province, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, s 116—117(3): 28—39.
- [23] Cheng Q. Multifractal interpolation method for spatial data with singularities[J]. *Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy*, 2015, 115(3): 235—240.
- [24] 李庆谋. 多维分形克里格方法[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 248—256.  
Li Qingmou. Multifractal-krige interpolation method[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(2): 248—256. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张世文, 宁汇荣, 高会议, 等. 基于各向异性的区域土壤有机碳三维模拟与空间特征分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(16): 115—124.  
Zhang Shiwen, Ning Huirong, Gao Huiyi, et al. Three-dimensional simulation and spatial characteristics of soil organic carbon based on anisotropy in region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(16): 115—124. (in Chinese with English abstract)
- [26] Zhang S W, Shen C Y, Chen X Y, et al. Spatial interpolation of soil texture using compositional kriging and regression Kriging with consideration of the characteristics of compositional data and environment variables[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(9): 1673—1683.
- [27] Zhang Shiwen, Huang Yuanfang, Shen Chongyang, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. *Geoderma*, 2012, 171(2): 35—43.
- [28] 土壤检测: NY/T 1121.1-2006[S].
- [29] 土地质量地球化学评估技术要求: DD2008-06[S].
- [30] 地下水监测技术规范: HJ/T164-2004[S].
- [31] 地表水和污水监测技术规范: HJ/T91-2002[S].
- [32] 土地利用动态遥感监测规程: TD/T 1010-1999[S].
- [33] 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166-2004[S].
- [34] 史舟, 李艳. *地统计学在土壤学中的应用*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [35] 李子良, 王树涛, 张利, 等. 经济快速发展地区耕地生产能力空间格局[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 323—331.  
Li Ziliang, Wang Shutao, Zhang Li, et al. Spatial pattern of cultivated land productivity in rapid economic development region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(11): 323—331. (in Chinese with English abstract)
- [36] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93—115.
- [37] 农业部办公厅. 补充耕地质量验收评定技术规程(试行): 以农办农(2012)35 号[S].
- [38] 数据的统计处理和解释正态样本离群值的判断和处理: GB/T 4883-2008[S].
- [39] 索琳娜, 刘宝存, 赵同科, 等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 179—186.  
Suo Linna, Liu Baocun, Zhao Tongke, et al. Evaluation and analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(9): 179—186. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘巍, 杨建军, 汪君, 等. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1938—1945.



- Liu Wei, Yang Jianjun, Wang Jun, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of East Junggar Basin in Xinjiang[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1938—1945. (in Chinese with English abstract)
- [41] 土地复垦质量控制标准: TD/T 1036-2013[S].
- [42] 土壤检测第 3 部分: 土壤机械组成的测定: NY/T 1121.3-2006[S].
- [43] 林地分类: LY/T 1812-2009[S].
- [44] 耕地质量监测技术规程: NY/T 1119-2012[S].
- [45] 土壤检测第 2 部分: 土壤 pH 的测定: NY/T 1121.2-2006[S].
- [46] 土壤检测第 6 部分: 土壤有机质的测定: NY/T 1121.6-2006[S].
- [47] 土壤速效钾和缓效钾含量的测定: NY/T 889-2004[S].
- [48] 毛香菊, 马亚梦, 邹安华, 等. 内蒙古草原某铜铅矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 环境科学与技术, 2016(6): 156—161.
- Mao Xiangju, Ma Yameng, Zou Anhua, et al. Characteristics of heavy metal pollution in the soil of a copper molybdenum mining area in Inner Mongolia[J]. Environmental Science and technology, 2016(6): 156—161. (in Chinese with English abstract)
- [49] 张世文, 张立平, 叶回春, 等. 县域土壤质量数字制图方法比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 254—262.
- Zhang Shiwen, Zhang Liping, Ye Huichun, et al. Comparison of digital mapping methods of regional soil quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(15): 254—262. (in Chinese with English abstract)
- [50] Anselin L. GeoDaTM 0.9.5-i Release Notes[M]. <http://www.csiss.org/>, 2004.
- [51] Anselin L, Rey S J. Modern Spatial Econometrics in Practice: A Guide to GeoDa, GeoDaSpace and PySAL[M]. GeoDa Press LLC, 2014.

## Making method of tracking monitoring scheme for abandoned industrial and mining land reclamation and its empirical research

Zhou Yan<sup>1</sup>, Luo Ming<sup>1✉</sup>, Zhou Xu<sup>1</sup>, Huang Yuanfang<sup>2</sup>, Zhang Shiwen<sup>3</sup>

(1. Land Consolidation and Rehabilitation Center, Ministry of Land and Resource, Beijing 100035, China;

2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Abandoned land is a special kind of land space which is damaged by industrial and mining activities. Due to being abandoned for a long time, complicated formation and uncertain factors, the improvement of soil fertility and quality during abandoned land reclamation requires a long process. So tracking monitoring and evaluation work is really important. A making method of tracking monitoring scheme for abandoned land reclamation includes the layout of monitoring points, the establishment of the minimum data set of monitoring indicators, as one of the means of monitoring soil, surface water, groundwater and crop. A case study on a reclamation project of an abandoned sulfur mine land was carried out in the southwest area of China. With the help of 3S (remote sensing, RS; geographical information system, GIS; global positioning system, GPS) and geostatistics, we proposed monitoring point layout scheme, and monitoring indicators, and established the minimum data set as one of the means for soil, groundwater, surface water and plant. Considering the reclamation measures and monitoring index of spatial heterogeneity and the reclaimed land quality evaluation results, multi-layer spatial overlap was adopted to form monitoring units and monitoring points; considering the existing land reclamation quality factors and variability, through the analysis of the existing index average value, the single pollution index, exceeding rate, richness and rangeability to obtain the minimum data set of monitoring indicators. The monitoring sites of reclaimed soil, crop, ground water, and surface water were 53, 5, 5 and 1, and 2 kinds of monitoring types were collected. A minimum data set of 15 indicators was constructed, covering the quality of construction, environment, soil fertility, and so on. The reliability of the monitoring points was validated and evaluated from the monitoring point number and spatial layout using the coefficient of variation, relative deviation, variable range of variation function and Moran's Index according to the monitoring scheme proposed in the paper. The evaluation results showed that the number of monitoring points obtained according to monitoring scheme was close to the number in verification calculation, which met the requirements. Compared with the 138 samples in 2015, the number of monitoring points decreased by 61.59%, the monitoring index was reduced by more than 50%, the distribution of monitoring points was more uniform, the monitoring content was more comprehensive, and the monitoring cost was saved; the actual sampling distance (average 456 m) did not exceed the monitoring index range of variation function, and there was no need to refine the monitoring unit or monitoring point; the spatial distribution characteristics of monitoring points were random or between clustered and random, which was not significant ( $P>0.05$ ), and the monitoring points layout was ideal. This shows that the making method of tracking monitoring scheme is scientific and feasible. The tracking monitoring scheme can guide the quality improvement project for the reclamation of abandoned mine land and also provide a technical support and empirical basis for developing the tracking monitoring standards of abandoned land reclamation.

**Keywords:** land reclamation; land use; mines; abandoned land; multi-source data; geostatistics; monitoring scheme