文章编号：1004-4051(xxxx)00-0001-09 DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230944

尾矿库土壤铵态氮空间分异性及其可视化表达

冯郑文[1]，刘亚静[1,2,3,4]

（1. 华北理工大学矿业工程学院，河北 唐山 063210；
2. 唐山市资源与环境遥感重点实验室，河北 唐山 063210；
3. 河北省矿区生态修复产业技术研究院，河北 唐山 063210；
4. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室，河北 唐山 063210）

摘　要：为解决尾矿库土壤铵态氮含量信息描述和表达手段单一，引起空间分异性精细化表述不明确的问题，以迁安市某尾矿库为研究区，采集化验 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤铵态氮含量，利用莫兰指数分析土壤铵态氮空间自相关性和空间聚集程度；利用标准差椭圆分析研究区内土壤铵态氮含量的二维空间变化趋势；基于二维空间中土壤铵态氮分异性研究，探讨 3D 经验贝叶斯克里金对土壤铵态氮三维空间分布特征的模拟，通过构建剖切面和等值面，深入研究尾矿库土壤铵态氮在水平方向及垂直方向的二维三维可视化表达效果。研究结果表明：尾矿库土壤铵态氮含量在不同土壤深度均存在显著的空间正向关联性和空间集聚性；随着土壤深度增加，铵态氮含量西南-东北变化的方向性越明显；二维三维插值显示研究区土壤铵态氮含量在水平方向、垂直方向上空间分布均有显著差异性，等值面的构建有效描述了尾矿库土壤铵态氮具体含量值的三维空间精细化分布规律。通过本文研究以期为矿区土壤理化性质三维空间分布规律研究、土壤修复和生态可持续发展提供理论支撑及参考。

关键词：铵态氮；莫兰指数；标准差椭圆；3D 经验贝叶斯克里金；空间分布
中图分类号：TD88; P285.1　　**文献标识码：**A

Spatial differentiation of ammonium nitrogen in soil of tailings pond and its visual expression

FENG Zhengwen[1]，LIU Yajing[1,2,3,4]

（1. *College of Mining Engineering*, *North China University of Science and Technology*, *Tangshan* 063210, *China*；
2. *Tangshan Key Laboratory of Remote Sensing of Resources and Environment*, *Tangshan* 063210, *China*；
3. *Hebei Mining Area Ecological Restoration Industry Technology Research Institute*, *Tangshan* 063210, *China*；
4. *Hebei Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology*, *Tangshan* 063210, *China*）

Abstract: In order to solve the problem that the description and expression means of content of ammonium nitrogen in soil of tailings pond are single, which leads to the unclear expression of spatial differences. Taking a tailing pond in Qian'an City as the research area, the content of ammonium

收稿日期：2023-12-28　　**责任编辑：**聂虹
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目资助(编号：42101393)
第一作者简介：冯郑文(1999—)，男，河南信阳人，硕士研究生，主要从事地理信息系统理论与应用研究，E-mail: 1094358223@qq.com。
通讯作者简介：刘亚静(1977—)，女，博士，教授，主要从事地理信息系统理论与应用研究，E-mail: lyj2206@126.com。
引用格式：冯郑文，刘亚静. 尾矿库土壤铵态氮空间分异性及其可视化表达[J]. 中国矿业，xxxx，x(x)：1-9.
FENG Zhengwen, LIU Yajing. Spatial differentiation of ammonium nitrogen in soil of tailings pond and its visual expression[J]. China Mining Magazine, xxxx, x(x): 1-9.

nitrogen in soil at three layers of 0-20 cm, 20-40 cm and 40-60 cm is collected and analyzed. The spatial autocorrelation and spatial aggregation degree of ammonium nitrogen in soil are analyzed by Moran's I, and the spatial distribution characteristics are described. The variation trend of content of ammonium nitrogen in soil in two dimensions is analyzed by Standard Deviation Ellipse. A 3D spatial model of ammonium nitrogen in soil is constructed by using 3D Empirical Bayesian Kriging interpolation, and a 2D visualization of ammonium nitrogen in the vertical direction is performed by model cutting and equivalent body construction. The results show that the content of ammonium nitrogen in soil of tailings pond has significant spatial positive correlation and spatial agglomeration at different soil depths. With the increase of soil depth, the direction of the change of content of ammonium nitrogen in southwest to northeast is more obvious. 2D and 3D interpolation show that the spatial distribution of content of ammonium nitrogen in soil in the study area is significantly different in both horizontal and vertical directions, and the construction of equivalent bodies effectively describes the 3D spatial fine distribution law of content of ammonium nitrogen in soil tailings pond. The paper is expected to provide theoretical support and reference for the research of 3D spatial distribution of soil properties, soil remediation and ecological sustainable development.

Keywords：ammonium nitrogen；Moran's I；Standard Deviational Ellipse；3D Experience Bayesian Kriging；spatial distribution

0 引 言

地球上，土壤对人类的生存和发展具有十分重要的意义[1-2]。受成土因素、复杂地形地貌及采矿等因素的影响，矿区土壤养分在垂直方向和水平方向上均呈现出明显的空间分异性。作为矿物加工废料的重要储存场所，尾矿库产生的环境效应不但会破坏土壤结构，还会引起土壤养分平衡的改变，进而影响土壤肥力平衡，抑制植物生长[3]。铵态氮在土壤和植物中主要以铵离子（NH^{4+}）的形式存在，其溶解性强，易被植物吸收，是土壤养分的重要指标之一。因此，开展尾矿库土壤铵态氮空间分异性研究是十分必要的，将为区域土壤铵态氮的有效调控提供理论基础，对维持土壤养分循环、提高植被生长效率、维持生态系统的稳定和可持续发展具有重要的意义。

SAIBAL 等[4-5]用统计方法评估了尾矿土中的钾化学元素和有毒元素，并分析其空间分布模式；李英钧等[6]在对石棉尾矿场地土壤污染地球化学特征的研究中，采用折线图分析表达了在典型横剖面、纵剖面土壤中重金属元素含量呈现出不同的空间分布特点；刘军等[7]通过统计表的形式描述了林区铁矿尾矿库不同采样区及不同采样深度的土壤理化性质元素含量分布，但通过这几种形式获得的信息忽略了土壤垂直方向的影响，无法直接展示尾矿库土壤铵态氮含量的三维形态。因此，利用三维空间插值描述尾矿库土壤铵态氮含量的空间分布特征是必要的。LIU 等[8]利用 3D 指示克里金插值研究土壤砷元素空间分布特征，并对砷污染区域进行风险评价；陈展[9]采用普通克里格法、反距离权重法、改进的反距离权重法及最邻近点内插方法，对地下水中的氯苯类化合物进行了三维空间内插，利用体元栅格和垂直切片，研究发现三维插值模型可以较好反映污染物的空间分布特征；赵纪堂等[10]采用三维空间插值方法构建顾北煤矿含水层的真三维地下水化学场，通过三维可视化模型描述分析地下水化学场的三维空间分布规律；韩霁昌等[11]和刘庚等[12]应用不同空间插值方法构建三维空间分布、纵断面空间分布研究土壤盐分和污染物的空间分布特征，比较不同方法的插值精度，发现 3D 克里金插值方法精度最高，插值结果可较真实反映土壤盐分及污染物的实际分布状况；ZHANG 等[13]以加拿大麦克唐纳农场为研究区域，通过三维回归克里格（RK）与多种近端土壤传感技术相结合来测试多种土壤理化性质特征，并利用水平剖面图展现不同土层深度的土壤理化性质空间分布模式。目前，国内外学者针对尾矿库土壤特性的研究往往忽略了对植被生长有积极影响，并在土壤养分中具有重要作用的土壤铵态氮元素，对尾矿库土壤数据的空间分布特征主要集中在二维描述上，对其三维空间分布特征鲜有研究；在三维空间分布特征表达上主要为三维可视化模型和纵断面剖切两种方式，未能构建等值体模型，忽略了对尾矿库土壤铵态氮含量的三维精细化空间表达。

因此，本文以迁安市某尾矿库为研究区域，通过野外调查、室内分析，采用空间自相关、标准差椭圆及克里金插值理论与方法，研究尾矿库 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤铵态氮含量的空间分异特征；基于二维空间中土壤铵态氮分异性研究，探讨 3D 经验贝叶斯克里金模型对土壤铵态氮含量三维空间分布特征的模拟，在水平方向及垂直方向的二维

三维可视化表达等方面进行深入研究，通过构建等值面直观显示尾矿库土壤铵态氮具体含量指标的三维空间精细化分布特征。有效使用二维三维空间插值将土壤信息数据进行可视化表达，为矿山土壤养分精准管理、资源可持续利用以及矿区生态可持续发展提供了理论支撑，具有重要理论研究价值和意义。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

研究区地处燕山隆起区南部，以迁安盆地和低山丘陵为主要地形地貌特征。整体温度偏高，日照偏多，降水偏少，如图 1 所示。研究区东-西长约 600 m，南-北宽约 340 m，总面积约 0.146 8 km²。随着开采的进行，矿山自然植被遭到了严重破坏，在政府主导下，对尾矿库进行了以植被复垦为主的矿山生态修复。本文以迁安市某尾矿库为例，探究土壤铵态氮空间分异性，并实现二维三维可视化表达，为尾矿库土壤质量恢复、植树造林修复工作提供数据支撑，对矿山生态修复具有重要理论研究价值和意义。

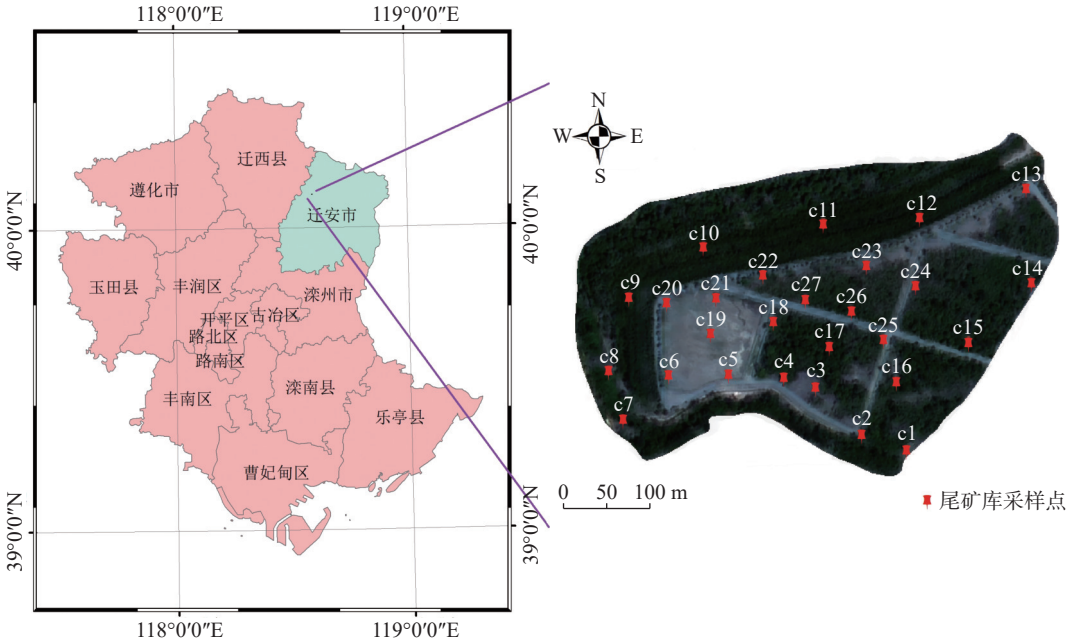

图 1　尾矿库范围及采样点布设位置

Fig. 1　Range of tailings pond and location of sampling points

1.2　数据采集

根据耕地深度、植树造林、土地复垦的土壤深度需求，在研究尾矿库土壤铵态氮空间分异特征时，采集 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 深度土壤化验分析，土壤采集与化验分析严格按照《第三次全国土壤普查外业调查与采样技术规范》和《土壤检测》(NY/T 1121)的要求进行。

以预设样点周边的地形地势的空间变化程度为依据，按照随机取样、均匀分布的原则，在研究区三层土壤中各采集点样 27 个，共取点样 81 个。采样过程中运用 GPS 对采样点进行定位并记录符合土壤采样要求的现场采样点空间位置坐标，实际采样点分布如图 1 所示。采用五点取样法[14]获取土壤样品，将每一个采样点的每一层的土壤分别装入已标号的自封袋中，带回实验室自然风干。

1.3　数据化验分析

对实地采样的 81 份土壤样品经氯化钾(KCl)溶液提取后采用连续流动分析仪测定土壤铵态氮含量[15]，土壤铵态氮含量检测结果如图 2 所示，研究区内不同空间位置的土壤铵态氮含量差异明显。

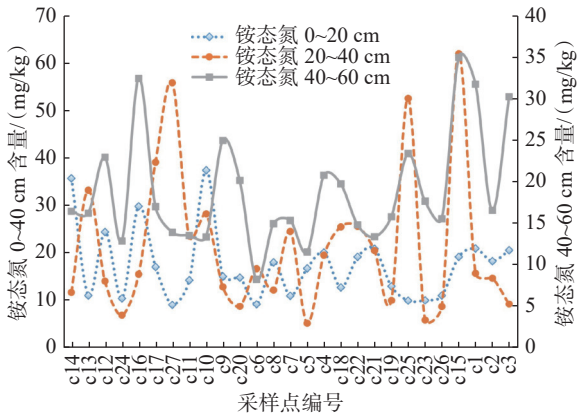

图 2　土壤铵态氮含量

Fig. 2　Content of ammonium nitrogen in soil

2 研究方法

2.1 空间自相关分析

空间自相关分析是一种空间统计方法，用来研究相邻位置属性之间的相关性，分为全局空间自相关和局部空间自相关[16-18]，针对尾矿库土壤铵态氮属性，对研究区内某一采样点与其周围采样点间进行的空间自相关程度计算，可以衡量尾矿库土壤铵态氮空间集聚程度和关联度等分布特性，揭示研究区土壤铵态氮含量的整体空间特征和局部分异。

2.2 标准差椭圆

Lefever 于 1926 年首次提出了标准差椭圆（Standard Deviational Ellipse, SDE），是一种对点数据分布的主方向和离散度进行定量表达的方法[19-20]，可以定量表达尾矿库土壤铵态氮含量空间分布特征及发展趋势。尾矿库土壤中铵态氮的空间变化趋势随椭圆长轴的增大而增强；短轴越长说明土壤铵态氮的空间离散性越强；椭圆面积越小，反映出尾矿库土壤铵态氮含量空间聚集程度越大[21-22]，计算见式(1)～式(4)。

$$M(\bar{X},\bar{Y})=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}w_ix_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i},\frac{\sum_{i=1}^{n}w_iy_i}{\sum_{i=1}^{n}w_i}\right] \tag{1}$$

$$\tan\theta=\frac{(\sum_{i=1}^{n}w_i^2\bar{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}w_i^2\bar{y}_i^2)+\sqrt{(\sum_{i=1}^{n}w_i^2\bar{x}_i^2-\sum_{i=1}^{n}w_i^2\bar{y}_i^2)^2+4\sum_{i=1}^{n}w_i^2\bar{x}_i^2\bar{y}_i^2}}{2\sum_{i=1}^{n}w_i^2\bar{x}_i\bar{y}_i} \tag{2}$$

$$\sigma_x=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i\bar{x}_i\cos\theta-w_i\bar{y}_i\sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n}w_i^2}} \tag{3}$$

$$\sigma_y=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i\bar{x}_i\sin\theta-w_i\bar{y}_i\cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^{n}w_i^2}} \tag{4}$$

式中：(x_i,y_i)为土壤铵态氮的地理位置坐标；$M(\bar{X},\bar{Y})$为铵态氮分布的质心坐标；w_i为权重；θ为椭圆方位角；σ_x、σ_y分别为沿 x 轴和 y 轴的标准差。

2.3 克里金插值法

克里金插值也叫空间自协方差最优内插，是一种以变异函数和结构分析为基础，对一个特定范围内的变量进行无偏最优估计方法[23]。利用克里金插值，可以将尾矿库土壤铵态氮含量在二维空间上直观显示，计算见式(5)。

$$Z(x)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_iZ(x_i) \tag{5}$$

式中：$Z(x)$为待估位置 x 处土壤属性估计值；$Z(x_i)$为已知位置x_i实测土壤属性值；λ_i为权重系数，且满足$\sum_{i=1}^{n}\lambda_i=1$；$n$ 为样点个数。

3D 经验贝叶斯克里金（3D Empirical Bayesian Kriging, 3D EBK）是一种利用 Kriging 原理和贝叶斯统计方法进行的地统计插值的方法，用来估算三维空间中某一位置的未知值[24]。以三维采样点为研究对象，通过建立水平、垂直两个方向的方差函数，自动计算插值模型参数，采用观测点的加权平均法，对要估算的采样点进行插值，对三维空间预测结果更可靠[25]，并最终构建体元栅格，模拟分析尾矿库土壤铵态氮含量三维空间分布趋势。

体元栅格是二维栅格的扩展[26]，在二维栅格中，通过二维点进行插值分析，获得相应的栅格数据，并将其着色，能够更清晰地反应数据峰值的高低分布情况，而这个过程在三维栅格中生成的就是体元栅格；体元栅格是具有三维空间坐标的立方体，由三维行、列、深度组成可以很好地表达尾矿库土壤铵态氮空间三维场景。

3 研究结果

3.1 研究区土壤铵态氮空间自相关性分析

3.1.1 研究区土壤铵态氮全局空间相关性分析

利用 GeoDa 软件的单变量莫兰指数（Moran's I）工具，对尾矿库 27 个采样点的三层土壤铵态氮含量数据进行全局空间自相关性分析，得出土壤铵态氮 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 的全局 Moran's I，见表 1。由表 1 可知，研究区内三层土壤铵态氮 Moran's I 均大于 0，这表明尾矿库土壤铵态氮含量存在显著的空间正向关联性和空间集聚性，各层土壤铵态氮含量会受到邻近土壤点的影响，空间上距离越相近，其含量越接近；按照相关性大小依次排序为铵态氮 40～60 cm>20～40 cm>0～20 cm，表明随着

表 1 土壤铵态氮全局莫兰指数值

Table 1 Global Moran's I value of ammonium nitrogen in soil

元素	Moran's I
铵态氮 0～20 cm	0.269
铵态氮 20～40 cm	0.283
铵态氮 40～60 cm	0.461

土壤深度的增加，研究区土壤铵态氮含量的空间聚类特征越明显。

3.1.2　研究区土壤铵态氮局部空间相关性分析

为了更精确地反应各个点之间存在的空间位置关系，利用 ArcGIS 软件中聚类和异常值分析工具，对三层土壤铵态氮含量分别展开局部空间集聚分析，对尾矿库土壤铵态氮局部空间分布的特征进行深入研究，得到研究区土壤铵态氮含量 LISA 聚类图，可以更加准确地了解尾矿库土壤铵态氮各层级的空间分布特征和聚集模式，如图 3 所示。

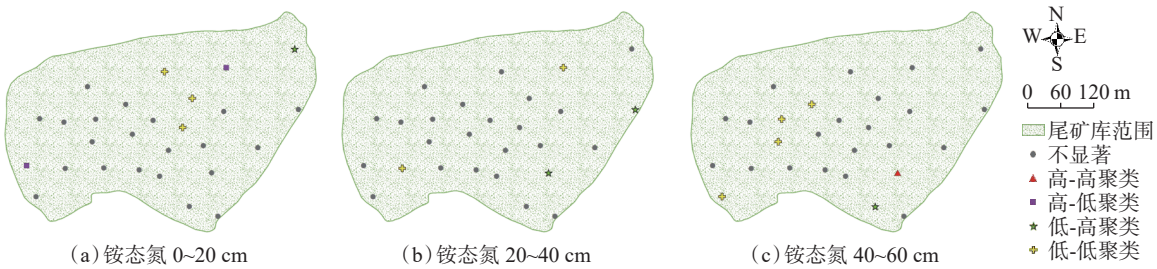

图 3　土壤铵态氮 LISA 聚类图

Fig. 3　LISA clustering diagram of ammonium nitrogen in soil

由图 3 可知，0～20 cm 土壤铵态氮含量高-低聚类点位于研究区的最西部和东北部，这两处位置数据值比较高，但是周围相邻区域的数据值却较低，呈现出高度聚集但离散的特点；低-高聚类点位于研究区的东北角，呈现出低水平、高聚集分散状态；低-低聚类点位于研究区的中部偏北区域，形成低值聚集区域；未出现高值聚集区域。20～40 cm 土壤铵态氮低-低聚类点位于研究区的西南区域和东北区域，形成低水平、低聚集区域；低-高聚类点位于研究区的东部区域和东南部区域，样点数据值较低，但周围相邻区域的数据值较高；未出现高值聚集区域以及高-低聚类离散区域。40～60 cm 土壤铵态氮高-高聚类点位于研究区东南部，样点数据值与周围相邻区域内的数据值都比较高，形成了高值聚集区域；低-低聚类点位于研究区西南区域；低-高聚类点位于研究区的西部区域；未出现高水平、低聚集离散区域。尾矿库三层土壤铵态氮采样点多为无显著聚集特征点，只有部分点位存在空间聚集特征，说明研究区内大部分采样点土壤铵态氮含量较为平均，与相邻区域没有较大差异。

因此，利用空间自相关分析中的全局 Moran's I 分析，土壤铵态氮含量在尾矿库空间范围内整体存在显著的正向关联性和集聚特性；再通过空间自相关分析中的聚类和异常值分析，对尾矿库土壤铵态氮局部空间分布的特征进行深入研究，发现每一层样点只有部分点位存在空间聚集特征，0～20 cm、20～40 cm 均未出现高值聚集区域，40～60 cm 土壤铵态氮在研究区的东南部形成了高值聚集区域。

3.2　研究区土壤铵态氮空间变化趋势

借助标准差椭圆模型进一步分析土壤铵态氮整体空间分布特征，研究结果见表 2 和图 4。

由表 2 可知，20～60 cm 土壤铵态氮椭圆面积相较于 0～20 cm 土壤有所减少，表明随着土壤深度增加，铵态氮含量的空间分布聚集性程度逐渐增强；尾矿库三层土壤铵态氮椭圆长短半轴之差从大到小依次是首层土、中层土、底层土，说明土层越深，铵态氮含量西南-东北变化的方向性越明显；从首层土椭圆方位角的 84.489°相对于中层土的 79.840°以及底层土的 84.068°来看，土壤铵态氮变化还具有向正西南-正东北进一步偏移的趋势；除此之外，土壤深度增加

表 2　各层土壤铵态氮含量标准差椭圆参数

Table 2　Parameters of standard deviation ellipse of content of ammonium nitrogen in each soil layer

指标	铵态氮 0～20 cm	铵态氮 20～40 cm	铵态氮 40～60 cm
中心点 X 坐标	118°35′27.8″	118°35′28.3″	118°35′28.1″
中心点 Y 坐标	40°6′36.7″	40°6′36.8″	40°6′36.8″
方位角/(°)	84.489	79.840	84.068
椭圆面积/km²	0.066 314	0.058 336	0.062 970
长半轴/m	197.2	188.5	189.2
短半轴/m	107.0	98.5	105.9
长短半轴之差/m	90.2	90.0	83.3

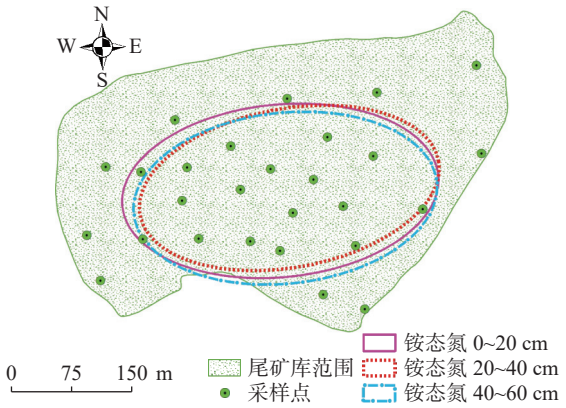

图 4 各层土壤铵态氮含量标准差椭圆

Fig. 4 Standard deviation ellipse of content of ammonium nitrogen in each soil layer

标准差椭圆长半轴、短半轴长度也都呈现不同幅度减小，说明土壤铵态氮变化范围有所缩减，分布格局具有聚集性增强的特点。由图 4 可知，从尾矿库土壤铵态氮空间分布改变方向看，尾矿库 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤铵态氮空间分布存在差异，呈现聚集性分布模式；三层土壤铵态氮椭圆长轴方向基本保持一致，表明研究区内铵态氮含量变化主要发生在西南-东北方向。

3.3 尾矿库土壤铵态氮空间分异性可视化表达

土壤信息二维三维可视化是数字土壤建设的主要内容之一，是对土壤地理环境的真实模拟，研究尾矿库土壤铵态氮可视化表达技术能直观显示土壤铵态氮二维三维空间分布特征，可以为数字土壤建设提供理论支撑，为区域土地复垦、地理空间规划等领域提供辅助决策依据。

3.3.1 土壤铵态氮二维空间分布可视化表达

利用 ArcGIS 软件，对尾矿库 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤铵态氮含量进行克里金插值，并利用标准差拉伸显示，得到铵态氮空间分布二维可视化结果，如图 5 所示。由图 5 可知，研究区 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤铵态氮含量均呈现明显的空间分布差异，呈带状分布形式，各层土壤铵态氮在研究区的东南部含量均相对较高。

研究区 0～20 cm 土壤铵态氮含量在 5.02～38.07 mg/kg 范围内变化，在西南-东北轴线方向的含量较低；在研究区的西北部、北部以及东南部的含量相对较高；整体含量呈现由中心向外围区域逐渐升高的趋势，具有良好的连续性。研究区 20～40 cm 土壤铵态氮含量在 12.11～37.86 mg/kg 范围内变化，土壤铵态氮含量高值区位于研究区的东南部大面积区域；低值区主要分布在研究区西南方向以及东北方向的少部分区域；整体含量呈现自西向东逐渐增加

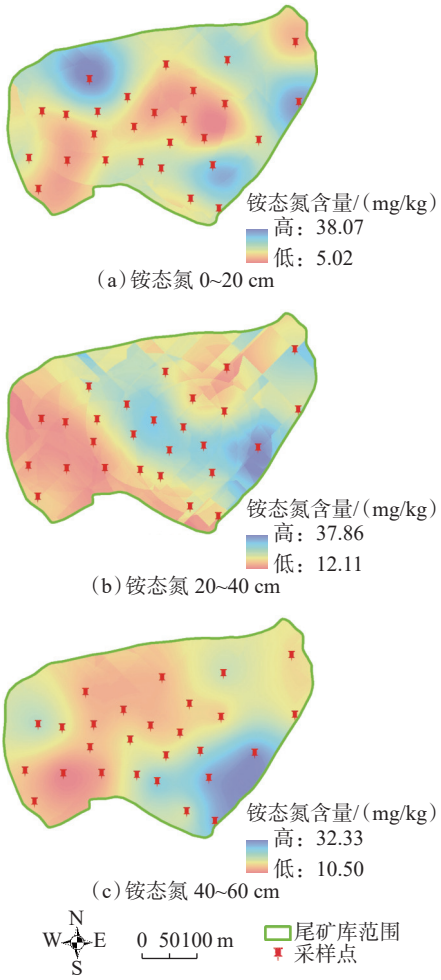

图 5 土壤铵态氮含量二维空间分布特征

Fig. 5 2D spatial distribution characteristics of content of ammonium nitrogen in soil

的空间变化趋势。研究区 40～60 cm 土壤铵态氮含量除西北角位置为次高值区域外，整体呈现出较为明显的由北向南条带状递增的分布规律，含量在 10.50～32.33 mg/kg 范围内变化；高值区集中在研究区的南偏东部分。

3.3.2 土壤铵态氮空间分布二维三维一体化

3D EBK 是 2D 空间插值在 3D 空间中的拓展，将土壤铵态氮含量值由体元栅格进行存储表达[26]，可以很好地表达土壤铵态氮空间三维场景。

尾矿库土壤铵态氮含量 3D EBK 插值结果如图 6 所示。由图 6 可知，土壤铵态氮含量的三维空间分布情况，其中，西南部低值区土壤铵态氮不同土壤深度的含量无明显变化差异；高值区分布在研究区的东南局部区域，其上下土壤铵态氮含量也无明显差异；整体来看，研究区内铵态氮含量水平、垂直空间分布差异显著，空间变化趋势与二维插值结果吻合。

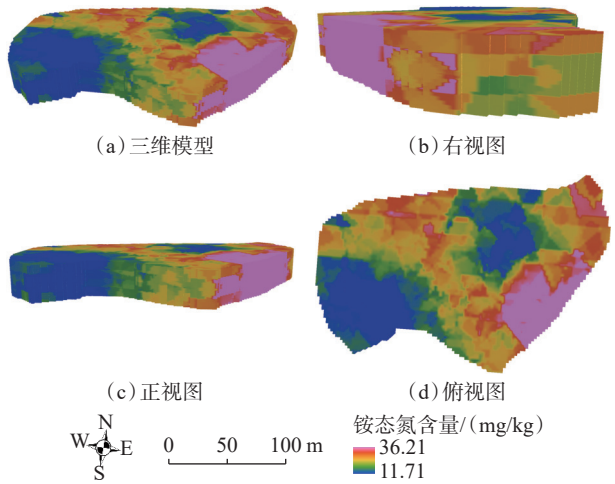

图 6　土壤铵态氮含量三维可视化

Fig. 6　3D visualization of content of ammonium nitrogen in soil

为研究排土场和尾矿库内部土壤铵态氮的空间分布情况，可以对研究区体元栅格进行任意剖切处理。其中，按区域中心位置，以东-西、南-北以及水平 3 种典型位置对土壤铵态氮进行剖切，结果如图 7 所示。在东-西剖面上，土壤铵态氮含量呈现自西向东递增的连续分布趋势，不同土层深度铵态氮含量差异较小；在南-北剖面上，土壤铵态氮含量空间分布差异显著，没有明显的分布趋势；尾矿库地下 30 cm 土壤铵态氮含量整体表现为自西向东递增的空间分布特征，变化趋势与二维 20～40 cm 土壤铵态氮插值结果吻合。

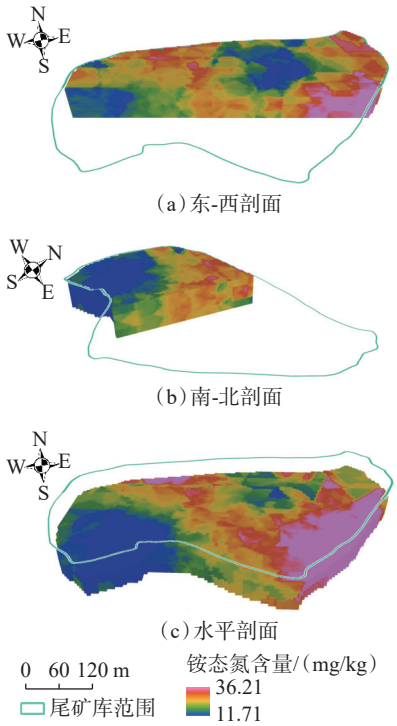

图 7　土壤铵态氮含量三维剖切显示

Fig. 7　3D profile of content of ammonium nitrogen in soil

根据研究区土壤铵态氮含量的二维三维空间分布特征，对铵态氮在垂直方向上的分布情况利用切片建模的方式进行局部细致剖析，以弥补三维模型在区域内部精细化表达方面的不足。图 8 中 *N* 切片、*M′* 切片、*S* 切片贯穿研究区东西方向，*W* 切片、*M* 切片、*E* 切片贯穿研究区南北方向。

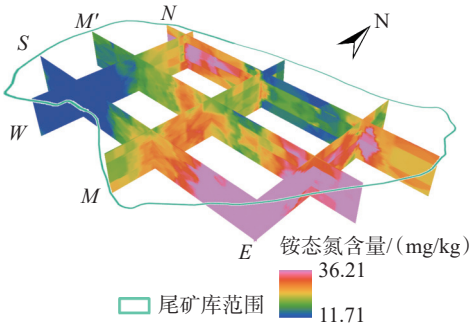

图 8　土壤铵态氮含量不同方向切片显示

Fig. 8　Sections in different directions of content of ammonium nitrogen in soil

由图 8 可知，土壤铵态氮含量在不同土壤深度上显现出不同的空间连续性，整体均表现出表层含量高的区域，其下层含量也普遍较高的趋势，个别位置的下层铵态氮含量超过上层含量，说明土壤铵态氮含量在研究区中的分布受不同土壤深度特征的影响较弱。东西方向切片显示土壤铵态氮含量在研究区垂直方向变化不明显，水平方向上显示研究区南半部分自西向东土壤铵态氮含量逐渐增加，北半部分呈现两端高中间低的分布趋势。南北方向切片显示土壤铵态氮含量在研究区西部整体自南向北递增，在东部自南向北递减。

为直观显示土壤铵态氮不同含量指标的三维空间精细化分布特征，利用尾矿库土壤铵态氮体元栅格构建等值面模型。根据 1.3 节化验的土壤铵态氮 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 数据计算得到三层土壤铵态氮含量均值为 19.206 3 mg/kg，以均值为参照值，等间隔选取 4 个含量作为等值面构建指标，分别为 15.206 3 mg/kg、19.206 3 mg/kg、23.206 3 mg/kg、27.206 3 mg/kg，如图 9 所示。由图 9 可知，尾矿库土壤铵态氮平均值 19.206 3 mg/kg 空间分布区域广泛，集中分布在研究区的西北-东南轴线以北地区；铵态氮低值 15.206 3 mg/kg 主要分布在研究区的西南部和北部的小部分区域；铵态氮 23.206 3 mg/kg 的空间分布大致以研究区西北-东南分界线的上部区域；铵态氮高值 27.206 3 mg/kg 主要存在于研究区的东南角位置上。所选 4 个建模含量参数在尾矿库中聚类特征明显，整体呈现分段式空间分布特征，相同区域位置

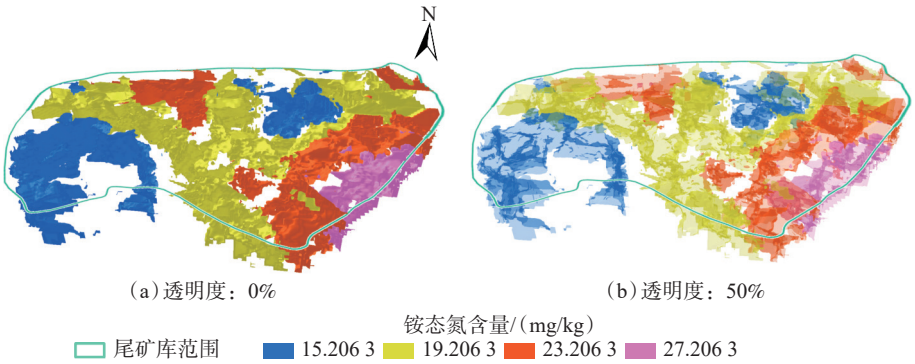

图 9 土壤铵态氮含量等值体显示

Fig. 9 Equivalents display of content of ammonium nitrogen in soil

上，土壤铵态氮受土壤深度的影响较弱，与上文土壤铵态氮切片建模分析结论相吻合。

4 结 论

1)由空间自相关性分析和标准差椭圆分析可知，尾矿库土壤铵态氮含量存在显著的空间正向关联性和空间集聚性，且随着土壤深度增加，研究区土壤铵态氮含量的空间分布聚集性程度逐渐增强，铵态氮含量“西南-东北”变化的方向性越明显。

2)研究区 0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm 三层土壤铵态氮含量二维插值结果均呈现明显的空间分布差异，各层土壤铵态氮在研究区的东南部含量均相对较高。

3)三维插值模型说明尾矿库土壤铵态氮含量在水平方向、垂直方向空间分布均有显著差异性；三维模型剖切得出，地下 30 cm 土壤铵态氮含量整体表现为自西向东递增的空间分布特征，变化趋势与二维 20～40 cm 土壤铵态氮插值结果吻合；等值面的构建直观显示尾矿库土壤铵态氮具体含量指标的三维空间精细化分布特征，15.206 3 mg/kg、19.206 3 mg/kg、23.206 3 mg/kg、27.206 3 mg/kg 土壤铵态氮在尾矿库中聚类特征明显，整体呈现分段式空间分布特征，相同区域位置上，土壤铵态氮受土壤深度变化的影响较弱，与三维模型切片分析结论吻合。

参考文献(References)：

[1] 李剑锋，冯李霄，陈希清，等. 大义山东南部土壤重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境工程技术学报，2023，13(1)：287-294.
LI Jianfeng, FENG Lixiao, CHEN Xiqing, et al. Heavy metal distribution characteristics of soils in southeastern Dayi Mountain and its risk evaluation[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 287-294.

[2] 高琴，党晓宏，蒙仲举，等. 风沙区采煤沉陷裂缝对不同坡位土壤养分的影响[J]. 金属矿山，2023(9)：223-230.
GAO Qin, DANG Xiaohong, MENG Zhongju, et al. Effect of coal mining subsidence cracks on soil nutrients at different slope positions in windy desert area[J]. Metal Mine, 2023(9): 223-230.

[3] JIN W, WEI Z Y, LIU X Z, et al. Effects of constructing farmland with large amounts of iron tailings as soil reconstruction materials on soil properties and crop growth[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 20205.

[4] SAIBAL G, SONALI B, ABHISHEK M, et al. Appraise potassium chemistry and distribution patterns in tailing soil, India: through quantity-intensity relations and multi model statistical methods[J]. Chemosphere, 2023, 335: 1-12.

[5] SAIBAL G, SONALI B, JYOTI P, et al. Pollution and health risk assessment of mine tailings contaminated soils in India from toxic elements with statistical approaches[J]. Chemosphere, 2023, 324: 1-12.

[6] 李英钧，宋泽峰，杨悦锁，等. 石棉尾矿场地土壤污染地球化学特征及其对微生物多样性的影响[J/OL]. 吉林大学学报(地球科学版)：1-14[2024-01-08]. https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220312.
LI Yingjun, SONG Zefeng, YANG Yuesuo, et al. Geochemical characteristics of soil pollution in asbestos tailings site and its impact on microbial diversity[J/OL]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition): 1-14[2024-01-08]. https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220312.

[7] 刘军，杨光，丁霞，等. 林区铁矿尾矿库对周边土壤理化性质的影响[J]. 北方园艺，2022(10)：76-81.
LIU Jun, YANG Guang, DING Xia, et al. Effects of tailings reservoir on surrounding soil physical and chemical properties in Forest Area Iron Mine[J]. Northern Horticulture, 2022(10): 76-81.

[8] LIU Z P, SHAO M A, WANG Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau Region of China[J]. Geoderma, 2013, 197/198: 67-78.

[9] 陈展. 化工搬迁场地地下水中氯苯三维空间分布特征[J]. 长江流域资源与环境，2020，29(2)：468-478.
CHEN Zhan. Three-dimensional spatial distribution characteristics of chlorobenzene in groundwater of a chemical relocation site[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(2): 468-478.

[10] 赵纪堂，赵卫东，童希波，等. 基于三维空间插值的真三维地下水水化学场构建[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版)，2018，41(1)：113-118.
ZHAO Jitang, ZHAO Weidong, TONG Xibo, et al. Construction of real 3D groundwater chemical field based on 3D spatial

interpolation[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2018, 41(1): 113-118.

[11] 韩霁昌, 李晓明, 孙剑虹, 等. 卤泊滩典型田块土壤盐分三维空间分布研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 847-854.
HAN Jichang, LI Xiaoming, SUN Jianhong, et al. Research on three dimensional spatial distribution of soil salinity in a typical field of Lubotan Area[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 847-854.

[12] 刘庚, 毕如田, 权腾, 等. 某焦化场地土壤中多环芳烃分布的三维空间插值研究[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2876-2883.
LIU Geng, BI Rutian, QUAN Teng, et al. 3D interpolation of soil PAHs distribution in a coking contaminated site of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2876-2883.

[13] ZHANG Y, JI W, SAURETTE D D, et al. Three-dimensional digital soil mapping of multiple soil properties at a field-scale using regression kriging[J]. Geoderma, 2020, 366: 114253.

[14] 余高, 陈芬, 张晓东, 等. 锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4416-4428.
YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiaodong, et al. Pollution characteristics, source analysis, and risk assessment of heavy metals in the surrounding farmlands of manganese mining area[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4416-4428.

[15] 刘朝红, 周晓兵, 陆永兴, 等. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮对土壤氮库垂直分布特征的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 5005-5016.
LIU Chaohong, ZHOU Xiaobing, LU Yongxing, et al. Effects of biological soil crust on vertical distribution of soil nitrogen pool in the Gurbantunggut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 5005-5016.

[16] 唱彤, 郦建强, 郭旭宁, 等. 江汉平原水域空间格局时空演变特征及其驱动因素分析[J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 21-32.
CHANG Tong, LI Jianqiang, GUO Xuning, et al. The spatial-temporal characteristics and driving forces analysis of water area landscape pattern changes on the Jianghan Plain[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(1): 21-32.

[17] 耿治鹏, 宋颉, 王春林, 等. 污染场地土壤重金属污染空间特征分析: 以某搬迁电镀厂为例[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 295-302.
GENG Zhipeng, SONG Jie, WANG Chunlin, et al. Spatial characteristics of soil heavy metal pollution in polluted sites: taking a relocated electroplating factory as an example[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 295-302.

[18] 杨继梅, 郭春梅. 中国城市数字普惠金融的空间格局及其演变特征[J]. 统计与决策, 2022, 38(22): 130-135.
YANG Jimei, GUO Chunmei. Spatial pattern and evolution characteristics of China's urban digital inclusive finance[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(22): 130-135.

[19] 董立宽, 方斌, 王晨歌. 基于Copula函数的茶园土壤铜锌空间协同效应研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 867-878.
DONG Likuan, FANG Bin, WANG Chenge. Study on the spatial synergistic effect of copper and zinc in tea garden soil based on Copula Function[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 867-878.

[20] 刘竞宇, 张仕超, 熊熙, 等. 丘陵山区农民专业合作社时空扩展特征及驱动力分析: 以重庆市江津区为例[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 312-323, 332.
LIU Jingyu, ZHANG Shichao, XIONG Xi, et al. Spatialtemporal characteristics and driving forces of farmer professional cooperatives in hilly and mountainous areas: a case study of Jiangjin District, Chongqing City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 312-323, 332.

[21] 刘畅, 罗艳丽, 刘晨通, 等. 奎屯河下游区域地下水和农田土壤砷的空间分布特征[J]. 生态环境学报, 2022, 31(10): 2070-2078.
LIU Chang, LUO Yanli, LIU Chentong, et al. Spatial distribution characteristics of arsenic in groundwater and cropland soil in the lower reaches of Kuitun River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(10): 2070-2078.

[22] 郑滋椀, 姜超, 汪婕, 等. 常态化防疫背景下城市盗窃犯罪的时空演变及其机理研究: 以浙江海宁市为例[J]. 地理科学进展, 2023, 42(2): 341-352.
ZHENG Ziwan, JIANG Chao, WANG Jie, et al. Spatiotemporal evolution of urban theft crimes and mechanism in the context of regular COVID-19 pandemic prevention and control: a case study of Haining, Zhejiang[J]. Progress in Geography, 2023, 42(2): 341-352.

[23] 高家勇, 李瑞, 杨坪坪, 等. 贵州省土壤可蚀性K值空间分布特征及主要影响因子[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 77-84.
GAO Jiayong, LI Rui, YANG Pingping, et al. Spatial distribution characteristics and main influencing factors of soil erodibility K value in Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 77-84.

[24] LI Z Y, TAO H, ZHAO D, et al. Three-dimensional empirical Bayesian kriging for soil PAHs interpolation considering the vertical soil lithology[J]. Catena, 2022, 212: 106098.

[25] 陈海生, 金玮佳. 基于经验贝叶斯克里金的微尺度植烟田土壤有机质空间变异性[J]. 西南农业学报, 2020, 33(2): 363-368.
CHEN Haisheng, JIN Weijia. Study on spatial variability of soil organic matter in tobacco planting fields on micro sampling scale based on EBK[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(2): 363-368.

[26] 岳俊. 基于GIS的三维透明瓦斯地质软件开发与应用[J]. 中国矿业, 2022, 31(10): 95-100.
YUE Jun. Development and application of 3D transparent gas geology software based on GIS[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(10): 95-100.