

· 专论与综述 ·

# 土壤重金属污染空间插值及其验证方法研究综述

费坤<sup>1</sup>, 汪甜甜<sup>1</sup>, 邹文嵩<sup>2</sup>, 张天恩<sup>1</sup>, 高沪宁<sup>1</sup>, 胡宏祥<sup>1</sup>, 马友华<sup>1\*</sup>

- (1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036;  
2. 安徽省北斗精准农业信息工程实验室, 安徽农业大学信息与计算机学院, 安徽 合肥 230036)

**摘要:**综述了土壤重金属污染空间插值方法研究现状,分析了3类典型的插值方法(确定性插值方法、地统计学插值方法和组合插值方法),以及2种常用的精度验证方法(交叉验证法和独立的数据集验证法)各自的优缺点与适用范围,提出了加强组合插值模型优化与精度提升、利用计算机智能技术优化插值算法模型、开发针对土壤重金属领域的考虑空间插值软数据挖掘的新型模型等未来研究方向。

**关键词:** 重金属污染;空间插值方法;精度验证;土壤

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1006-2009(2022)02-0001-06

## Review on Spatial Interpolation and Its Verification Method of Heavy Metal Pollution in Soil

FEI Kun<sup>1</sup>, WANG Tian-tian<sup>1</sup>, ZOU Wen-song<sup>2</sup>, ZHANG Tian-en<sup>1</sup>, GAO Hu-ning<sup>1</sup>,  
HU Hong-xiang<sup>1</sup>, MA You-hua<sup>1\*</sup>

- (1. Anhui Province Key Lab of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 2. Anhui Provincial Engineering Laboratory for Beidou Precision Agriculture Information, School of Information & Computer, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China)

**Abstract:** This paper reviewed the research status of spatial interpolation methods for heavy metal pollution in soil, analyzed the advantages, disadvantages and application scope of three typical interpolation methods (deterministic interpolation method, geostatistical interpolation method and combined interpolation method) and two commonly used accuracy verification methods (cross validation method and independent data set validation method), put forward some future research directions, such as strengthening the optimization and accuracy improvement of combined interpolation model, using computer intelligent technology to optimize interpolation algorithm model, and developing a new model for mining spatial interpolation soft data in the field of soil heavy metals.

**Key words:** Heavy metal pollution; Spatial interpolation method; Accuracy verification; Soils

土壤重金属污染是土壤治理的关键研究问题,也是耕地质量等级评价的重要指标,与作物生长和产出质量安全息息相关<sup>[1-3]</sup>。目前,我国土壤重金属污染日趋严重,工业化与城市化的迅速发展带来各类废水的大量排放<sup>[4]</sup>,污水灌溉导致农产品质量问题进一步加剧<sup>[5]</sup>,农药、化肥的广泛施用也是土壤重金属污染的主要原因之一<sup>[6]</sup>。土壤调查与评价是土壤重金属污染修复的基础<sup>[7]</sup>。土壤中的重金属在垂直纵向与水平横向都会发生迁移,随着

时间逐渐积累或跟随生态系统循环进入人体和农产品,给环境质量及人类生命安全带来极大隐患<sup>[8]</sup>。

收稿日期:2021-05-31;修订日期:2022-01-15

基金项目:国家重点研发计划“长三角镉砷和面源污染农田综合防治与修复技术示范”基金资助项目(2018YFD0800200)

作者简介:费坤(1996—),男,安徽合肥人,硕士,研究方向为农田重金属污染。

\*通信作者:马友华 E-mail: yhma2020@qq.com

以地理信息科学(GIS)为基础的空间插值技术是研究重金属在土壤中空间分布的常用方法,其原理是利用已知样本的数据预测未知样本的数据<sup>[9]</sup>。运用空间插值方法可以由部分已知样本获取全局数据,传统的描述性空间插值方法可以用来分析土壤重金属的平面分布特征,而针对土壤复杂的环境,单一空间插值方法很难描述重金属空间变化规律及变异特征,一些组合式插值方法性能更优<sup>[10]</sup>。土壤重金属数据样本一般有限,交叉验证法虽然可以有效验证不同方法之间的精度差异,但不足以描述空间预测误差<sup>[11]</sup>,独立的数据集验证法在对空间变异性及不稳定性有很好估计结果的同时又极大增加了成本<sup>[12]</sup>。选取合适、精准、便捷的插值方法对土壤重金属污染空间分布研究尤为重要<sup>[13]</sup>。今对土壤重金属空间插值方法进行综述,总结其优缺点及最佳适用情形,以期对土壤重金属空间分布特征及预测研究提供参考。

## 1 空间插值方法研究现状

空间插值技术来源于空间信息科学,国内外较为典型的方法大致分为3大类<sup>[14-18]</sup>:①确定性插值方法,主要有反距离权重法(IDW)、径向基函数法(RBF)、趋势面法(Trend)等;②地统计学插值方法,主要有克里金插值法(Kriging),其又包括普通克里金法(OK)、泛克里金法(UK)、指示克里金法(IK)等;③组合插值方法,主要有回归克里金法(WRK)、地理加权回归克里金法(GWRK)等。

国内有学者使用OK、IDW、RBF等方法预测了一定气候条件下的大气降水量及PM<sub>2.5</sub>含量,交叉验证结果证明OK法的性能最优<sup>[19-20]</sup>。还有学者使用Kriging插值法调查区域内土壤重金属含量,结果表明在一定试验前提下,该方法可以获得较为精准的土壤重金属空间信息<sup>[21-22]</sup>。帅方敏等<sup>[23]</sup>利用Kriging插值和IDW法评价长湖水质,发现两种方法精度均较高,前者优于后者。OK、IDW法用于区域内降水量总体分析的研究结果表明,IDW法的精度优于OK法<sup>[24-25]</sup>。陈琳等<sup>[26]</sup>利用OK、逐步回归克里金(SWRK)、GWRK法对耕层有机质进行空间预测,结果表明GWRK法精度最高,且能揭示空间变化的诸多细节。

国外关于土壤重金属插值方法的研究起步更早,发展时间更长。Neelam等<sup>[27]</sup>使用OK、局部多项式插值(LPI)、RBF等方法对土壤有机碳空间分

布进行模拟,结果显示OK法更精准。在传统插值方法基础上,Bhunia等<sup>[28]</sup>引入对数正态克里金以生成氮素的空间分布,结果显示其精度很高。

## 2 确定性插值方法

### 2.1 IDW法

IDW法基于相似相近原理,认为距离越近影响程度越大,根据点的远近程度赋予相关权重进行加权平均。作者利用ArcGIS 10.6.1版本,运行Spatial Analyst模块中的Inverse Distance Weighted工具,对淮南市454个土壤样点重金属镉、铬的污染空间分布进行预测,运用Matlab和Excel进行数据变化及趋势分析。研究发现,选择更大的幂值虽然会强调最近点,但同时邻近数据的增强也无差,且函数会变得不平滑,精度变得不可靠。很多学者在使用IDW插值的过程中也遇到类似或者其他问题。陈思萱等<sup>[13]</sup>根据最小误差原则对IDW的函数参数进行优化,发现对原参数优化后提升的插值精度微乎其微。颜金彪等<sup>[29]</sup>在IDW基础上提出了一种顾及空间各向异性的多参数协同优化IDW插值法(PIDW),经过验证,该方法能显著提高各向异性环境中的插值精度。

IDW法的优缺点十分明显,其计算结果过度依赖于样点之间的差值大小及参数选择<sup>[30]</sup>,适合研究区域足够大、样点足够多且密集的情况,普遍适用于大气、水体等领域的研究,在局部变异性描述方面具有很大优势,对土壤重金属污染区域识别及判定的精度较高。然而,该方法对点位数值预测存在明显不足,无法描述空间变异特征,且对权重参数极其敏感<sup>[31]</sup>。

### 2.2 RBF法

相比于IDW法仅对平面数据进行拟合,RBF法兼顾了平面与空间因素。RBF函数需要通过每个样点,且保证函数平滑、总曲率最小,通过函数求解得到研究区任意一点的数值<sup>[32]</sup>。崔邢涛等<sup>[33]</sup>利用RBF、OK等方法模拟局部区域背景下的土壤重金属含量及空间分布,结果显示几种插值方法的误差接近,RBF法会重点考虑极值信息,数据利用更详尽。

RBF法也在不断改进和发展。张强等<sup>[34]</sup>基于遗传学算法得到一种求解全局优化问题的混合算法,经过验证简化了求解方法,提升了插值精度。齐静<sup>[35]</sup>提出了一种新的重启动策略,很好地优化

了径向基函数多次迭代没有进展的问题。针对径向基函数插值速度缓慢等问题,宋立新等<sup>[36]</sup>在研究中给出了二维经验模态分解(BEMD)的实现方法,对研究区分块进行 BEMD,避免了极值的产生,计算量也大幅减少。

### 2.3 Trend 法

所有的随机地理现象都可以用一种平滑曲面来描述其趋势及变化规律。Trend 法用有限的数据拟合内插,即用现有土壤重金属数据拟合出一个平滑的数学曲面模型,并且具有空间属性及平面变化趋势,也可称之为全局多项式插值法(GPI)。该方法可以在有限的范围内不受未知点数量的影响,只需要根据有限的已知点即可计算出未知点数据。然而,趋势面函数基本平滑,无法完全通过每个原始土壤样点,只有将函数幂次数升高才能使拟合更加精准,并且对极值的存在无法把控,容易造成较大误差。

作者选用 2019 年淮南市耕地质量监测土壤样点有机质数据,经过提出异常值、最优参数选择等数据处理过程,利用 ArcGIS 10.6.1 版本,运行 Geostatistical Analyst 模块中的 Trend Analysis 工具进行试验模拟分析。研究显示,预测结果的分布特征大体符合淮南市实际情况,而该市中部多连绵小山脉,在插值时未考虑地形、地貌、土壤质地等因素,导致局部存在明显差异,精度验证  $R^2$  仅为 0.33,且无法通过后处理加以改善。

## 3 地统计学插值方法

确定性插值方法基本上都是平面插值,很少考虑纵向尺度的变异特征,而地统计学插值方法则重点考虑纵向分布问题,其代表方法 Kriging 法是一种统计理论基础上的无偏最优内插方法<sup>[37]</sup>。Kriging 插值的权重确定尤为重要,确定权重的变异函数有着众多类别<sup>[38]</sup>。Kriging 法从地统计学的角度揭示空间变异自相关性,重点考虑要素之间的空间位置关系,对于样本点较少的情况预测有着独到优势,而对大范围区域的空间插值则显得相对不足<sup>[39]</sup>。

### 3.1 OK 法

当区域化变量满足二阶多项式平稳,期望值为常数而未知时,即为 OK 法。与简单克里金法(SK)相比,OK 法相当于在每一个位置重新计算期望值。SK 法的精度取决于期望值的大小,而 OK

法则不需要确定期望值大小,并且可以得出方差来表示估算精度,目前应用十分广泛<sup>[40]</sup>。有学者认为,OK 法的使用需要满足二阶平稳的假设,在现实中往往无法实现,即存在偏移现象,特别是当研究不连续区域的边缘化问题时,使用 OK 法进行空间分布预测存在极大误差。

作者使用 ArcGIS 10.6.1 版本自带的 OK 插值工具,对淮南市 454 个土壤样点汞元素的分布进行预测,选取淮南市中部、寿县、毛集和八公山等县区交界山脉绵延处 10% 点位,以及南部平原地带 10% 点位共计 91 个点位的的数据做精度验证。研究发现,在平原中部及丘陵地带,OK 法的精度较 IDW 法提升了接近 15%, $R^2$  达到 0.64;OK 法对于山脉绵延处的含量预测有明显不足,其原因可能是该方法的平滑模型忽略了山脉连绵处的断层现象,且此部分区域数值跳跃性偏大,平滑模型难以适应。

针对 OK 法边缘化插值精度较低的问题,有学者提出将其与其他插值方法结合使用。李晓军等<sup>[41]</sup>在对于不连续地层厚度的估计中,将 OK 法与 IK 法相结合,先用 IK 法估计地层分布的趋势及范围覆盖,再用 OK 法估计分布范围内的地层厚度,经过交叉验证,在地层边缘化区域能明显改善预测精度。抛开不连续区域边缘化问题,OK 法可以满足大多数情况下的插值需要,相较于传统确定性插值方法往往会取得更为精确的结果。

### 3.2 UK 法

在实际插值应用中,若认为空间插值预测的区域是非平稳、断续、存在漂移的,满足不了二阶平稳的假设,则 SK 法和 OK 法都无法使用,UK 法较为适合。在 UK 插值原理中,期望值即漂移,在插值过程中考虑了漂移情况,多用于非平稳、存在漂移的研究情况,极大提升了对于类似土壤、磁场等场合插值的严密性,较适用于土壤重金属插值<sup>[42]</sup>。然而,对于漂移形式及残差变异函数参数的估计较为困难,且当研究区域点位数据量较大时,搜索待插点领域内的数据点会十分费时,这些都是 UK 法在实际应用中存在的局限。

牛文杰等<sup>[43]</sup>提出使用多元逐步回归法替代趋势面拟合确定漂移次数,采用矩法和最大似然法相结合估计残余变异函数参数。若区域内数据点个数比较多,则在三角网格剖分过程中一次确定三角形与其内数据点的包含关系,提高了待插点邻域内

数据点的检索效率,解决了UK法的局限性问题。UK法在出现局部漂移情况的研究中具有很大优势,插值结果往往更接近实际,而当数据量增大时,UK插值的计算量随之上升,点位搜索会耗费大量时间。因此,将UK法与其他空间插值方法结合使用将是今后的应用趋势。

### 3.3 IK法

常用的Kriging插值方法大多会给出较为平滑的插值结果,而在土壤地层等研究区域,地形边缘的局部差异十分明显,常用的Kriging插值结果显然与实际情况相差较大<sup>[41]</sup>。当存在极值时,往往需要在数据处理阶段进行标志或者剔除,在一定程度上改变了数据实际情况。为了解决上述问题,有学者在Kriging插值研究的基础上引入了阈值,根据阈值将所有数据转换为编码1或者0,将对区域化变量的研究转变为对其指示函数的研究,即IK法<sup>[41]</sup>。

IK法作为一种非参数化插值方法,在处理极大值与极小值的预测分布方面具有明显优势,且应用贝叶斯理论后,可以更好地结合插值区域的各种信息增加插值精度,灵活度更高。然而,IK法仍然是局部估计方法,虽然保障了数据局部估计最优,但不能做到数据整体最优。

## 4 组合插值方法

### 4.1 WRK法

WRK是将多元线性回归模型与Kriging插值结合起来的方法,其优点是同时引进多个辅助环境因子作为变量整合模型,且充分考虑了土壤重金属所在环境的空间变异性、结构性和随机性,插值结果一般较为精确<sup>[26,44]</sup>。王雪珊等<sup>[45]</sup>提取黑土区小流域土壤的高程、曲率、坡度等辅助变量,预测了土壤速效磷的空间分布特征。Zhang等<sup>[46]</sup>利用WRK法,引入地形及土地利用等变量模拟了土壤有机质的空间分布特征。Hengl等<sup>[47]</sup>借助地理和环境因子,利用WRK法对土壤有机质含量及温度变化进行了空间插值。研究结果均显示,WRK法的插值精度大幅优于单一变量插值方法,比一般的Kriging插值法精度提升了3%~10%。然而,土壤环境的非平稳性使得WRK法不能准确反映土壤中元素属性空间变异的局部特征<sup>[48]</sup>。多数研究引入的辅助因子都是与土壤元素相关的环境因素,在现实生活中引入人为因子可以明显提升插值

精度<sup>[49]</sup>。

### 4.2 GWRK法

GWRK法是在地理加权回归模型(GWR)上发展起来,即将GWR与Kriging结合起来对环境研究要素进行空间分布及变异的模拟描述。王燕等<sup>[50]</sup>利用GWRK量化土壤有效磷与其他土壤因子的空间关系,对土壤有效磷的空间分布进行了预测。陈琳等<sup>[26]</sup>利用GWRK法与若干空间插值方法预测土壤有机质含量的空间分布,相比于普通单变量插值方法,引入了辅助变量因子的GWRK法平均均方根误差和均方根误差均降低接近50%,对土壤元素空间模拟的精度大幅提升。

## 5 土壤重金属空间插值的精度验证方法

### 5.1 交叉验证法

交叉验证法是一种常见的精度验证方法,一般将数据集分为训练集、验证集和测试集3个部分,利用训练集训练模型,验证集验证精度,测试集作为未知数据比对,再得出精度最高的模型。交叉验证法常用于比较不同土壤重金属空间插值方法的精度,也可用作同一种方法不同参数之间的精度验证,具有快速、直观的特点,且充分利用观测值,避免了因精度验证而减少插值样本,不受输入数据集的影响<sup>[11,13,51]</sup>。然而,交叉验证法在很多情况下不足以描述空间预测误差,且将数据集拆分后用于训练的数据样本大幅减少,准确性难以保证。Laslett等<sup>[52]</sup>对土壤水分空间分布的预测实验表明,使用交叉验证法验证精度导致比较结果出现错误。史文娇等<sup>[11]</sup>在使用Kriging插值法时发现,交叉验证法需要重复计算半方差函数,费时费力。

### 5.2 独立的数据集验证法

独立的数据集验证法主要包括3个步骤<sup>[11,52-53]</sup>:一是将数据集随机分成预测部分与验证部分;二是用预测数据与验证数据进行模拟;三是比对每个预测数据与验证数据的值。与交叉验证法相比,独立的数据集验证法在估计空间不确定性方面更为直接有效,而其需要额外获取验证数据样本集,导致成本增加。因此,验证方法的选取应当根据研究内容、实验设计、精度要求等因素共同决定。

## 6 展望

近年来,土壤重金属污染日趋严重,利用空间

插值技术可以深入了解土壤重金属元素分布的空间变异性及相关性、结构性和随机性,为土壤环境研究提供支持。OK、IDW 和 RBF 插值法虽然应用较为普遍,但插值精度不够理想。WRK、GWRK 等方法引入环境因子作为辅助因子建立模型,相比于单因子变量插值方法精度有所提升,而计算模型相对复杂,对数据的要求也偏高。空间插值方法在土壤重金属研究领域经过几十年的发展和完善,已经取得了一定成果并逐渐趋于成熟。然而,受研究区域样点密度、分布、实验设计、检测准确性等因素影响,现有方法仍然存在很多问题,未来的重点研究方向应聚焦在模型优化与精度提升上,通过分析研究区域及样本分布特征来选择合适的空间插值方法。

首先,不存在全能的空间插值方法,组合插值方法虽然精度比传统插值方法大幅提升,但计算模型相对复杂。未来可以加强组合插值模型优化与适应性调整,关注插值模型空间异相关性研究,引入主成分分析等方法进一步提升精度。其次,随着机器学习的不断发展,以支持向量机、BP 神经网络、随机森林等算法为基础构建插值模型,可以较好地模拟土壤重金属的空间分布。未来应当在计算机智能领域进一步探索,持续优化插值算法模型。最后,土壤空间分布的复杂性导致大多数插值方法无法完全适应,仅通过插值算法优化无法确保获得最优结果。未来随着地理信息、遥感等技术的不断发展,开发出针对土壤重金属领域的考虑空间插值软数据挖掘的新型模型具有重要意义。

#### [参考文献]

- [1] 赵其国,沈仁芳,滕应,等. 中国重金属污染区耕地轮作休耕制度试点进展、问题及对策建议[J]. 生态环境学报,2017,26(12):2003-2007.
- [2] NWACHUKWU M, FENG H, ALINNOR J. Assessment of heavy metal pollution in soil and their implications within and around mechanic villages[J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2010, 7(2):347-358.
- [3] HAANSTRA L, DOELMAN P. Glutamic acid decomposition as a sensitive measure of heavy metal pollution in soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1984, 16(6):595-600.
- [4] 和莉莉,李冬梅,吴钢. 我国城市土壤重金属污染研究现状和展望[J]. 土壤通报,2008,39(5):1210-1216.
- [5] 钟秀明,武雪萍. 我国农田污染与农产品质量安全现状、问题及对策[J]. 中国农业资源与区划,2007,28(5):27-32.
- [6] 王宣,池靖,徐琳,等. 六种典型农业区域土壤污染现状监测评估[J]. 农业环境科学学报,2006,25(S1):21-25.
- [7] 许学宏,纪从亮. 江苏蔬菜产地土壤重金属污染现状调查与评价[J]. 生态与农村环境学报,2005,21(1):35-37.
- [8] 吕晓男,孟赐福,麻万诸. 重金属与土壤环境质量及食品安全问题研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(2):197-200.
- [9] 张琳娜,樊隽轩,侯旭东,等. 地层数据的常用空间插值方法介绍和比较分析——以上扬子区宝塔组厚度重建为例[J]. 地层学杂志,2016,40(4):420-428.
- [10] 肖艳桐,张瑞雪,吴攀,等. 土壤重金属分析常用空间插值法研究进展[J]. 环境科学与技术,2019,42(3):198-205.
- [11] 史文娇,岳天祥,石晓丽,等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J]. 自然资源学报,2012,27(1):163-175.
- [12] 厉彦玲,赵庚星. 黄河三角洲典型地区耕地土壤养分空间预测[J]. 自然资源学报,2018,33(3):489-503.
- [13] 陈思莹,邹滨,汤景文,等. 空间插值方法对土壤重金属污染格局识别的影响[J]. 测绘科学,2015,40(1):63-67.
- [14] 李新,程国栋,卢玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展,2000,15(3):260-265.
- [15] 李一蒙,马建华,刘德新,等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学,2015,36(3):1037-1044.
- [16] 李向,徐清. 基于灰色关联分析理论的典型区域土壤重金属污染评价研究[J]. 安全与环境学报,2012,12(1):152-156.
- [17] 胡大伟,卞新民,许泉. 基于 ANN 的土壤重金属分布和污染评价研究[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(4):69-73.
- [18] 马宏宏,余涛,杨忠芳,等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学,2018,39(10):294-303.
- [19] CHEN D L, OU T H, GONG L B, et al. Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951—2005[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(6):1221-1232.
- [20] 刘妍月,李军成. 长沙市大气中 PM<sub>2.5</sub> 浓度分布的空间插值方法比较[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(2):14-18.
- [21] 陈涛,常庆瑞,刘京. 基于光谱信息辅助的污灌区农田土壤镉协同克里格分析[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(8):2157-2162.
- [22] 李润林,姚艳敏,唐鹏钦,等. 县域耕地土壤锌含量的协同克里格插值及采样数量优化[J]. 土壤通报,2013,44(4):830-838.
- [23] 帅方敏,卢进登,王新生. 基于 GIS 空间插值方法的长湖水水质评价[J]. 环境监测管理与技术,2007,19(4):40-42.
- [24] 房林东,廖卫红,王明元,等. 考虑高程的雨量反距离权重插值法研究[J]. 人民黄河,2015,37(9):38-41.
- [25] 熊敏谔. Delaunay 三角剖分法在降水量插值中的应用[J]. 气象学报,2012,70(6):1390-1400.
- [26] 陈琳,任春颖,王宗明,等. 基于克里金插值的耕地表层土壤有机质空间预测[J]. 干旱区研究,2017,34(4):798-805.
- [27] NEELAM C, CHAND M G, RAJESH C. GIS-based interpolation methods for estimating spatial distribution of nitrogen content in the soil[J]. Journal of Krishi Vigyan, 2018, 7:78-83.
- [28] BHUNIA G S, SHIT P K, MAITI R. Comparison of GIS-based interpolation methods for spatial distribution of soil organic carbon

- (SOC) [J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2018, 17(2): 114 - 126.
- [29] 颜金彪, 吴波, 何清华. 顾及各向异性的多参数协同优化 IDW 插值方法[J]. *测绘学报*, 2021, 50(5): 675 - 684.
- [30] 李凯, 赵华甫, 吴克宁, 等. 土壤重金属 Cd 污染指数的适宜插值方法和合理采样数量研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(5): 1056 - 1064.
- [31] 付传城, 王文勇, 潘剑君, 等. 南京市溧水区土壤重金属污染不同插值方法的对比研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(6): 1325 - 1333.
- [32] 李巍, 范文义, 毛学刚, 等. 降雨量空间插值方法比较研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(12): 3667 - 3669.
- [33] 崔邢涛, 栾文楼, 吴景霞, 等. 冀东平原表层土壤重金属元素的空间变异及模拟研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 957 - 964.
- [34] 张强, 张雅波, 马树. 一种基于径向基函数插值的全局优化算法[J]. *天津工程师范学院学报*, 2010, 20(4): 38 - 40.
- [35] 齐静. 径向基函数插值逼近问题的研究[J]. *电脑知识与技术*, 2018, 14(11): 265 - 266.
- [36] 宋立新, 高凤娇, 郝朝晖. 二维 EMD 分解方法的比较与改进[J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(12): 2890 - 2893.
- [37] 侯景儒, 黄竞生. *地质统计学的理论与方法* [M]. 北京: 地质出版社, 1990: 69 - 78.
- [38] 孙强, 薛雷, 王媛媛. 克里金参数估值法及其在参数估计分析中的应用[J]. *岩土力学*, 2009, 30(S2): 371 - 373.
- [39] 肖城龙. 基于 ArcGIS 的空间数据插值方法的研究与实验[J]. *城市勘测*, 2017(6): 71 - 73.
- [40] 王剑凯, 林玉英, 邱荣祖, 等. 基于 Ordinary Kriging 路域土壤重金属含量的空间分布——以国道 316 线福州至闽清段为例[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(3): 506 - 511.
- [41] 李晓军, 张振远. 基于指示和普通克里金的不连续地层厚度估计方法[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2881 - 2887.
- [42] 李海涛, 邵泽东. 空间插值分析算法综述[J]. *计算机系统应用*, 2019, 28(7): 1 - 8.
- [43] 牛文杰, 朱大培, 陈其明. 泛克里金插值法的研究[J]. *计算机工程与应用*, 2001, 37(13): 73 - 75.
- [44] LI Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? [J]. *Geoderma*, 2010, 159(1): 63 - 75.
- [45] 王雪珊, 沈庆松, 高凤杰, 等. 黑土区小流域土壤速效磷空间分布模拟方法[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 33 - 40.
- [46] ZHANG S, HUANG Y, SHEN C, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information [J]. *Geoderma*, 2012, 171/172: 35 - 43.
- [47] HENGL T, HEUVELINK G B M, ROSSITER D G. About regression-kriging: from equations to case studies [J]. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(10): 1301 - 1315.
- [48] KUMAR S, LAL R, LIU D. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock [J]. *Geoderma*, 2012, 189/190(6): 627 - 634.
- [49] 陈运帷, 王文杰, 师华定, 等. 区域土壤重金属空间分布驱动因子影响力比较案例分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(7): 1213 - 1223.
- [50] 王燕, 瞿明凯, 陈剑, 等. 基于 GWRK 的土壤有效磷空间预测及其超标风险评估[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(1): 249 - 256.
- [51] 易昊旻. 区域土壤重金属污染不同方法评估结果的比较研究 [D]. 南京: 南京大学, 2014.
- [52] LASLETT G M, MCBRATNEY A B, PAHL P J, et al. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH [J]. *Journal of Soil Science*, 1987, 38(2): 325 - 341.
- [53] MUELLER T G, PUSULURI N B, MATHIAS K K, et al. Site-specific soil fertility management: A model for map quality [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2031 - 2041.

本栏目编辑 姚朝英

## · 简讯 ·

## 联合国官员呼吁携手治理海洋塑料污染

新华社内罗毕 3 月 1 日电 第五届联合国环境大会续会 2022 年 2 月 28 日—3 月 2 日在肯尼亚首都内罗毕举行。联合国秘书长海洋事务特使彼得·汤姆森表示, 治理海洋塑料污染迫在眉睫, 国际社会应携手解决海洋污染问题。

汤姆森在续会期间举行的海洋论坛上说, 海洋中的塑料难以计数, 对海洋生态系统造成严重威胁, 没有一个国家能从海洋污染中独善其身。保护海洋人人有责, 国际社会应“制定解决方案, 开启全球海洋行动的新篇章”。

与会专家纷纷表示, 海洋污染治理是一项持久的大工程, 需要各国采取适当行动, 不断强化国际协调合作, 持续推进海洋保护工作。联合国环境规划署执行主任厄尼·安诺生在会上敦促各国加大力度解决塑料污染问题, “我们必须共同维护海洋健康, 否则后果不堪设想”。

第五届联合国环境大会第一阶段会议于 2021 年 2 月召开。此次续会为第二阶段会议, 总主题是“加强自然行动, 实现可持续发展目标”, 重点关注塑料污染、绿色回收和化学废弃物管理等问题。

摘自 <http://sthjt.jiangsu.gov.cn> 2022-03-14