引文格式：刘宇杰, 武红旗, 李润, 等. 基于GIS的塔城市耕地有效土层厚度分布特征研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 58-62. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.015

基于GIS的塔城市耕地有效土层厚度分布特征研究

刘宇杰[1]，武红旗[1*]，李　润[1]，郝进德[2]，朱　磊[1]
（1. 新疆农业大学资源与环境学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 额敏县农业农村局农业技术推广站，新疆 伊犁 830000）

摘　要：通过不同的插值方法对塔城市耕地的有效土层厚度空间分布特征进行预测，结果表明，塔城市耕地主要集中分布于塔城市西部、中部和东部，耕地的有效土层厚度分布特征与耕地的分布情况相吻合，有效土层厚度分布特征为：北、西南较低，西部和东南部较高，从中到南、北呈下降趋势，以地形地貌、人为因素、土壤类型、植被覆盖率等影响因素为判断依据，有效土层厚度的分布特征表现为以此为中心，向周围递减的趋势。最后，通过比较4种插值方法的插值结果得出：基于障碍因素的样条函数的插值结果两侧能看到明显的分界线，并且插值精度最高，IDW插值得到的结果会出现“牛眼”，同时插值精度也是最低的。塔城市耕地有效土层厚度分布特征表现为以影响因素为中心向周围递减，平原地区高于山地丘陵地区，基于障碍因素的样条函数插值法是最适宜进行塔城市耕地有效土层厚度分布特征的插值方法。

关键词：有效土层厚度；分布特征；空间插值；障碍因素；塔城市
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0058-05

Study on the Distribution Characteristics of Effective Soil Thickness of Cultivated Land in Tacheng City Based on GIS

LIU Yujie[1], WU Hongqi[1], LI Run[1], HAO Jinde[2], ZHU Lei[1]
(1. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumchi 830052, China;
2. Agricultural Technology Extension Station of Emin County Agricultural and Rural Bureau, Ili 830000, China)

Abstract: In this paper, we used different interpolation methods to predict the spatial distribution characteristics of effective soil thickness of cultivated land in Tacheng City. The results show that the cultivated land in Tacheng City is mainly distributed in the west, middle and east. The distribution characteristics of effective soil thickness of cultivated land are consistent with the distribution of cultivated land. The distribution characteristics of effective soil thickness are the lowest in the north and southwest, the highest is in the west and southeast, and there is a downward trend from the middle to the north and south. Comparing with the interpolation results of four interpolation methods, we found that the interpolation results of Spline function based on obstacle factors could see obvious dividing lines on both sides, and the interpolation accuracy was the highest. The result obtained by IDW interpolation appeared “bull’s eye”, and the interpolation accuracy was also the lowest. The Spline function interpolation method based on obstacle factors is the most suitable interpolation method for the distribution characteristics of effective soil thickness of cultivated land in Tacheng City.

Key words: effective soil thickness, distribution characteristic, spatial interpolation, barrier facto, Tacheng City

耕地地力评价是“三位一体”（生态、耕地质量和数量）保护的重要依据，这同时也是耕地资源的有效保护和保持农业的可持续发展，确保人民群众粮食安全的重要基石。同时也是为解决全国土地利用总体规划、耕地占用与补偿的平衡、基本农田的划定问题等提供科学依据。土壤的重要物理性质之一是有效土层厚度[1]，有效土层厚度对土壤的影响主要反映在植被类型、覆盖率等[2]。另外，耕地的有效土层厚度也可以应用在估算土壤碳密度和含水量中[3]。因此，获得有效土层厚度分布特征有重要的理论和实践意义。取自然地理要素空间信息的首选方法是空间插值[4]，但是目前情况下，国内外学术界对何种插值方法更优尚无统一认识，因此，有必要根据数据和该地区的自然地理特征比较不同的插值方法，并选择最佳的插值方法[5]。与其他土壤理化性质比较，土壤的有效土层厚度是一个研究较少的土壤特征，国内及国外也有不少学者进行不同插值方法的比较，但最优的插值方法并未达成共识[6]。由于没有有效的方法来计算不同地

收稿日期：2022-01-14；修回日期：2022-02-22。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41561019）。
第一作者简介：刘宇杰（1997—），硕士研究生，研究方向为农业工程与信息技术，E-mail：lyj0804@163.com。
通信作者：武红旗（1974—），硕士研究生，副教授，研究方向为遥感地理信息系统、土壤学，E-mail：hqwu7475@126.com。

形、地貌特征的有效土层厚度，因此在没有合适的环境要素数据的情况下，有必要根据研究区域的有效土层厚度和土壤的自然地理特性，比较不同的插值方法，然后选择最合适的方法来获得有效土层厚度的空间分布特征[7]，并且只有不同的插值方法相比较，才能突出考虑环境因素辅助插值的优势。因此，无论是否有合适的环境因素来辅助计算，对于不同插值方法的比较研究是很有必要的。本研究以新疆维吾尔自治区塔城地区塔城市为例，为预测有效土层厚度的分布特性[8]，采用反距离权重、克里金插值、样条函数和基于障碍因素的样条函数进行插值。通过比较不同插值方法的误差对研究区的影响效果，探讨选择有效土层插值方法的一般思路，并探索塔城市耕地的有效土层厚度最优插值方法，为环境要素辅助插值奠定基础[9]。

1　研究区概况

本文中的研究区选择地理坐标在82°41′~83°41′E、46°21′~47°14′N之间的塔城市，该地区西、北与哈萨克斯坦接壤。塔城市总面积约为4 356.6 km²，其东西宽约58 km，南北长约90 km。

研究区域为中温带大陆性气候，春秋季气温波动较大、冬长夏短的特征较为明显。年均气温7℃，日照充足且蒸发量大，高温少雨[10]。塔城市海拔在255~2 829 m之间，复杂的地形和气候构成了农业生产的明显区域差异[8]。

2　材料与方法

2.1　数据来源

1）有效土层厚度数据（187个）来源于2019年在塔城市利用土钻等工具采挖土壤剖面时记录收集（最小值：25 cm，最大值100 cm）。

2）由于本研究数据有具体的经纬度和有效土层厚度信息，故数据处理主要针对空间插值及插值精度的比较。

3）将187个样本点在综合分析本研究区耕地分布特点的基础上，插值点随机选取130个点，剩余57个点作为验证点，通过比较验证进行精度评估。

2.2　传统的空间插值方法

2.2.1　反距离权重插值（IDW）

该方法的思想是彼此距离较近的事物要比彼此距离较远的事物更相似。假定每个测量点都会在其周围形成多个有局部影响的离散点，与此同时这些离散点产生的局部影响会随着距离的增大而减小，生成的离散点与对应的插值点之间的距离标记为权重，离插值点越近，权重就越大[11]。研究区内的离散点应尽可能有一定密集度的均匀分布，同时反距离权重插值要求至少要有3个采样点才可以进行插值生成插值面[12]。IDW是空间插值的常用而简单的方法[13-15]。

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{z_i}{d_i^2}\right]\Big/\left[\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{d_i^2}\right],\quad i=1,2,3,\cdots,n \tag{1}$$

式中，$d_i^2=(X-X_i)^2+(Y-Y_i)^2$，$X_i$、$Y_i$和$Z_i$为离散点的坐标数值；$Z$为插值点的数值。

2.2.2　样条函数插值（spline）

张力样条（tension spline）和规则样条（regularized spline）是样条函数（spline）的2种计算方法。前者的插值结果更接近于采样点的实际值，生成的表面较坚硬；后者与前者相反，其插值结果会与实际测量值偏离较大，生成的表面越光滑，所分配的权重越大，典型值有：0、0.001、0.01、1和5；张力样条与规则样条相反，表面越粗糙其对应的权重越大，一般情况下使用的权重值有0、1、5和10。

Spline插值方法适合生成海拔、地下水位等变化平缓的表面，因为该方法插值效率高，产生的结果视觉效果好。测绘领域、几何计算、包括统计学等领域[16]会广泛用到Spline插值进行计算。其计算公式为：

$$S(x,y)=T(x,y)+\sum_{j=1}^{N}\lambda_j R(r_j) \tag{2}$$

式中，S为所有点函数值；T为原始点函数值；R为距离函数；N为样点数；λ_j为通过求解线性方程组而获得的系数；r_j为点（x,y）与点j之间的距离。

2.2.3　克里金插值（Kriging）

克里金算法不同于IDW和Spline，基于统计学的插值方法的克里金算法分为普通克里金法和通用克里金法。2种方法相比较，普通克里金算法比通用克里金算法更流行、更容易被大家接受，涉及的领域和使用人群也更广泛。该方法只需要用区域内局部因素来预测未知值，同时对样本点数据值做出不存在潜在全局趋势的假设。Kriging算法的局限性在于使用该方法的样本数据的实际趋势是已知的且能做出科学合理的描述。其表达式为：

$$\widehat{z_0}=\sum_{i=0}^{n}\lambda_i z_i \tag{3}$$

式中，$\widehat{z_0}$为点(x_0,y_0)处的估计值，即$\widehat{z_0}=z(x_0,y_0)$；λ_i为空间中所有样本数据点的加权，用来估计未知点的值同时也是权重系数。

国内许多优秀学者针对克里金算法提出了非常有研究意义的见解，从空间分布的角度建立多径误差模型[17-19]。Kriging插值算法适用于具有随机性和结构性场景的样本数据，广泛应用于降雨（降雪）、土壤、环境污染等领域。

2.3 基于障碍因素的插值方法

山区和丘陵地区一般会有较大的山体或者河流分布，在此地形中对未知样点进行插值时，结果会出现较大偏差，插值效果差，最终导致与实际情况出现不符。因此，本研究在不改变原始数据的情况下，从模拟和预测过程中引入了障碍因素，以更好地符合土壤性质的实际分布情况。

障碍因素是指研究区域中线性元素的位置，这些元素中断了表面的连续性。在山区和丘陵地区中，障碍因素可以是山脊、山谷和河流。这种障碍因素长期存在于大自然中无法改变，会造成障碍因素两侧的数据不连续。

本研究选取的障碍因素为河流和山脉，通过ArcToolbox空间分析里DEM水文分析方法提取山脊线的技术流程图如图1所示。

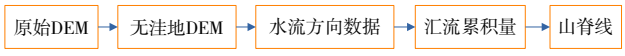


图1 山脊线的提取流程图

提取到的障碍因素如图2所示，将提取的山脊线和河流数据作为障碍要素通过ArcToolbox空间分析中“含障碍的样条函数”插值工具进行计算。

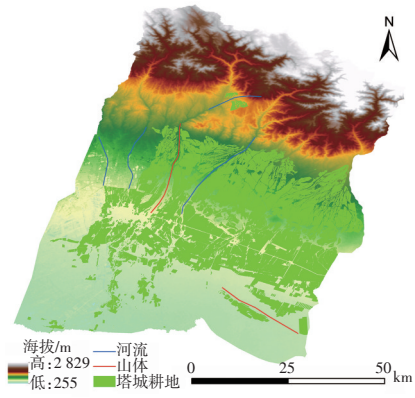


图2 障碍线分布图

结合以上列举的空间插值算法的原理及应用，通过使用相同软件对相同数据在同一设备进行插值计算，记录各个插值计算的运行时间，总结了这些算法的逼近程度、处理速度、推算能力以及适应范围[20]，由弱到强用1~5分值表示。

2.4 精度检验方法

采用交叉验证[21-22]，比较和分析了IDW、Spline、Kriging、基于障碍因素的样条函数插值结果的精度。最后，每种方法获得的插值结果精度用平均相对（MRE）、绝对误差（MAE）、相对均方根（RRMSE）、均方根（RMSE）误差评价。其中，MRE可以确定实际测量数据和利用插值方法得出的预测值之间的误差；MAE能够根据利用插值方法所获得的预测值大概估算出其结果的误差范围；RRMSE越小则误差越小，精度越高[23-24]；RMSE反映插值后预测值的极值效应，其值越小越好。其计算公式如下

$$M_{RE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{x_{i1}-x_{i2}}{x_{i1}}\right|}{n} \tag{4}$$

$$M_{AE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_{i1}-x_{i2}\right|}{n} \tag{5}$$

$$R_{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_{i1}-x_{i2}}{x_{i1}}\right)^{2}}{n}} \tag{6}$$

$$R_{MSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_{i1}-x_{i2}\right)^{2}}{n}} \tag{7}$$

式中，x_{i1}为验证点的实际测量值；x_{i2}为验证样点预测值；n为验证样本总数。

3 结果与分析

3.1 原始数据描述性统计分析

从表2中的数值来看，在塔城地区塔城市的研究区域范围内原始样本采集的有效土层厚度基本上保持在25~100 cm之间的厚度。结合表2的数据来看，塔城市的有效土壤厚度分布并不是遵照正态分布的规律进行分布，这其中计算出的变异系数不仅可以反映数据的离散程度，同时也可以通过变异系数分析出采集数据的分布状态。因此在表1中，根据变异系数的等级，塔城市的有效土层厚度属于中等变异性，也就是说塔城市耕地土壤有效土层厚度容易受到周围环境变化的影响，变异的程度较大，土层的稳定性不太好。

3.2 插值结果分析

塔城市调查样点有效土层厚度通过样条函数（Spline）插值法、基于障碍因素的样条函数插值法、克里金（Kriging）插值法、反距离权重（IDW）4种方法获得的插值结果如图3所示。

表1　原始样本描述性统计特征值

类型	最小值/cm	最大值/cm	均值/cm	标准差/cm	方差/cm²	偏度/cm	峰度/cm	变异系数/cm
有效土层厚度	25	100	79.58	26.65	604.28	−0.66	−1.08	0.31

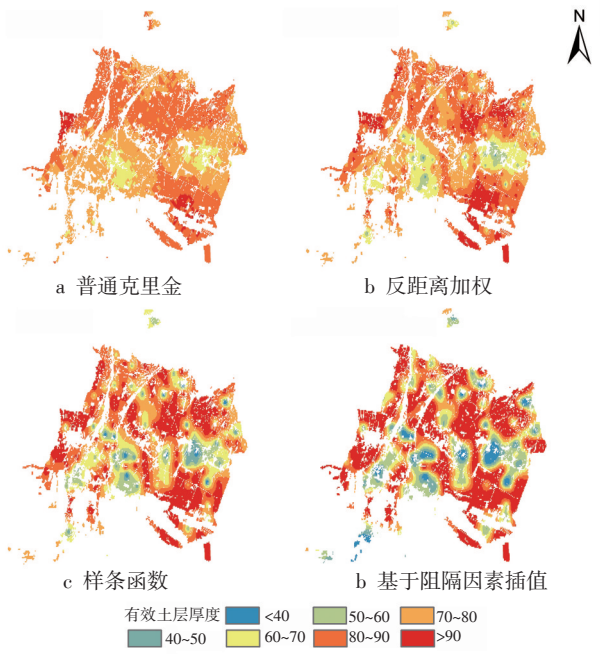


图3　有效土层厚度插值结果图

从图中可以看出塔城市有效土层厚度的厚度范围基本上维持在40~100 cm的水平。除了厚度的特征外，塔城市有效土层厚度的整体分布特征为：塔城市耕地土壤有效土层厚度受山体、河流、居民地等影响因素的影响，以影响因素向为中心向外呈现递减趋势，有效土层厚度较高的耕地主要聚集在塔城市东南部及东北部，该地区土壤母质较细，山体、河流、居民地等影响因素少，植被覆盖情况较好，有效土层厚度平均为90 cm左右；北部多为山区丘陵地，因此有效土层厚度较低；中部地区及西南部地区耕地土壤的母质较粗、居民地较多人为影响因素大，植被覆盖情况较粗，有效土层厚度整体较低，从插值结果图的整体上看，有效土层厚度的分布还呈现出从塔城市北部向中部递增、中部向东部递减、向东南部递增的趋势。

通过本实验中关于塔城市有效土层厚度的不同插值方法结果分析来看，所用的4种插值算法均能够很好地反映塔城市有效土层厚度的分布特点，这些方法对于塔城市耕地有效土层厚度的空间分布插值分析拟合度均符合实际情况。

本研究对于塔城市有效土层厚度插值分析的4种结果，虽然整体的空间分布相似，但是空间插值分析的结果却有所不同。本研究用到的4种插值方法分别是：普通克里金插值、反距离权重插值法、样条函数插值法以及有障碍因素存在的样条函数插值法，这4种插值方法得到的有效土层厚度范围结果如下：64.43~97.83 cm、55.73~95.60 cm、47.02~98.72 cm、20.45~115.63 cm。通过对比可知，反距离权重插值结果与真实值的范围最为接近，有障碍因素存在的样条函数的插值方法的结果也较为接近。但是2种方法均有各自欠缺的地方，对于反距离权重插值法而言：由于空间分布图的平滑存在缺陷，这就导致了该方法得到的结果可观性较差，同时还会有“牛眼”出现在插值点数值高和插值点较为集中的地区。基于障碍因素的样条函数插值方法同样也是空间分布图过渡平滑性欠佳，相比之下样条函数插值的结果虽与有效土层厚度的实际值相差较大，但是样条函数插值法的空间分布图像相对平滑，因此具有更好的可观性。综合上述几种插值方法，再结合本实验对于有效土层厚度的研究目的，有障碍因素存在的样条函数插值法得到的结果更加接近实际值，而且能够很好地符合有效土层分布的特点，分界线和细节都体现得很明显。因此对于有效土层厚度的空间插值的分析，基于障碍因素的样条函数插值法的适用性更好，精确度也更高。

通过对于4种插值方法结果比较可知：有障碍因素存在的样条函数插值法的精度最高，与样条函数插值法相比，在平均绝对和相对误差，以及均方根和相对均方根误差4个指标上，障碍样条函数插值法比样条函数插值法分别对应高出：8.68%、21.53%、17.01%、12.52%；与反距离权重插值法相比指标对应高出17.9%、25.06%、20.13%、25.62%。所以，耕地的有效土层厚度的空间分布特征最适宜的插值方法应是基于障碍因素的样条函数插值，相比之下，反距离权重插值方法最不适宜。

4　讨　论

1）通过实验探究最终得到的结果是：有障碍因素存在的样条函数插值法是分析有效土层厚度空间分布特征最优的插值分析方法，不仅精度更高，而且能形成明显的分界线，保留更多的细节，与真实值更接近。而反距离权重插值法对于有效土层厚度空间分布特征的插值分析精度最差，这种基于样本点距

离为权重的插值方法，在有效土层厚度空间分布特征的研究中精度最低，适用性最差，这一结果与杨永侠[9]等学者所研究的耕地质量分等因素插值方法所得的结果一致。

1）在现实情况下，对于障碍因素（河流、山体）而言，迎风坡与背风坡风化存在差异，阴阳坡的光照辐射也不相同，气流和能量对土壤变化影响尤为显著，而且塔城市山地丘陵区居多，研究区的耕地多分布于山谷和河谷两侧，耕地土壤有效土层厚度的实际分布特征不仅会受到地形地貌的影响，也会受到其他自然因素与人为因素的影响。

2）从插值结果在塔城市局部趋势的反映效果来看，样条函数插值的视觉效果最好，有效土层厚度分布过渡平滑渐进。由基于障碍因素的插值方法和不添加障碍因素的插值方法进行比较可知，添加了障碍因素的插值在结果上保留了部分细节，分界线突显了这些障碍因素对其两侧的影响，所以能够反映出塔城市耕地有效土层厚度的空间渐变性，插值结果与实际调查数据误差最小，相比样条函数、反距离权重、克里金插值更符合实际情况，同时也有更高的插值预测精度。

3）基于障碍因素的样条函数插值法比精度最低的反距离权重插值法，在平均绝对和相对误差，均方根和相对均方根误差4个指标上分别对应高出了17.9%，25.06%，20.13%，25.62%。因此，对于塔城市耕地有效土层厚度空间分布特征的分析，精度最高、最适用的插值方法是基于障碍因素存在的样条函数插值法。

5 结 论

对新疆维吾尔自治区塔城地区塔城市耕地的有效土层厚度空间分布特征采用了基于障碍因素的样条函数插值法，本研究仅对塔城市山地丘陵区耕地有效土层厚度分布特征的预测提出了新的方法，并不能适用于所有地区，并且本研究的研究范围塔城市面积较小，若想获得更为准确、尺度范围更大、地形地貌更复杂的差值结果，对于土壤的不同物化性质进行研究，还有待验证，需要在本方法的基础上考虑更多的环境因素。

参考文献

[1] 李周,赵雅洁,宋海燕,等. 不同水分处理下喀斯特土层厚度异质性对两种草本叶片解剖结构和光合特性的影响[J]. 生态学报,2018,38(2):721-732

[2] 陶崇鑫,刘新平,吴贵亮. 阿勒泰市耕地质量影响因素分析[J]. 新疆农业科学,2012,49(7): 1 353-1 359

[3] 武红旗,范燕敏,管光玉,等. 天山北坡退化山地草甸土壤的主要理化性质分析[J]. 山东农业科学,2018,50(1):76-80

[4] 阳宽达,谢红霞,隋兵,等. 基于GIS的降雨空间插值研究:以湖南省为例[J]. 水土保持研究,2020,27(3):134-138

[5] 孟雪莹,张新新. 不同空间插值方法对圩畈土壤属性空间预测精度的影响[J]. 黑龙江工程学院学报,2020,34(1):22-26

[6] 袁宏,赵利,薛勇. 基于最适空间插值的崇州市典型农田土壤重金属污染特征分析与评价[J]. 土壤与作物,2020,9(1):94-101

[7] 祁亚琴,张显峰,张立福,等. 基于归一化光谱指数的土壤有机质含量空间分布状况研究[J]. 新疆农业科学,2018,55(2):337-343

[8] 颜安,郭涛,陈全家,等. 基于无人机影像的棉花株高预测[J]. 新疆农业科学,2020,57(8):493-502

[9] 杨永侠,郭雅萍,张函,等. 基于障碍因素的耕地质量分等因素插值方法研究[J]. 农业机械学报,2019,50(8):157-165

[10] 吕晓立,刘景涛,韩占涛,等. 城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因[J]. 环境科学,2020,41(3):197-206

[11] 董庆国. 塔城市耕地土壤有机质与全氮现状及相关性分析[J]. 农村科技,2017(5):23-24

[12] 刘晓林,李文峰,杨林楠,等. 基于ArcGIS地统计分析模块的土壤养分空间变异分析:以云南省建水县为例[J]. 土壤通报,2012,43(6):1 432-1 437

[13] 龙海宁,喻高明,傅宣豪. 结合灰色关联改进反距离加权插值法的劈分新方法[J]. 科学技术与工程,2019,19(36):140-146

[14] 王家润,谢海峰. 基于任务分解模型的离散数据格网化并行优化[J]. 计算机工程与设计,2018,39(6):1 774-1 781

[15] 李正泉,吴尧祥. 顾及方向遮蔽性的反距离权重插值法[J]. 测绘学报,2015,44(1):91-98

[16] 刘玮,辛美丽,吕芳,等. 关于鼠尾藻群体数量分布的三种统计模型比较[J]. 生态学报,2018,38(6):2 031-2 040

[17] 王丽,叶青,丁烨,等. 基于泰勒多项式及曲面样条函数的地电场变化分析[J]. 地震地磁观测与研究,2019,40(3):47-55

[18] 陈光. 基于改进克里金算法的WSNs环境监测方法研究[D]. 南京:南京邮电大学,2017

[19] 顾军华,许鹏,董瑶,等. 基于克里金插值的自适应VIRE室内定位算法研究[J]. 计算机工程与应用,2018,54(12):100-104

[20] 刘光孟,汪云甲,张海荣,等. 空间分析中几种插值方法的比较研究[J]. 地理信息世界,2011,9(3):41-45

[21] 邓岳川,谷双喜. 克里金插值的多路径误差空间分布特征[J]. 测绘学报,2018,43(4):17-23

[22] 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):3 667-3 669

[23] 马欢,岳德鹏,Yang D,等. 基于数据同化的地下水埋深插值研究[J]. 农业机械学报,2017,48(4):206-214

[24] 李贞,张世文,曹梦,等. 基于球坐标转换的土壤机械组成空间插值研究[J]. 农业机械学报,2018,49(3):295-302