

基于球坐标转换的土壤机械组成空间插值研究

李 贞¹ 张世文² 曹 梦¹ 黄亚捷¹ 魏 星¹ 黄元仿¹

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001)

摘要: 土壤机械组成作为一种成分数据, 为满足其空间插值的定额、非负、线性无偏和最优要求, 通常需要对其进行转换。本文以宁夏银北地区土壤机械组成数据为例, 引进了球坐标转换方法, 利用经球坐标转换、对称对数比转换和非对称对数比转换后的数据进行普通克里格插值, 分析了球坐标转换方法对土壤机械组成数据转换的可行性与科学性, 并比较了不同转换方法对土壤机械组成空间预测效果的影响。结果表明: 球坐标转换方法能满足土壤机械组成空间插值要求, 对于研究区砂粒、粉粒的空间插值精度较对称对数比转换和非对称对数比转换方法高, 而对于黏粒, 其插值精度却逊于对称对数比转换和非对称对数比转换方法。本研究为土壤机械组成空间插值提供了一种易于理解、计算量小、不需要考虑零值、又能保证一定插值精度的转换方法。

关键词: 土壤机械组成; 球坐标转换; 对数比转换; 空间插值

中图分类号: S152.3; S159.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0295-08

Spatial Interpolation of Soil Mechanical Composition Based on Spherical Coordinate Transform Method

LI Zhen¹ ZHANG Shiwen² CAO Meng¹ HUANG Yajie¹ WEI Xing¹ HUANG Yuanfang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: As a kind of compositional data, the spatial interpolation of soil mechanical composition needs to meet four constraints of constant sum, nonnegativity, linear unbiased estimation and error minimization. Therefore, it usually needs to be transformed before spatial interpolation. A novel transformation method-spherical coordinate transform method was proposed and the study area was located in Yinbei Irrigation District, Ningxia Hui Autonomous Region. Firstly, the sampled soil mechanical composition data was transformed through three methods, including symmetry logratio transform method, asymmetry logratio transform method and the proposed spherical coordinate transform method, respectively. Then the soil mechanical composition spatial interpolation was realized with the application of ordinary Kriging. Secondly, the soil mechanical composition interpolation maps of different transform methods were compared to analyze the scientificity and feasibility of the proposed transform approach. The precision and fitting effect were assessed by utilizing the mean absolute error (M_{AE}), root mean square error (R_{MSE}), index of agreement (d) and Pearson's correlation (R). The results indicated that spherical coordinate transform technology not only can satisfy the four constraint conditions but also had superior interpolation accuracy for sand and silt content than the other two logratio transform methods. However, the logratio transform methods had more accurate interpolation results than spherical coordinate transform method for clay content prediction. To summarize, a novel transform technology with the advantages of easy understanding, small calculation amount, and good interpolation precision and without consideration of zero values for spatial interpolation of soil mechanical composition was presented.

Key words: soil mechanical composition; spherical coordinate transform; logratio transform; spatial interpolation

收稿日期: 2017-07-16 修回日期: 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571217)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)

作者简介: 李贞(1992—), 女, 博士生, 主要从事土壤属性空间变异研究, E-mail: yecheng019@126.com

通信作者: 黄元仿(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计量土壤学和数字农业研究, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

0 引言

土壤机械组成是土壤较为稳定的自然属性,是研究有关土壤的一系列物理化学过程(如土壤改良、溶质运移、农业区划等)的重要基础,也是进行陆面过程及大气过程模拟必需的重要参数。空间插值是获取区域土壤属性的一种重要方法,然而土壤机械组成作为一种成分数据,其空间插值不仅要满足线性无偏、最优要求,而且要满足定额与非负条件^[1-2],因此常常在插值前对土壤机械组成数据进行转换。常用的转换方法为对数比转换方法^[3-7]。虽然通过对数比转换处理成分数据在各个学科中都有着广泛的应用^[8-9],但是当成分数据中出现零值时,对数比转换方法需要进行特殊处理,如李春轩等^[10]在引入零值替换方法的基础上比较了不同对数比转换方法对成分数据空间插值效果的影响。有研究表明,球坐标转换方法是一种新颖的成分数据处理方法^[11]。赵江涛等^[12]利用球坐标转换和对数比转换对北京市的就业情况进行预测建模,结果表明,球坐标转换和对数比转换均能取得很好的效果。WANG 等^[13]阐述了球坐标转换方法并利用该方法对四维含有零值的成分数据进行了分析和预测,结果表明,球坐标转换方法既可以降低数据的冗余程度,满足成分数据的定额、非负条件,又无需考虑数据中的零值问题。土壤机械组成数据是一种三维数

据,利用球坐标系表示更加直观易懂,然而目前还没有球坐标转换方法对土壤机械组成数据空间插值效果的影响研究。因此,本文采用球坐标转换方法对土壤机械组成数据进行转换,利用转换后的数据进行普通克里格插值,并与经对称对数比和非对称对数比转换后的土壤机械组成数据的普通克里格插值结果进行比较,分析利用球坐标转换方法进行土壤机械组成空间插值的适用性以及3种转换方法对插值效果的影响。

1 研究区域概况与数据获取

1.1 研究区域概况

选取宁夏银北地区为研究区(105°51′1.83″~106°58′59.51″E,38°16′20.31″~39°23′26.99″N)。研究区地处宁夏河套灌区贺兰山东麓、银川平原北部和鄂尔多斯台地西缘的高阶地上,由西南向东北倾斜,主要地貌类型为山前洪积倾斜平原,黄河冲洪积平原和冲湖积平原,东西宽约51 km,南北长约130 km,面积约6 967.80 km²,行政区划上主要包括银川市和石嘴山市(图1)。银北地区属于典型的温带大陆性气候,日照充足,干旱少雨,蒸发强烈,风大多沙,多年平均降雨量为183~200 mm。土壤类型以灰钙土和灌淤土为主,并包括少量的潮土、盐土、风沙土、新积土、沼泽土、龟裂碱土和泥炭土,岩性构成从东到西依次为砾石、粗砂、中砂、细粉砂、砂黏

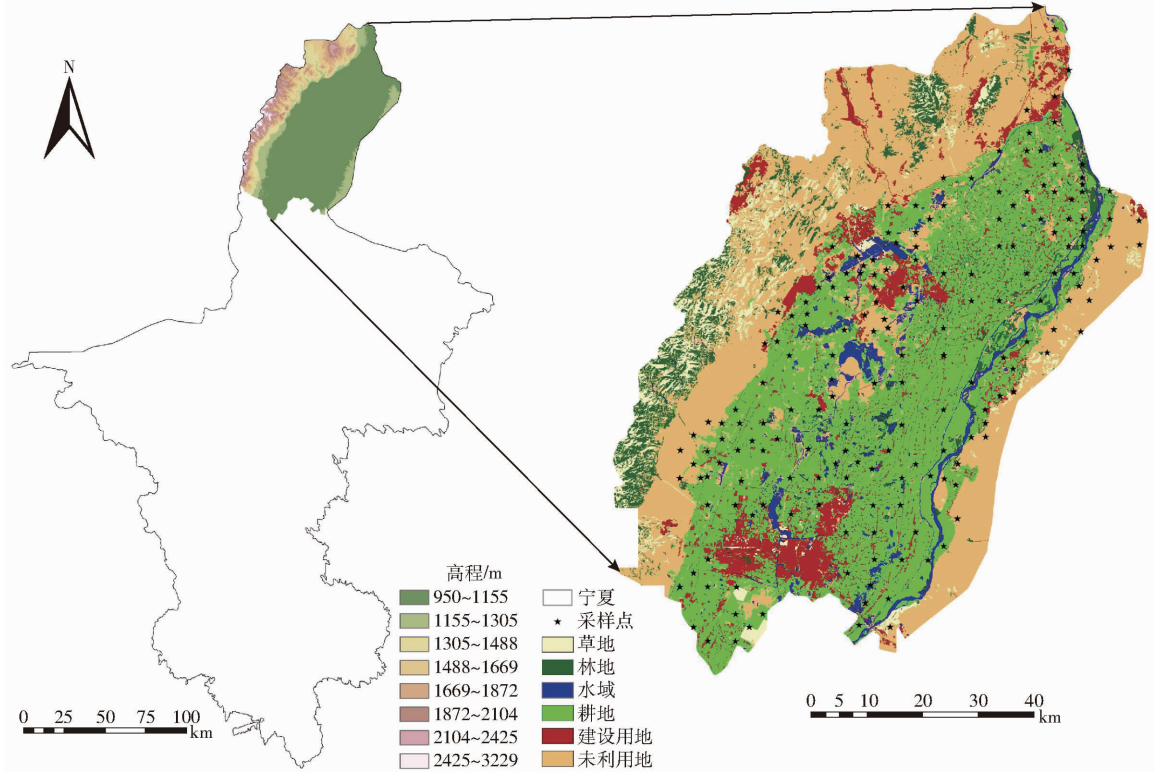


图1 研究区位置、土地利用现状、高程及样点分布

Fig.1 Map of study area, land use type, digital elevation and sampling points

土^[14]。

1.2 数据获取与处理

本研究采用网格均匀布点和分层抽样相结合的方法在研究区内布点采样。网格大小为 2.5 km × 2.5 km,在此基础上根据土壤类型、土地利用类型、数字高程等进行分层抽样。采样时间为 2017 年 4 月,共取土样 184 个,每个样点用 GPS (Global position system)记录其位置,样点分布见图 1。采用梅花取样法,每个土样都由取样点附近直径 10 m 范围内 5 个土壤表层 0 ~ 20 cm 土样混合而成。样品经自然风干后过 2 mm 筛备用。土壤机械组成采用激光粒度分析仪测定,每个样品测定 3 次,取其平均值。土壤颗粒分级标准采用国际制,粒径在 20 ~ 2 000 μm 为砂粒,粒径在 2 ~ 20 μm 为粉粒,粒径 0 ~ 2 μm 为黏粒。

土壤机械组成数据的描述性统计、正态性检验采用 SPSS 软件,土壤质地三角图采用 Origin 完成,地统计学分析和空间分布图制作以及交叉检验利用 ArcGIS 完成。

2 研究方法

2.1 土壤机械组成数据转换方法

2.1.1 球坐标转换方法

球坐标转换 (Spherical coordinate transform, SCT)是将成分数据由直角坐标系转换到球坐标系。对于空间上第 i 个点上具有 p 种成分的成分 $u_i = (u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,p})$,由于定和限制即 $u_{i,1} + u_{i,2} + \dots + u_{i,p} = 1$,可对其各分量开根号, $u'_{i,j} = (u_{i,j})^{0.5} (j = 1, 2, \dots, p)$ 做简单的非线性变换,此时有 $(u'_{i,1})^2 + (u'_{i,2})^2 + \dots + (u'_{i,p})^2 = 1$,则 $u'_i = (u'_{i,1}, u'_{i,2}, \dots, u'_{i,p}) \in \mathbf{R}^p$ 分布在一个半径为 1 的 p 维超球面上,因此,可将 $u_i = (u_{i,1}, u_{i,2}, \dots, u_{i,p}) (i = 1, 2, \dots, n)$ 从直角坐标系变换到球坐标系 $(r, \theta_{i,2}, \dots, \theta_{i,p}) \in \Theta^p$,具体映射公式为

$$\begin{cases} \theta_{i,p} = \arccos u'_{i,p} \\ \theta_{i,p-1} = \arccos \frac{u'_{i,p-1}}{\sin \theta_{i,p}} \\ \theta_{i,p-2} = \arccos \frac{u'_{i,p-2}}{\sin \theta_{i,p} \sin \theta_{i,p-1}} \\ \vdots \\ \theta_{i,2} = \arccos \frac{u'_{i,2}}{\sin \theta_{i,p} \sin \theta_{i,p-1} \cdots \sin \theta_{i,3}} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

由球坐标系转回直角坐标系为^[13]

$$\begin{cases} u_{i,1} = (\sin \theta_{i,2} \sin \theta_{i,3} \sin \theta_{i,4} \cdots \sin \theta_{i,p})^2 \\ u_{i,2} = (\cos \theta_{i,2} \sin \theta_{i,3} \sin \theta_{i,4} \cdots \sin \theta_{i,p})^2 \\ u_{i,3} = (\cos \theta_{i,3} \sin \theta_{i,4} \cdots \sin \theta_{i,p})^2 \\ \vdots \\ u_{i,p} = (\cos \theta_{i,p})^2 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式中 $u_{i,j}$ ——第 i 个样点上第 j 种成分的质量分数
 $\theta_{i,j}$ ——第 i 个样点球坐标系上第 j 个分量,
 $0 < \theta_{i,j} \leq \pi/2, j = 2, 3, \dots, p$
 p ——成分种类数,取 3 m ——样点数

2.1.2 对数比转换方法

AITCHISON^[15-16]提出成分数据的对数比转换方法,将成分数据变换成其主分的比值对数(称对数比),解决了成分数据统计分析中的闭合效应和非正态分布问题,PAWLOWSKY 等^[1]将对数比方法与地质统计学方法相结合,提出了成分数据的区域化统计方法,解决了成分数据插值的定额、非负、误差最小和无偏估计的要求。常用的对数比转换方法为非对称对数比转换 (Asymmetry logratio transform, ALT),有学者在此基础上又进行了改进,提出了对称对数比转换 (Symmetry logratio transform, SLT)^[10,17]。非对称对数比转换及其转回公式为

$$\varphi_{i,j} = \ln \frac{u_{i,j}}{\prod_{j=1}^p u_{i,j}} \quad (3)$$

$$u_{i,j} = \frac{\exp \varphi_{i,j}}{\sum_{j=1}^p \exp \varphi_{i,j}} \quad (4)$$

对称对数比转换及其转回公式为

$$\beta_{i,j} = \ln \frac{u_{i,j} + \eta_j}{\left[\prod_{j=1}^p (u_{i,j} + \eta_j) \right]^{1/p}} \quad (5)$$

$$u_{i,j} = \left(\frac{\exp \beta_{i,j}}{\sum_{j=1}^p \exp \beta_{i,j}} - \frac{\eta_j}{1 + \sum_{j=1}^p \eta_j} \right) \left(1 + \sum_{j=1}^p \eta_j \right) \quad (6)$$

式中 $\varphi_{i,j}$ —— $u_{i,j}$ 经非对称对数比转换后的数值
 $\beta_{i,j}$ —— $u_{i,j}$ 经对称对数比转换后的数值
 η_j ——常数,通常取所有样点第 j 种成分除 0 以外最小质量分数的一半

2.2 土壤机械组成空间插值方法

地统计学利用采样点的空间自相关性预测未知点的值,是区域制图的一种重要方法。由于本文侧重于不同转换方法对土壤机械组成空间插值精度的影响,因此选择最常用的普通克里格 (Ordinary Kriging, OK) 插值方法进行空间插值,该方法认为未

知点的值可以通过已知点值的线性组合得到^[18-19]。

2.3 预测精度检验

本文采用常用的交叉验证方法进行插值精度检验。选取平均绝对误差 M_{AE} 、均方根误差 R_{MSE} 、一致性指标 d 、相关系数 R 评价不同转换方法的插值精度,其中,平均绝对误差和均方根误差越小,插值精度越高,一致性指标和相关系数越大,插值精度越高^[20-23],计算方法为

$$M_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - o_i| \tag{7}$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2} \tag{8}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|p_i'| + |o_i'|)^2} \right] \tag{9}$$

其中
$$\begin{cases} p_i' = p_i - \bar{p}_i \\ o_i' = o_i - \bar{o}_i \end{cases} \tag{10}$$

$$R = \frac{\text{cov}(p_i, o_i)}{\sqrt{D(p_i)} \sqrt{D(o_i)}} \tag{11}$$

式中 p_i ——第 i 个点的预测值
 o_i ——第 i 个点的实测值
 n ——验证点的个数,文中为采样点数

3 结果与分析

3.1 土壤机械组成的描述性统计分析

由于银北地区特殊的气候、地质条件,使得该地区荒漠化和盐渍化同时并存,因此本研究中部分样点粉粒和黏粒的含量为零。由表 1 可知,整个研究区砂粒含量的分布区间为 12.55%~100%,粉粒含量的分布区间为 0~73.42%,黏粒含量的分布区间为 0~22.32%。从土壤颗粒的变异系数可以看出,黏粒的变异性最大,达到 75.84%,其次为粉粒 53.42%,砂粒的变异系数最小,为 28.38%。按照变异系数的划分标准^[24-25],研究区 3 种土壤颗粒均处于中等强度变异水平。根据土壤质地三角图(图 2)可以看出该地区主要为砂土及砂壤土,还有少量的粉砂粘壤,这与张秀珍等^[26]的研究结果基本一致。

表 1 研究区土壤机械组成统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of soil mechanical composition in study area

土壤颗粒类型	最大值/%	最小值/%	极差/%	平均值/%	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
砂粒	100	12.55	87.45	65.55	0.19	28.38	-0.10	-0.61
粉粒	73.42	0	73.42	30.89	0.17	53.42	0.01	-0.83
黏粒	22.32	0	22.32	3.56	0.03	75.84	2.59	13.76

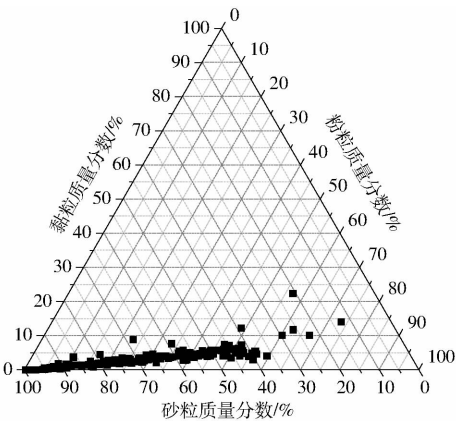


图 2 研究区土壤质地三角图

Fig. 2 Ternary diagram for all samples

3.2 土壤机械组成空间插值

通过地统计学分析得到 3 种转换方法转换后数据半变异函数的拟合模型及相关参数,见表 2。由表 2 可知,经对数比转换后的砂粒、粉粒、黏粒分别符合球状模型、高斯模型和指数模型。由于球坐标转换方法的降维特性,因此经球坐标转换后只有两列数据参与分析和插值,其半变异函数分别符合球状模型和高斯模型。由于非对称对数比转换无法处

理原数据中的零值,因此仅有 177 个样点参与地统计分析和插值。球坐标转换中砂粒、粉粒、黏粒的排列方式影响转换后数据分布,经比较,本文中以黏粒、砂粒和粉粒的排列方式为最优。

$C_0/(C_0 + C_1)$ 常用来表示变量空间自相关性强度,低于 25% 和高于 75% 表明变量分别具有较强和较弱的空间自依赖性^[27],由表 2 可知,除了经非对称对数比转换的黏粒和对称对数比转换的黏粒具有较强的空间自相关性以外,其他数据均具有中等程度空间自相关性,表明该地区土壤砂粒、粉粒的空间分布是由母质、气候、地形等结构性因素以及耕地、施肥、排灌、管理措施等随机因素共同作用的结果,而黏粒的分布受结构性因素影响更多一些。张世文等^[4]对北京市土壤机械组成空间插值的研究结果也表明,对称对数比转换后的砂粒、粉粒呈中等空间自相关性,转换后的黏粒具有较强的空间自相关性。

利用球坐标转换、非对称对数比转换和对称对数比转换数据所获得的土壤机械组成空间分布如图 3 所示。3 种转换方法所获得的砂粒、粉粒和黏粒在空间分布上显示出相似的趋势,如砂粒高

表 2 转换后土壤机械组成数据半变异函数拟合模型及相关参数

Tab.2 Semivariogram of transformed soil mechanical composition and parameters					
数据类型	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C_1$	$C_0/(C_0 + C_1)/\%$	变程/km
非对称对数比转换砂粒	球状模型	0.186	0.500	37.20	21.01
非对称对数比转换粉粒	高斯模型	0.053	0.086	61.63	28.81
非对称对数比转换黏粒	指数模型	0	0.252	0	10.68
对称对数比转换砂粒	球状模型	0.278	0.869	31.99	23.29
对称对数比转换粉粒	高斯模型	0.122	0.208	58.65	32.99
对称对数比转换黏粒	指数模型	0.049	0.391	12.53	25.49
球坐标转换 θ_3	球状模型	0.015	0.043	34.88	23.29
球坐标转换 θ_2	高斯模型	0.009	0.015	60.00	11.25

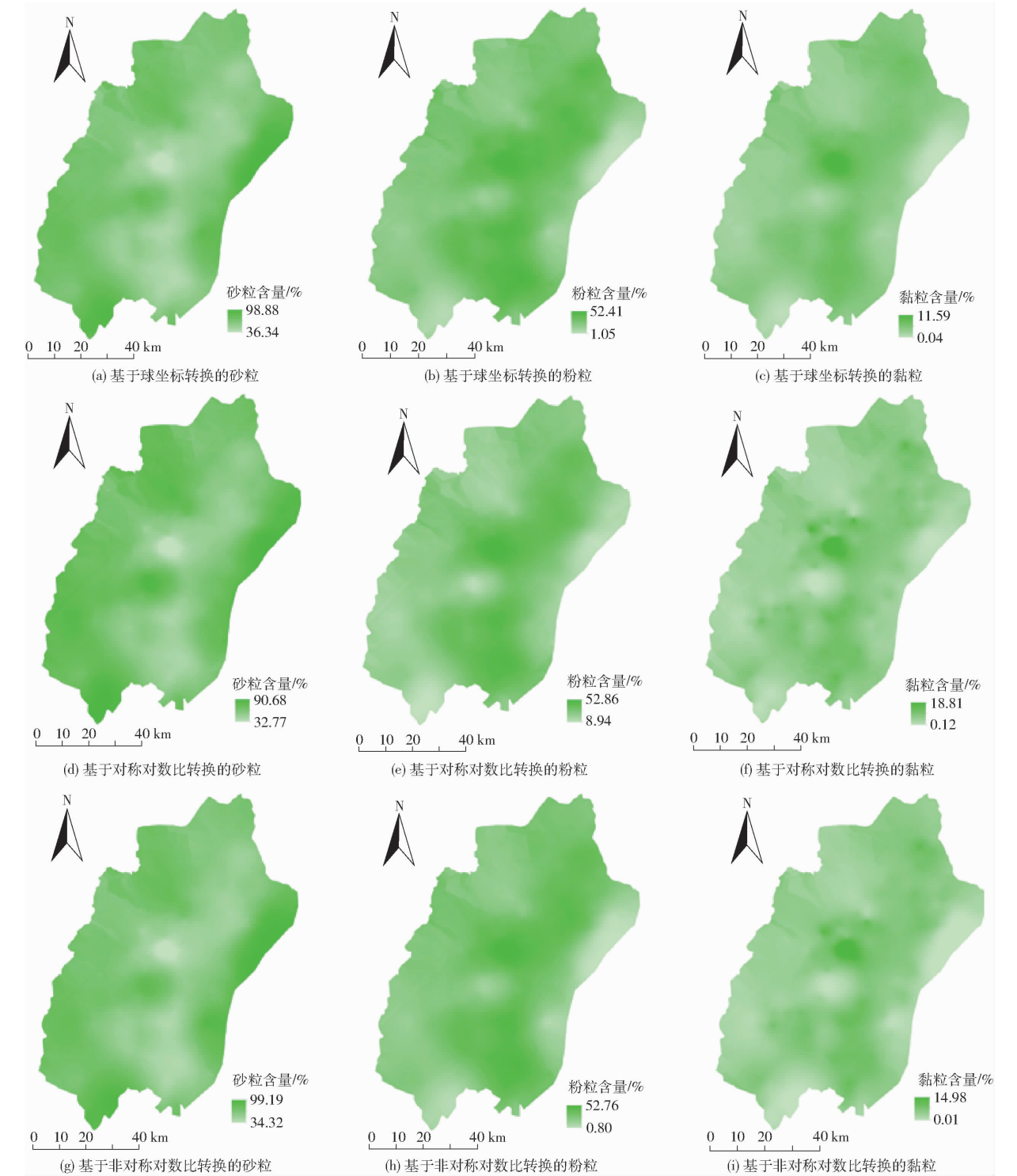


图 3 基于不同转换方法的土壤机械组成普通克里格插值图

Fig. 3 OK prediction maps of soil mechanical composition for different transformation methods

值区域主要沿贺兰山东麓和鄂尔多斯台地由东南向西北方向呈带状分布;而粉粒的高值区域主要位于银北地区中间地带,由南向北沿黄河呈带状分布,这里地势平坦,分布着大量肥沃的耕地;黏粒的高值区域则显得较为零散,主要位于研究区东南角以及零星散布于研究区中间地带。

3 种转换方法所得研究区土壤砂粒、粉粒、黏粒空间分布图经栅格计算加和为 1,表明球坐标转换方法和对数比转换方法一样可以满足土壤机械组成空间插值的定额、非负、线性无偏以及最优要求。

3.3 土壤机械组成空间插值精度检验

研究区样点砂粒、粉粒与黏粒的实测值与 3 种转换方法获得的普通克里格预测值之间的平均绝对误差 M_{AE} 、均方根误差 R_{MSE} 、一致性指标 d 、相关系数

R 、实测值与预测值的散点图见图 4。由图 4 可知,对于砂粒和粉粒的预测,球坐标转换方法的 M_{AE} 、 R_{MSE} 均低于对称对数比转换和非对称对数比转换方法,一致性指标 d 和相关系数 R 均高于其他两种转换方法,表明球坐标转换方法对于砂粒和粉粒的空间预测效果相比对称对数比和非对称对数比转换方法而言具有一定提高作用。而对于黏粒的空间预测,非对称对数比转换方法的 M_{AE} 和 R_{MSE} 均小于对称对数比转换和球坐标转换,一致性指标 d 和相关系数 R 均高于对称对数比转换和球坐标转换,表现出较好的预测效果。由实测值和预测值之间的散点图也可以看出,球坐标转换方法对砂粒和粉粒的空间预测效果略高于非对称对数比转换,而对于黏粒的空间预测,非对称对数比转换方法则表现出较好的预测效果。

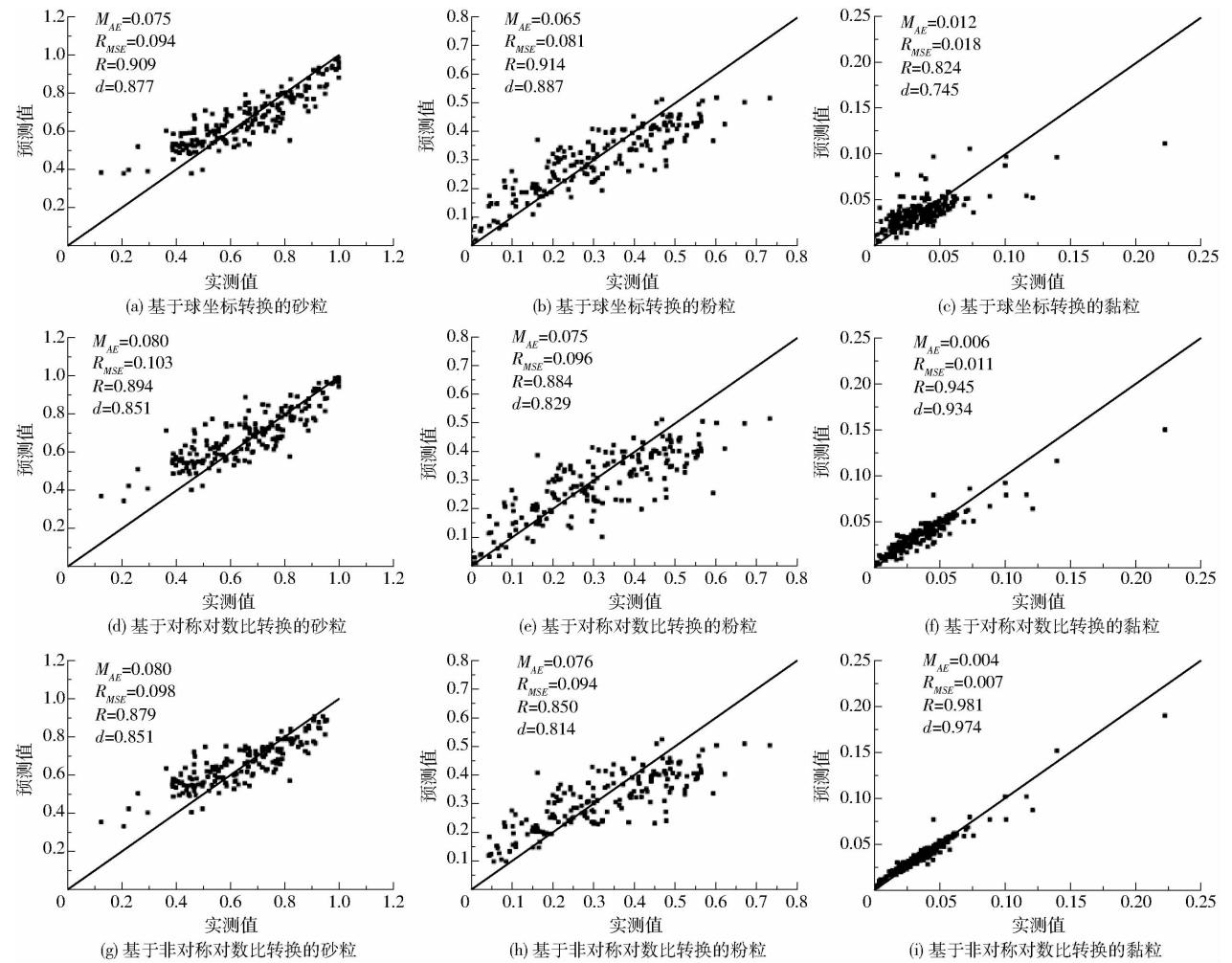


图 4 不同转换方法的交叉验证分析

Fig. 4 Cross-validation analyses of different transformation methods

4 讨论

研究了 3 种转换方法对土壤机械组成普通克里格插值精度的影响,结果表明转换方法的确对土壤机械组成的空间插值精度有一定的影响,这和人

研究结果一致^[5-6,10]。研究结果显示,整体而言,3 种转换方法对土壤机械组成空间插值的插值精度由大到小为黏粒、粉粒、砂粒,这和王等^[28]基于对数比转换的中国黑河流域土壤质地插值结果以及张世文等^[5]基于对数比转换的北京市土壤质地插

值结果相同,均表现为黏粒的插值精度较高,这可能与黏粒含量较小有关;单就球坐标转换方法而言,其对砂粒和粉粒的预测效果较好,而砂粒、粉粒、黏粒含量定和为 1,砂粒、粉粒较接近真实值,从理论上而言黏粒的空间插值精度也应该较高,出现球坐标转换对黏粒插值精度略低的原因可能与用于插值的经球坐标转换后的数据有关。因此以后可针对不同转换方法对土壤机械组成空间插值精度的影响机制做进一步研究。

空间结构影响插值精度,一般来说样点间具有较强的空间自依赖性,其插值精度就比较高^[29]。本研究中经非对称对数比转换的黏粒的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 小于对称对数比转换的黏粒,而且两者均小于经球坐标转换后的两列数据的 $C_0/(C_0 + C_1)$,表明经对数比转换后的黏粒较经球坐标转换后的两列数据具有较强的空间自相关性,与此同时插值结果也表明经非对称对数比转换的黏粒的插值精度较高,预测值与实测值的相关系数达到 0.981,一致性指标达到 0.974,平均绝对误差和均方根误差分别为 0.004 和 0.007,接近于 0,对称对数比转换后的黏粒插值精度仅次于非对称对数比转换,而球坐标转换后的黏粒预测效果最差。对于砂粒和粉粒而言,经球坐标转换后数据的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 较对称对数比转换和

非对称对数比转换后数据的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 均有一定程度的下降,而球坐标转换对砂粒和粉粒的预测效果均有一定的提升,尤其相对于非对称对数比转换方法。因此,可以认为 3 种转换方法对土壤机械组成普通克里格插值精度不同可能是由于转换后用于插值的数据的 $C_0/(C_0 + C_1)$ 不同所影响的。

插值方法是影响插值效果的重要因素^[27,30],有研究表明普通克里格插值方法计算复杂,需要的参数较多,因此其插值精度较低^[30-31],以后可以开展一些 3 种转换方法对其他插值方法插值效果影响的研究。

5 结论

(1)以宁夏银北地区土壤机械组成数据为例,验证了球坐标转换方法和对数比转换方法同样可以满足成分数据空间插值的定额、非负、线性无偏以及最优要求,且球坐标转换方法无需考虑零值,计算量少,是一种简便且直观的转换方法。

(2)比较了球坐标转换和对称对数比转换以及非对称对数比转换方法对土壤机械组成普通克里格插值效果的影响,结果表明,球坐标转换方法对于砂粒和粉粒的预测精度最高,非对称对数比转换方法对于黏粒的空间预测效果最好。

参 考 文 献

- 1 PAWLOWSKY V, OLEA R A, DAVIS J C. Estimation of regionalized compositions: a comparison of three methods [J]. *Mathematical Geology*, 1995, 27(1): 105 - 128.
- 2 DE GRUIJTER J J, WALVOORT D J J, VAN GAMS P F M. Continuous soil maps—a fuzzy set approach to bridge the gap between aggregation levels of process and distribution models [J]. *Geoderma*, 1997, 77(2): 169 - 195.
- 3 ZHANG Shiwen, KONG Weifang, HUANG Yuanfang, et al. Spatial prediction of topsoil texture in a mountain-plain transition zone using univariate and multivariate methods based on symmetry logratio transformation [J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2014, 20(1): 115 - 129.
- 4 ZHANG Shiwen, SHEN Chongyang, CHEN Xiaoyang, 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.
- 5 张世文,王胜涛,刘娜,等. 土壤质地空间预测方法比较 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 332 - 339.
ZHANG Shiwen, WANG Shengtao, LIU Na, et al. Comparison of spatial prediction method for soil texture [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 332 - 339. (in Chinese)
- 6 檀满枝,陈杰. 土壤模糊隶属度不同数据转换方法及其对空间插值结果的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3147 - 3153.
TAN Manzhi, CHEN Jie. Different transforms of fuzzy membership values of sampled soils and theirs influences on resulted interpolation prediction [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3147 - 3153. (in Chinese)
- 7 ODEH I O A, TODD A J, TRIANTAFILIS J. Spatial prediction of soil particle-size fraction as compositional data [J]. *Soil Science*, 2003, 168(7): 501 - 515.
- 8 PAWLOWSKY-GLAHN V, EGOZCUE J J. Spatial analysis of compositional data: a historical review [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 164: 28 - 32.
- 9 SMITH P F, RENNER R M, HASLETT S J. Compositional data in neuroscience: if you've got it, log it! [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2016, 271: 154 - 159.
- 10 李春轩,罗毅,包安明,等. 基于对数比转换的成分数据空间插值研究 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4): 648 - 655.
LI Chunxuan, LUO Yi, BAO Anming, et al. Study on spatial interpolation of compositional data based on log-ratio transformation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(4): 648 - 655. (in Chinese)

- 11 PAWLOWSKY-GLAHN V, EGOZCUE J J. Spatial analysis of compositional data: a historical review [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, 164: 28–32.
- 12 赵江涛,黄薇,王惠文. 两种成分数据预测建模方法的比较研究[J]. *北京航空航天大学学报:社会科学版*,2003, 16(2): 37–40.
- ZHAO Jiangtao, HUANG Wei, WANG Huiwen. Contrastive study on two forecast modeling methods of compositional data [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: Social Sciences Edition*, 2003, 16(2): 37–40. (in Chinese)
- 13 WANG Huiwen, LIU Qiang, HENRY M K, et al. A hyperspherical transformation forecasting model for compositional data [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(2): 459–468.
- 14 赵文娟. 宁夏银北地区盐渍土水盐运移数值模拟研究[D]. 银川:宁夏大学, 2014.
- ZHAO Wenjuan. The study of numerical simulation application in soil water-salt flow in Yinbei region of Ningxia Province [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014. (in Chinese)
- 15 AITCHISON J. The statistical analysis of compositional data [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 1982, 44(2): 139–177.
- 16 AITCHISON J. The statistical analysis of compositional data [M]. London: Chapman and Hall, 1986:58–61.
- 17 檀满枝,密术晓,李开丽,等. 不同插值方法对成分数据空间预测结果的影响[J]. *土壤*, 2009, 41(6): 998–1003.
- TAN Manzhi, MI Shuxiao, LI Kaili, et al. Influences of different interpolation methods on spatial prediction of compositional data [J]. *Soils*, 2009, 41(6):998–1003. (in Chinese)
- 18 瞿明凯. 几种地统计学方法在县域土壤空间信息处理上的应用与研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- QU Mingkai. Application and study of several geostatistical methods in soil spatial information processing at county scale [D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 19 LIU Ruimin, CHEN Yaxin, SUN Chengchun, et al. Uncertainty analysis of total phosphorus spatial-temporal variations in the Yangtze River Estuary using different interpolation methods [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(2): 68–75.
- 20 GUMIERE S J, LAFOND J A, HALLEMA D W, et al. Mapping soil hydraulic conductivity and matric potential for water management of cranberry: characterization and spatial interpolation methods [J]. *Biosystems Engineering*, 2014, 128: 29–40.
- 21 XIE Yunfeng, CHEN Tongbin, LEI Mei, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: accuracy and uncertainty analysis [J]. *Chemosphere*, 2011, 82(3): 468–476.
- 22 叶回春,黄珊瑜,张世文,等. 土壤有机碳空间变异性对采样密度的响应研究[J/OL]. *农业机械学报*,2014,45(12): 215–222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141232&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.032.
- YE Huichun, HUANG Shanyu, ZHANG Shiwen, et al. Spatial variability response of soil organic carbon to sampling density change [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(12): 215–222. (in Chinese)
- 23 WILLMOTT C J. Some comments on the evaluation of model performance [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11): 1309–1313.
- 24 张娜,张栋良,屈忠义,等. 内蒙古河套灌区区域土壤质地空间变异分析——以解放闸灌域为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(12):155–163.
- ZHANG Na, ZHANG Dongliang, QU Zhongyi, et al. The spatial variation of soil texture in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resource and Environment*, 2015, 29(12): 155–163. (in Chinese)
- 25 王卫华,李建波,王铎,等. 土壤热特性参数空间变异性与拟合方法研究[J/OL]. *农业机械学报*,2015,46(4):120–125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150418&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.018.
- WANG Weihua, LI Jianbo, WANG Shuo, et al. Spatial variability of soil thermal parameters and its fitting method [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(4):120–125. (in Chinese)
- 26 张秀珍,刘秉儒,詹硕仁. 宁夏境内 12 种主要土壤类型分布区域与剖面特征[J]. *宁夏农林科技*, 2011, 52(9):48–50,63.
- 27 MIRZAEI R, SAKIZADEH M. Comparison of interpolation methods for the estimation of groundwater contamination in Andimeshk-Shush Plain, Southwest of Iran [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(3): 2758–2769.
- 28 WANG Zong, SHI Wenjiao. Mapping soil particle-size fractions: a comparison of compositional Kriging and log-ratio Kriging [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 526–541.
- 29 KRAVCHENKO A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5): 1564–1571.
- 30 LIU Ruimin, CHEN Yaxin, SUN Chengchun, et al. Uncertainty analysis of total phosphorus spatial-temporal variations in the Yangtze River Estuary using different interpolation methods [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(2): 68–75.
- 31 QU Linglu, XIAO Huayun, ZHENG Nengjian, et al. Comparison of four methods for spatial interpolation of estimated atmospheric nitrogen deposition in South China [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, 24(3): 2578–2588.