

锡林河流域土壤有机碳空间变异分析

席小康, 朱仲元, 郝祥云

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:为了探索锡林河流域土壤有机碳的空间变异规律,基于半方差函数理论和普通克里格插值研究了0—10 cm, 20—30 cm, 40—50 cm土壤有机碳变异特征及分布格局。结果表明,(1) 0—10 cm, 20—30 cm, 40—50 cm层土壤有机碳的最优拟合模型依次是高斯模型、高斯模型、指数模型。(2) 随着土层深度的增加,土壤有机碳空间分布相关性增强,0—10 cm层土壤有机碳存在中等空间分布相关性,20—30 cm与40—50 cm层土壤有机碳具有强烈的空间分布相关性,自相关距离分别为25.81 km, 20.26 km, 45.00 km。(3) 各向异性分析表明:各方向土壤有机碳变异程度随着土层深度增加而减弱,同层不同方向半方差变化明显,各向异性显著,不同层西南—东北45°方向以及东南—西北135°方向半方差变化最为明显,而各层45°方向变异程度却表现出相似性。(4) 各层土壤有机碳分布具有一致性,流域南部边缘到东部以及东北部为土壤有机碳含量较高区域,北部、西北部以及上游的中南部是全流域土壤有机碳含量最低的区域,西部以及西南部土壤有机碳含量处于相对中等水平,流域地形与植被分布特征决定了土壤有机碳这种分布特点。

关键词:土壤有机碳; 空间变异; 地统计学; 各向异性

中图分类号: S153.6⁺21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0097-08

Spatial Variability of Soil Organic Carbon in Xilin River Basin

XI Xiaokang, ZHU Zhongyuan, HAO Xiangyun

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to explore the spatial variability of soil organic carbon in the Xilin River Basin, the variation characteristics and distribution pattern of 0—10 cm, 20—30 cm, 40—50 cm soil organic carbon were studied based on semivariance function theory and ordinary Kriging interpolation. The results showed that: (1) the best fitting models of soil organic carbon in 0—10 cm, 20—30 cm and 40—50 cm layers were Gaussian model, Gaussian model and Exponential model; (2) with the increase of soil depth, the spatial distribution of soil organic carbon increased, the spatial distribution of soil organic carbon in 0—10 cm layer was moderate, and the spatial distribution of soil organic carbon in 20—30 cm and 40—50 cm layers had a strong spatial distribution correlation and autocorrelation distances were 25.81 km, 20.26 km and 45.00 km, respectively; (3) anisotropy analysis showed that the variation degree of soil organic carbon in all directions was weakened with the increase of soil depth, and the half-variance of the same layer changed significantly in different directions, and the anisotropy was significant, the 45° direction from southwest to northeast and the southeast, the variance of the 45° direction showed the similarity; (4) the distribution of soil organic carbon in each layer was consistent; the soil organic carbon contents were higher in the southern part of the basin, in the north and north of the basin, and the middle and the south of the upper part of the basin. Soil organic carbon contents in the west and southwest was at the relatively moderate status, and topographic and vegetation distribution characteristics determine the distribution characteristics of soil organic carbon.

Keywords: soil organic carbon; spatial variability; geostatistics; anisotropy

土壤是植被生长的重要载体,由于受母质、气候、生物、地形、时间和人为因素共同作用而具有高度的空间变异性^[1-2]。土壤养分空间变异是土壤特性空间

变异特征的重要组成部分^[3]。因此,对土壤养分空间变异的研究可为土壤资源合理利用、土壤肥力评价、土壤养分管理以及颁布因地制宜的生态恢复政策提

供基础和依据。目前对于土壤特性的空间变异研究主要集中在不同方法、不同研究对象、不同尺度、不同土地类型与地形因子上土壤养分的空间变异特征。从研究方法来看,经典统计学法、地统计学法、空间插值法、随机模拟法、时序分析法、分形方法等是研究土壤有机碳空间变异的主要方法,但在所有的研究方法中地统计分析被认为是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律最广泛最有效的方法之一,它不仅能够揭示土壤特性分布规律及其变异特征,而且能够解释自然和人为活动对土壤特性空间变异的影响^[4]。从研究对象来看,国内外对土壤特性变异的研究已经涉及到土壤物理化学性质以及土壤重金属等的各个方面,例如土壤饱和导水率、渗透率、土壤容重、机械组成等土壤物理性质;有机碳、氮、磷、钾等土壤养分指标;汞、镉、铅、砷等重金属污染源^[5-6]。对于土壤养分空间变异的尺度方面,在田间小尺度上,张法升等和Mabit and Bernard以农田土壤为研究对象,运用地统计学分析了土壤有机质的变异性与空间分布规律以及在不同取样幅度和间距下土壤有机质空间变异大小^[7-8]。在流域尺度上,张春霞等研究了黄土高原台塬区小流域尺度上多种土壤养分指标分布特征并比较了不同坡度和土地利用方式下的土壤养分分布趋势^[9]。王军等以安塞县大南沟小流域为研究对象,采用克里格空间插值得到了土壤全氮、全磷、有效氮和有效磷等养分指标的空间分布格局^[10]。在区域尺度上,刘吉平^[11],徐媛^[12],陈伏生^[13]等分别对黄土高原土壤有机碳、榆林市农田土壤碱解氮、森林土壤无机氮、沙地土壤全氮的空间变异性以及分布特征进行了研究。近年来,对锡林郭勒草原土壤养分的研究得到了许多成果,许中旗等研究了放牧、开垦和禁牧对典型草原土壤N、P、K以及土壤有机质养分含量的影响^[14];郑云玲研究表明围栏内的各样地土壤全氮、全磷含量以及牧草氮、磷含量基本高于围栏外^[15];刘忠宽等在锡林河中游二级台的典型草原上,对不同放牧率草地休牧3 a后的土壤养分空间异质性和植物群落数量变化特征进行了研究^[16]。

由于受空间、时间、人力、物力的限制,对土壤特性变异研究多集中在小流域与小尺度范围内,对锡林郭勒草原土壤养分总体分布及综合评价尚未见报道,地统计学分析方法是否适合在草原流域上应用尚不明确,此外大多土壤特性变异研究缺乏对不同方向 and 不同深度变异程度差异的分析。针对以上问题,在实地调查与室内试验分析的基础上,运用地统计分析研究了锡林河流域土壤有机碳在不同土层深度、不同方向上的变异规律及空间分布特征。

1 研究区概况

锡林河属于内蒙古草原典型内陆河,发源于赤峰市克什克腾旗,流域全长268 km,地理位置在43°26′—44°39′N,115°32′—117°12′E,自东南流向西北,最终自然消失在查干诺尔湿地,全流域面积10 542 km²。地势东南高西北低,东南部的嘎顺乌拉峰是流域的最高处,海拔达1505.6 m,最低处位于西北部的锡林河下游,海拔不足900 m,全流域相对高差达600 m。流域以高平原为主,多种地形地貌共存,分别为岗地与山丘、河谷、塔拉、熔岩台地、风成沙地以及扇形地等6种类型。流域土壤呈显著的地带性分布,由东南向西北依次为过渡性红砂土、石灰性黑钙土、石灰性红砂土、松软潜育土、淋溶性栗钙土、石灰性黑土、普通栗钙土等。该流域西北地区主要为普通栗钙土,为流域最干旱的土壤类型,流域中部分布着大量的淋溶性栗钙土,流域东部的丘陵地区以及南部玄武岩熔岩台地主要分布着石灰性黑钙土,它是全流域最湿润的土壤类型^[17]。

根据中国地面气候资料日值数据集锡林浩特站(43°57′N,116°07′E)1958—2015年的逐日气象资料统计表明:流域多年平均气温2.68℃,春季多年平均气温3.65℃,夏季多年平均气温19.21℃,秋季多年平均气温2.32℃,冬季多年平均气温零下16.70℃^[18]。

流域植被以草地为主,占流域总面积的89%。主要区系成分为达乌里—蒙古种,旱生草本植物。该流域共有种子植物629种,分属于74科,291属。其中裸子植物有4属,6种;被子植物有287属,623种。

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

2015年7月31—8月7号根据植被类型、地形、土壤类型等差异,在研究区选取55个采样点,在每个采样点开挖1个剖面,除去表层覆盖物后,分别在0—10 cm,20—30 cm,40—50 cm处用塑封袋取混合均匀的原状土,取样完成后将样品带回实验室进行土壤物理化学特性测试。采集的样品经室内自然风干后,挑拣出参杂的植物根系残体物,然后碾碎过筛,根据(GB7857—87)采用重铬酸钾氧化—外加热法测定土壤有机碳含量。

2.2 研究方法

将符合正态分布的各层土壤有机碳数据导入GS+9.0地统计分析软件,根据实测的半方差函数散点图,分别运用线性模型(Linear Model),球状模型(Spherical Model),指数模型(Exponential Model),高斯模型(Gaussian Model)进行拟合计算,根据残差

平方和(RSS)与决定系数 R^2 来得到半方差函数的最优拟合模型,以最优拟合模型提供的参数进行普通克里格插值,并采用交叉验证法判断模拟精度。

(1) 地统计学分析及半方差函数。地统计学借助半方差函数来揭示土壤特性的空间结构特征,反映土壤性质的不同距离观测值之间的变化以及通过对各个方向上的半方差函数研究土壤特性是否具有各向异性^[19]。该函数有 3 个重要参数:块金方差(C_0),结构方差(C),变程(Range),其中 $C_0 + C$ 称为基台值, C_0 称为块金值,反映由测量误差、种植方式、施肥等随机部分引起的空间变异性;结构方差 C 反映由空间地形、气候、土壤母质等空间自相关部分引起的结构性变异。通常情况下,采用空间异质比即块金值(C_0)与基台值($C_0 + C$)的比值来反映土壤特性的空间相关性,该比值越低,说明随机因素引起的空间变异程度较小,即空间自相关部分导致了土壤特性的空间变异;反之,该比值越大,随机因素导致的变异占总变异的比例就越高,引起的空间变异程度较大。当 $C_0/(C_0 + C) \geq 0.75$ 时,研究变量有较弱的空间分布相关性,当 $0.25 < C_0/(C_0 + C) < 0.75$ 时,变量具有中等空间分布相关性,当 $C_0/(C_0 + C) \leq 0.25$ 时,变量具强烈的空间分布相关性^[20-21]。变程表示变量的最大相关距离,在变程范围以内,土壤特性观测值之间具有相关性,且随着间距的变大相关性减弱,当间距距离大于变程时,土壤特性空间不相关。

(2) 普通克里格插值及交叉验证。利用最优拟合的半方差函数参数对各层土壤有机碳进行普通克里格插值,并采用交叉验证法评价拟合效果,最后利用插值结果分析锡林河流域不同深度土壤有机碳含量的空间分布。并采用拟合相关图法、相关系数 r 、平均偏差 MBE、均方根误差 RMSE 评价交叉验证结果。

2.3 数据处理平台

本文利用 SPSS 17.0 软件对数据分布进行柯尔莫哥洛夫—斯米诺夫(K-S 检验),当 $p > 0.05$ 时,表明数

据服从正太分布;当 $p < 0.05$,表明数据不服从正态分布。利用 GS+9.0 地统计分析软件进行半变异函数拟合和地统计学分析。插值分析采用 ArcGIS 10.2。

3 结果与分析

3.1 土壤有机碳描述性统计分析

根据 55 个采样点的 0—10 cm,20—30 cm,40—50 cm 层土壤样品有机碳含量数据,采用经典统计学分析方法得到表 1 所示统计结果。锡林河流域不同层土壤有机碳含量具有很大的差异,0—10 cm,20—30 cm,40—50 cm 土层有机碳变化范围依次为 1.18~30.17 g/kg,0.29~21.57 g/kg,0.49~16.11 g/kg,均值为 11.35 g/kg,7.59 g/kg,6.35 g/kg,即土壤有机碳含量随着土层深度的增加而降低。由单因素方差分析(ANOVA)可知,不同层土壤有机碳含量具有显著差异($p < 0.05$),表层 0—10 cm 有机碳含量显著大于其他两层,而 20—30 cm 与 40—50 cm 层有机碳含量差异不显著($p = 0.09$),分析认为这主要是因为表层土壤有大量植被的凋落物、植被根系残留物积累和土层良好的透气性所致,这与史激光对锡林郭勒草地土壤主要养分状况及评价结果一致^[22]。

表 1 中 CV 值表明各层土壤有机碳含量变异系数较为相近,均属于中等变异程度,在垂直方向上,随着土层深度的增加变异系数降低,这与已有的一些研究成果相同^[23-25],因为表层土壤相比于深层土壤更容易受到人类活动影响且更敏感,加之流域内植被覆盖度差异明显,故而表层土壤有机碳具有更大的空间变异性。

地统计学分析的前提是输入数据符合正态分布,当输入数据不符合正态分布时,可能会导致比例效应,使得变异函数产生畸变,从而导致基台值($C_0 + C$)和块金(C_0)变大,这将影响插值结果的准确性。所以原始数据不符合正态分布时需将其进行对数转换或博克斯—考克斯变换^[26]。从 K-S 检验结果可知有机碳含量数据服从正态分布,可以进行地统计学分析与插值分析。

表 1 不同土层土壤有机碳含量的描述性统计结果

层位/ cm	样本数	最小值/ (g · kg ⁻¹)	最大值/ (g · kg ⁻¹)	平均值/ (g · kg ⁻¹)	标准差	峰度	偏度	CV/ %	K-S 检验
0—10	55	1.18	30.17	11.35 a	6.29	0.528	0.860	55.42	0.231
20—30	55	0.29	21.57	7.59 b	4.17	1.426	1.026	54.99	0.199
40—50	55	0.49	16.11	6.35 bc	3.47	0.430	0.765	54.60	0.483

注:均值后不同字母表示不同土层间差异显著($p < 0.05$)。

3.2.1 土壤有机碳的变异性分析 由于土壤数据不是等间距的网格数据,所以在进行半方差计算时需要

对最大步长(Active lag Distance)和分类步长间距(Lag Class Distance)进行参数设置。若点对之间的

距离小于分类步长间距,则将该步长范围内所有点对距离的平均值作为分离距离,并计算该组数据的半方差。因此,最大步长一定时,分类步长间距增加会导致分类组数的减少。随着分离距离的增加变异函数

值所起的作用逐渐减弱,为将分离距离控制在有意义的研究范围内,一般取最大步长 $h=L/2$, L 为采样点间的最大距离。本文采样点最大间距为 146 095.42 m,故选取最大步长值 73 047.71 m 进行半方差分析。虽然适当减小分类步长间距可能会提高模型拟合精度,但根据样本数量以及每 1 个分类步长间距上用来计算样本半方差函数的点对数量,决定了分类步长间距取值不宜过小,基于以上原则,在对土壤样本数据数据分析时,经过多次分类步长间距参数设置的比较,确定分类步长间距为 8 869.85 m,得到 8 个分类步长组。

根据 GS+9.0 对样本半方差散点图的拟合计算结果(表 2)可得,不同层土壤有机碳的最佳拟合模型不同,0—10 cm 与 20—30 cm 层有机碳的最佳拟合模型是高斯模型,决定系数分别为 0.842,0.851,40—50 cm 层的最佳拟合模型是指数模型,决定系数达到 0.906,表明用该两种模型可以很好的反映这 3 层土壤有机碳的空间结构特征。

从上到下各层土壤有机碳块金值与基台的比值 $C_0/(C_0+C)$ 分别为 29.01%,17.76%,14.17%,只有 0—10 cm 土壤有机碳的 $C_0/(C_0+C)$ 大于 25%,即该

层土壤有机碳存在中等空间分布相关性,这种相关性表现在 25.81 km 的范围内,超出该范围空间分布相关性失效,随机因素与结构因素共同导致了该层土壤有机碳含量的空间变异;20—30 cm 与 40—50 cm 土壤有机碳的 $C_0/(C_0+C)$ 均小于 25%,该两层土壤有机碳具有强烈的空间分布相关性,这种相关性分别表现在 20.26 km 与 45.00 km 的范围内,主要是结构因素导致了这两层土壤有机碳含量的空间变异,而随机因素影响很小。由各层土壤有机碳的变程来看 40—50 cm 层比 0—10 cm 与 20—30 cm 层具有更大的空间变异范围。从整体来看,随着土层深度的增加, $C_0/(C_0+C)$ 值逐渐减小,空间分布相关性增强,导致土壤有机碳空间变异的因素由随机性因素与结构性因素共同作用到结构性因素占主导地位的转化。从传统的经典统计学来看,三层土壤有机碳含量具有相似的变异系数 CV,即变异程度相当。但从地统计学来看,0—10 cm 层有机碳的总变异(基台值)是 20—30 cm 和 40—50 cm 层有机碳含量总变异的 2 倍多,表层有机碳随机变异(块金值)更是远远大于其他两层。

表 2 不同土层土壤有机碳(SOC)含量的半方差函数模型与参数

层位/ cm	拟合模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金值/基台值 $C_0/C_0+C/\%$	变程/ km	拟合度 R^2	残差 RSS
0—10	高斯模型	11.48	39.57	29.01	25.81	0.842	89.9
20—30	高斯模型	3.68	17.76	20.72	20.26	0.851	14.9
40—50	指数模型	0.93	14.17	6.56	45.00	0.906	6.3

地统计学上将土壤养分在相同间距不同方向上存在不同半方差值的现象称之为各向异性,相反,在相同间距内,半方差值不随方向变化而变化的现象称之为各项同性^[27]。以此为依据,对土壤养分不同方向变异程度进行分析,在分析各向异性时,以 0°方向为始,45°为间隔,分为东—西 0°方向、西南—东北 45°方向、南—北 90°方向、东南—西北 135°方向 4 个方向。

各层土壤有机碳各向同性分析:从各层土壤有机碳含各向同性半方差函数拟合图 1 来看,40—50 cm 层具

有与 0—10 cm,20—30 cm 层不同的半方差拟合函数,但都具有相同的变化趋势,半方差函数值随着空间距离的增加而增大,当距离增加到一定程度后,函数值趋于稳定。从拟合曲线来看,当步长值为零时,各层半方差大小依次为:0—10 cm 层>20—30 cm 层>40—50 cm 层,说明随着土层深度的增加,随机性因素导致的土壤有机碳空间变异在减弱;在一定步长范围内,增加相同步长时,半方差变化范围随着土层深度增加而减小,即土壤有机碳变异程度随着土层深度增加而减弱。

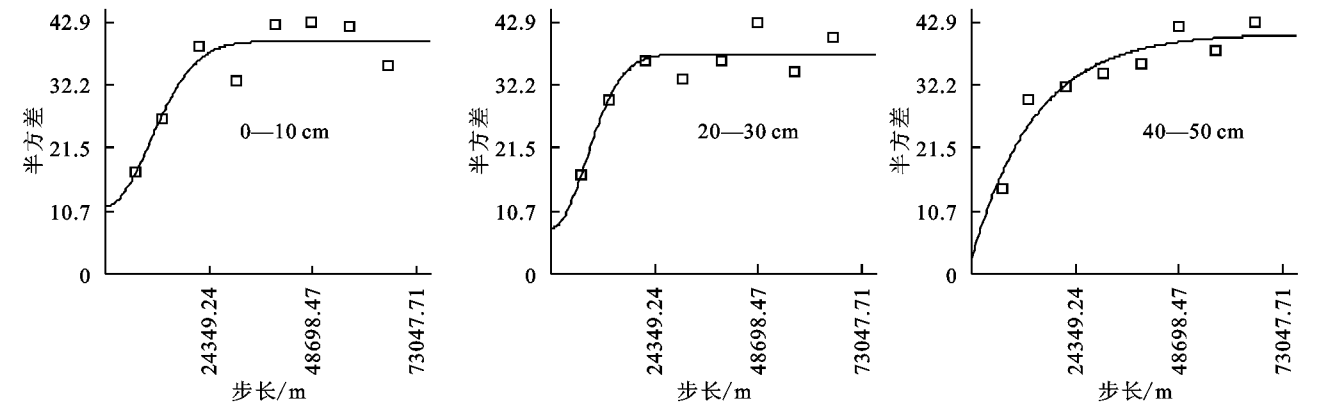


图 1 土壤有机碳各向同性半方差函数

0—10 cm 土壤有机碳各向异性分析:根据 0—10 cm 土壤有机碳 0° , 45° , 90° , 135° 方向的半方差函数图(图 2),有机碳在南—北 90° 方向上的变异程度明显小于其他 3 个方向,表明东—西 0° 方向、西南—东北 45° 方向以及东南—西北 135° 方向的变异较为复杂,这可能是由于流域河流走向以及土壤类型带状分布特征所致。在 45° 和 90° 方向上,土壤有机碳半方差随步长具有相似的变化趋势,表现为同性。在 135° 方向上,土壤有机碳变异程度大而复杂,半方差随步长增加而高低交替,这可能是由草地类型、土壤类型、

地形等多重因素影响所致。

20—30 cm 土壤有机碳各向异性分析:根据 20—30 cm 层土壤有机碳 0° , 45° , 90° , 135° 方向的半方差函数图(图 3),20—30 cm 层各方向土壤有机碳变异程度相比 0—10 cm 层明显减弱,南—北 90° 方向上的变异程度明显小于其他 3 个方向。在 45° 方向上,土壤有机碳半方差随步长具有线性的变化趋势,但在步长约为 48 km 时半方差值较大。在 0° 和 135° 方向上,土壤有机碳变化趋势同 0—10 cm 土层相似。

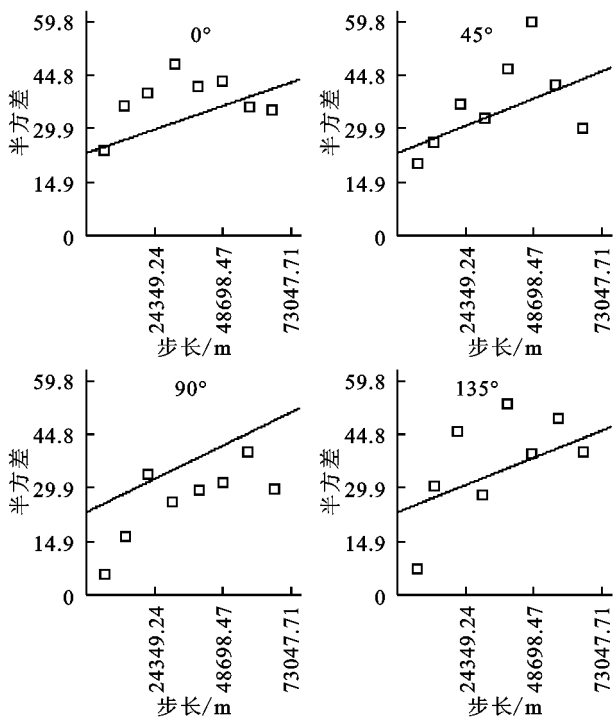


图 2 0—10 cm 层土壤有机碳各向异性半方差函数

40—50 cm 土壤有机碳各向异性分析:40—50 cm 土壤有机碳各向异性分析:根据 40—50 cm 层土壤有机碳 0° , 45° , 90° , 135° 方向的半方差函数图(图 4),40—50 cm 层各方向土壤有机碳变异程度比 0—10 cm 层和 20—30 cm 层明都要弱。在 0° 和 90° 方向上半方差值变化较小,变化趋势不明显,变异程度较低,可能是该方向地形简单、水热差异较小所致。在 45° 与 135° 方向上,土壤有机碳半方差随步长总体上具明显上升变化趋势,但 45° 方向呈现指数形势增长,而 135° 方向在步长较小时变异程度明显,随着步长增加逐渐趋于稳定,这可能与水热、土壤类型、地形等变化的方向性有关。

各层土壤有机碳各向异性分析表明:随着土层深度增加,各方向土壤有机碳变异程度逐渐减弱,但各层不同方向变方差变化明显,各向异性显著,尤其是西南—东北 45° 方向以及东南—西北 135° 方向表现的最为明显,在不同层同一方向上,各层 45° 方向变

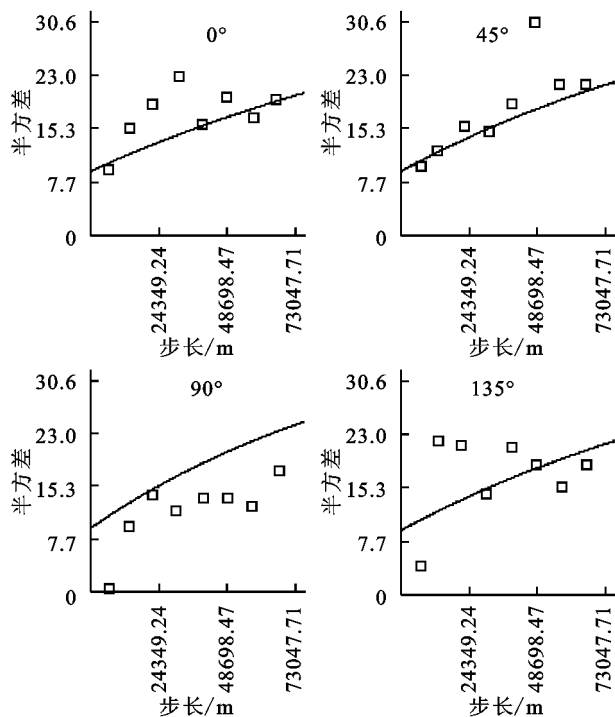


图 3 20—30 cm 层土壤有机碳各向异性半方差函数

异程度表现出一致性。

3.2.2 有机碳空间插值结果有效性检验 0—10 cm, 20—30 cm, 40—50 cm 土壤有机碳实测值与模拟值的拟合相关图见图 5,三者的实测值与模拟值基本落在 45° 线周围,说明各层土壤插值结果具有较好的一致性。从定性的角度分析,40—50 cm 层土壤有机碳的实测值与模拟值间的一致性最好,20—30 cm 层次之,0—10 cm 层是最差的。

由表 3 可知,三层土壤有机碳的插值结果与实测值之间的相关关系(r)都较高且达到极显著相关水平($p < 0.01$),且随着深度增加相关性越好。平均偏差(MBE)介于 0.1 与 0.25 之间,插值结果稍偏大于实测值,且随着深度增加偏离程度越小。各层均方根误差 RMSE 稍微偏大,大介于 1.7 与 3.5 之间,0—10 cm 层 $>$ 20—30 cm 层 $>$ 40—50 cm 层。以上表明,各层土壤有机碳插值结果基本准确可靠,但从插值精度来说,40—50 cm 层最好,20—30 cm 层次之,0—10 cm 层稍差。

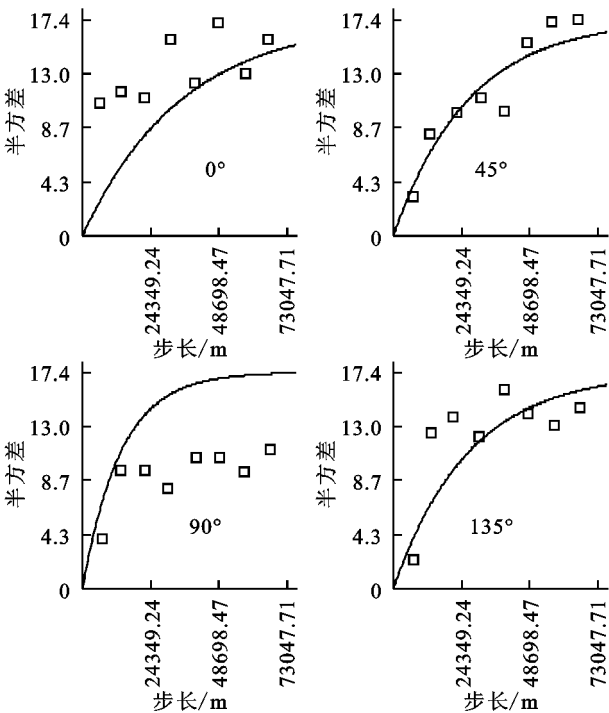
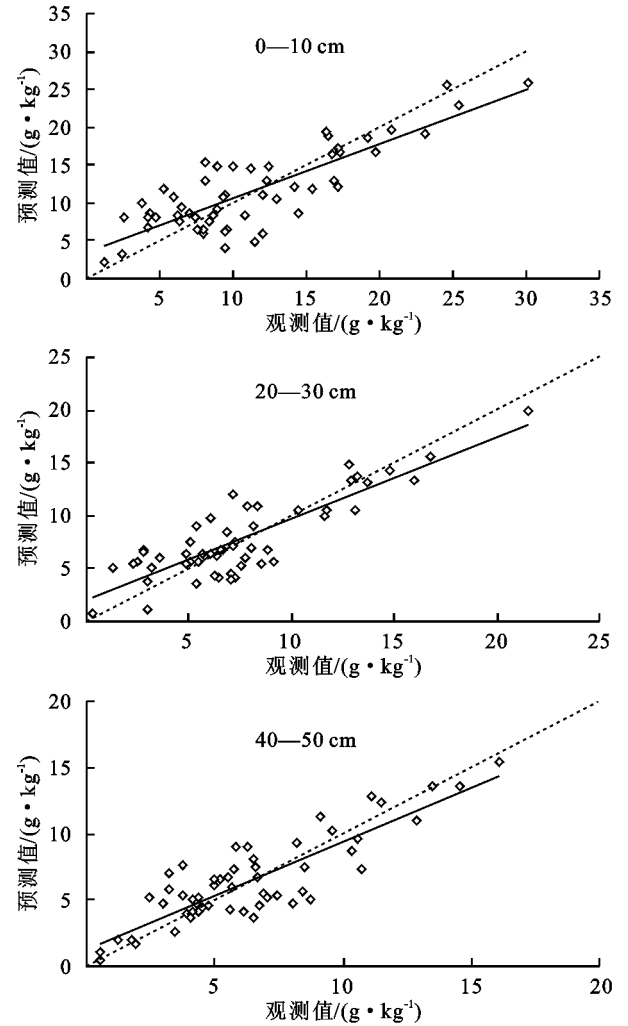


图 4 40—50 cm 层土壤有机碳各向异性半方差函数

3.3 土壤有机碳的空间分布特征

根据各层土壤有机碳空间分布图(图 6)可以看出,不同土层深度土壤有机碳含量具有相似的块状和带状分布特点,但总体来看各层有机碳含量都相对较低,流域内绝大部分区域有机碳含量 $<11.68\text{ g/kg}$,且随着深度增加有机碳含量明显降低。流域南部边缘到东部以及东北部为土壤有机碳含量较高区域,北部、西北部以及上游的中南部是全流域土壤有机碳含量最低的区域,西部以及西南部土壤有机碳含量处于相对中等水平。流域地形与植被分布特征决定了土壤有机碳这种分布特点,流域南部边缘、东部以及东北部是全流域海拔最高的地区,水分相对充沛,植被覆盖度较高,人类活动较少,地表残积物积累较多,减少了有机碳的流失并利于积累;北部、西北部以及上游的中南部是流域海拔最低的地区,其中上游的中南部更是锡林浩特市区周边,该区域人类活动剧烈,放

牧强度大,草地沙化严重,降低了生态系统的生产力,不利于有机质积累且流失严重。



注:图中虚线为 45°线,实线为线性回归线。

图 5 各层土壤有机碳模拟值与实测值的拟合相关

表 3 土壤有机碳插值验证参数

层位/cm	相关系数 r	平均偏差	均方根误差
0—10	0.832 **	0.224	3.473
20—30	0.852 **	0.205	2.186
40—50	0.859 **	0.118	1.791

注: ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

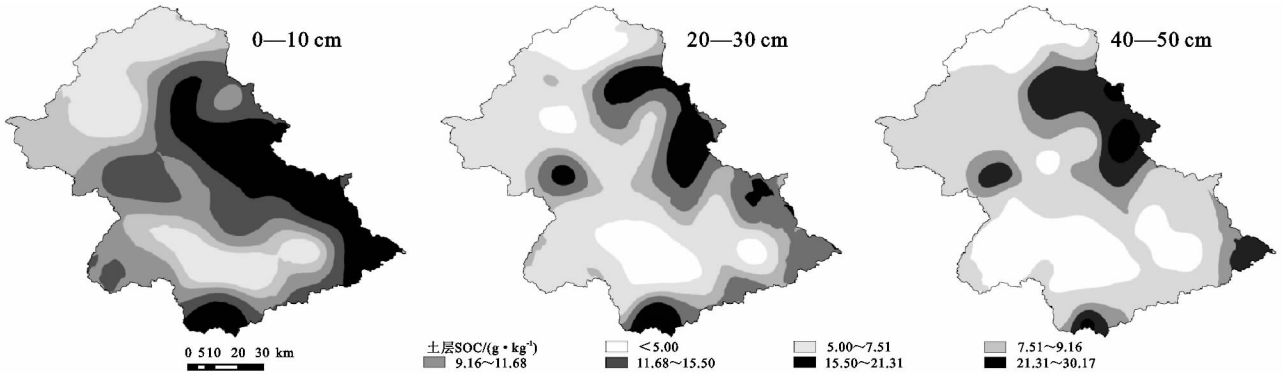


图 6 各层土壤有机碳含量空间分布

4 讨论与结论

土壤有机碳含量是反映草原土壤肥力的重要指标,它的分布特征及变化趋势对植物群落类型和草地生产力具有重要影响,本文通过各层土壤有机碳的地统计分析以及普通克里格插到以下结论:

锡林河流域不同层土壤有机碳含量都较低,0—10 cm 层有机碳含量显著大于其他两层($p < 0.05$),而 20—30 cm 与 40—50 cm 土层有机碳含量差异不显著($p > 0.05$)。CV 值表明各层土壤有机碳含量均属于中等变异程度,且随着土层深度的增加变异程度降低。地统计分析表明:0—10 cm,20—30 cm,40—50 cm 层土壤有机碳的最佳拟合模型依次是高斯模型、高斯模型、指数模型,决定系数分别为 0.842,0.851,0.906。

从空间分布相关性来看,0—10 cm 层土壤有机碳存在中等空间分布相关性,这种相关性表现在 25.81 km 的范围内,随机因素与结构因素共同导致了该层土壤有机碳含量的空间变异;20—30 cm 与 40—50 cm 层土壤有机碳具有强烈的空间分布相关性,这种相关性分别表现在 20.26 km 与 45.00 km 的范围内,主要是结构因素导致了这两层土壤有机碳含量的空间变异,而随机因素影响很小。从整体来看,随着土层深度的增加,空间分布相关性增强,导致土壤有机碳空间变异的因素由随机性因素与结构性因素共同作用到结构性因素占主导地位的转化。各层土壤有机碳各向异性分析表明:随着土层深度增加,各方向土壤有机碳变异程度逐渐减弱,但各层不同方向半方差变化明显,各向异性显著,尤其是西南—东北 45°方向以及东南—西北 135°方向表现的最为明显,在不同层同一方向上,各层 45°方向变异程度表现出一致性。

交叉验证结果表明:各层土壤插值结果具有较好的一致性,但预测结果稍偏大且随着深度增加偏离程度越小。各层均方根误差 RMSE 稍微偏大,总体来说,40—50 cm 层插值精度最好,20—30 cm 层次之,0—10 cm 层稍差,这与表层土壤受到较大随机因素影响所致。各层均方根误差 RMSE 稍微偏大可能是由采样时不是等间距采样而导致一些采样点间距偏大所致。各层土壤有机碳分布具有一致性,流域南部边缘到东部以及东北部为土壤有机碳含量较高区域,北部、西北部以及上游的中南部是全流域土壤有机碳含量最低的区域,西部以及西南部土壤有机碳含量处于相对中等水平。流域地形与植被分布特征决定了

土壤有机碳这种分布特点。

大量研究表明土壤有机碳含量受到土壤物理化学性质、地形、植被,气候以及人类活动等众多因素共同作用。例如土壤容重和机械组成决定着土壤的物理结构、排水性能以及透气状况,进而影响土壤有机碳的转化过程^[28-29]。海拔与坡度等地形因素影响局部水热平衡以及土壤侵蚀程度,从而影响土壤有机碳的输入与输出过程^[30]。充沛的降雨有利于植被生长,从而使土壤获得更多有机质^[31]。年均气温控制土壤微生物活动,影响土壤有机碳分解速率^[32]。此外大量研究表明,土壤碳素和氮素在复杂的生物地球化学过程中紧密联系在一起^[33]。氮素是植被生长重要的营养元素之一,很大程度上影响植被的生长状况,进而影响枯落物以及根系分泌物进入土壤的有机物的质量和数量,此外导致土壤有机碳含量差异的因素还有很多。锡林河流域土壤、植被类型多样、草地利用方式与管理手段也各不相同。本研究野外采样过程中,只考虑了土壤类型的差异,植被类型和盖度差异也只是通过目测得到。并且没有系统分析导致影响土壤有机碳空间分布差异的影响因素。今后,需要更加系统和长期的研究,全面的揭示各类环境因素对土壤有机碳空间变异的影响。

参考文献:

- [1] Mzuku M, Khosla R, Reich R, et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(5):1572-1579.
- [2] 刘付程,史学正,于东升,等.太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征[J].地理研究,2004,23(1):63-70.
- [3] 孔祥斌,张凤荣,齐伟,等.集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响:以河北省曲周县为例[J].地理学报,2003,58(3):333-342.
- [4] 张国耀,程先富,鲍伟佳,等.小流域土壤有机质和全磷空间变异分析:以安徽省舒城县龙潭小流域为例[J].应用与环境生物学报,2011,17(2):169-173.
- [5] 程先富,史学正,于东升,等.江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[J].应用与环境生物学报,2004,10(1):64-67.
- [6] 曹尧东,孙波,宗良纲,等.丘陵红壤重金属复合污染的空间变异分析[J].土壤,2005,37(2):140-146.
- [7] 张法升,刘作新,张颖,等.农田土壤有机质空间变异的尺度效应[J].中国科学院研究生院学报,2009,26(3):350-356.
- [8] Mabit L, Bernard C. Spatial distribution and content of soil organic matter in an agricultural field in eastern Canada, as

- estimated from geostatistical tools[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010,35(3):278-283.
- [9] 张春霞,郝明德,王旭刚,等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分分布特征[J]. *水土保持研究*, 2003,10(1):78-80.
- [10] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. *生态学报*, 2002,22(8):1173-1178.
- [11] 刘吉平,刘佳鑫,于洋,等. 不同采样尺度下土壤碱解氮空间变异性研究:以榆树市农田土壤为例[J]. *水土保持研究*, 2012,19(2):107-109.
- [12] 徐媛,张军辉,韩士杰,等. 长白山阔叶红松林土壤无机氮空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2010(7):1627-1634.
- [13] 陈伏生,曾德慧,陈广生. 土地利用变化对沙地土壤全氮空间分布格局的影响[J]. *应用生态学报*, 2004,15(6):953-957.
- [14] 许中旗,闵庆文,王英舜,等. 人为干扰对典型草原生态系统土壤养分状况的影响(1)[J]. *水土保持学报*, 2006,20(5):38-42.
- [15] 郑云玲. 封育对典型草原牧草及土壤养分的恢复效应[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2008.
- [16] 刘忠宽,汪诗平,陈佐忠,等. 不同放牧强度草原休牧后土壤养分和植物群落变化特征[J]. *生态学报*, 2006,26(6):2048-2056.
- [17] 韩砚君. 锡林河流域近三十年草原植被格局动态及其驱动力分析[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [18] 杨立哲,钱虹,郝璐. 锡林河近50年径流变化特征及其影响因素分析[J]. *草业科学*, 2015,32(3):303-310.
- [19] 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.
- [20] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil science society of America Journal*, 1994,58(5):1501-1511.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京:中国农业出版社,1996.
- [22] 史激光. 锡林郭勒草地土壤主要养分状况及评价[J]. *中国农学通报*, 2013,29(29):157-161.
- [23] Zhou Z Y, Li F R, Chen S K, et al. Dynamics of vegetation and soil carbon and nitrogen accumulation over 26 years under controlled grazing in a desert shrubland[J]. *Plant and Soil*, 2011,341(1/2):257-268.
- [24] Zibilske L M, Bradford J M, Smart J R. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002,66(2):153-163.
- [25] Su Z Y, Xiong Y M, Zhu J Y, et al. Soil organic carbon content and distribution in a small landscape of Dongguan, South China[J]. *Pedosphere*, 2006,16(1):10-17.
- [26] 陈彦. 绿洲农田土壤养分时空变异及精确分区管理研究[D]. 新疆石河子:石河子大学,2008.
- [27] 姜丽光,姚治君,魏义长,等. 河南省雨季降水时空变异特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013,15(3):395-400.
- [28] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. *Soil science society of America Journal*, 2006,70(5):1569-1578.
- [29] Meersmans J, De Ridder F, Canters F, et al. A multiple regression approach to assess the spatial distribution of Soil Organic Carbon(SOC)at the regional scale(Flanders, Belgium)[J]. *Geoderma*, 2008,143(1):1-13.
- [30] Liu D, Wang Z, Zhang B, et al. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006,113(1):73-81.
- [31] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. *Geoderma*, 2004,123(1):1-22.
- [32] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006,440(7081):165-173.
- [33] Hagedorn F, Spinnler D, Siegwolf R. Increased N deposition retards mineralization of old soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003,35(12):1683-1692.