

渭北台塬区耕地土壤有机质与全氮空间特征^{*}

赵业婷 常庆瑞 李志鹏 刘佳岐

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:以渭北台塬农业县——蒲城县为研究区,采用2011年耕地地力调查与质量评价项目数据,运用经典统计学、地统计学结合GIS技术,探讨以有机质为辅助变量的协同克里格法在区域土壤全氮及碳氮比估值中的适用性,研究耕地土壤有机质和全氮的空间变异特征、影响因素及其与碳氮比的分布特征。结果表明,当前蒲城县耕地土壤有机质质量比平均值为13.58 g/kg,全氮质量比为0.81 g/kg,均处于偏低水平,空间上整体随地貌自北向南递增;土壤碳氮比平均值为9.84,整体呈南北高中间低格局。土壤有机质与全氮是相关性密切的本征协同区域化变量,均具有极显著性的空间自相关性,表现出中等强度的空间变异性;其空间变异性是地形地貌、土壤性质等自然因素和种植模式、施肥、灌溉等人为因素交互作用的结果,其中人为耕作管理的地理区位导向作用愈发明显。相同采样数量下,以有机质为辅助变量的全氮协同克里格法插值精度优于普通克里格法,适于当下蒲城县土壤全氮的估值研究,能够提供更多局部细节信息,但其不适用于进行主辅变量的栅格比值运算来构建土壤碳氮比值图。

关键词:土壤 有机质 全氮 碳氮比 空间变异

中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0140-09

引言

土壤有机质和全氮是土壤质量的重要表征指标,不仅反映土壤肥力水平,也印证区域生态系统演变规律^[1-4]。二者间的耦合关系常用土壤碳氮比表示,它既是土壤质量的敏感指标,衡量土壤碳、氮营养平衡状况的指标^[4],也是土壤氮素矿化能力和土壤有机质分解是否受土壤氮限制的重要标志^[5]。掌握土壤有机质与全氮的空间特征及影响因素,可为合理制定农业种植规划、耕地管理措施及土壤有机碳、氮库调控与管理提供依据,对实现耕地土壤可持续发展具有重要意义^[2-6]。地统计学结合GIS技术方法分析土壤要素特征一直是国内外农业研究领域的热点^[6-14]。国内学者对城郊^[6-7]、流域^[8-9]、东北黑土^[10]、典型县域^[11-12]等地土壤有机质、全氮的空间变异特征及分布格局进行了大量的研究,而将有机质与全氮相结合的研究相对并不多,且有关渭北台塬区的研究鲜见。已有的土壤有机质与全氮的空间特征研究广泛采用基于单一目标变量的普通克里格法,且很少深入量化进行土壤碳氮比的研究。土壤全氮测定手续繁琐,样品前期处理复杂,易产生

较大误差,给快速准确分析带来一定困难;但其与有机质间通常具有极显著的正相关关系,且有机质测定手段相对简单、稳定,满足协同克里格法的基础前提即同一现象多种属性间存在相关关系,以易获取的、稳定的辅助变量来提高不易获取的主变量的估值精度^[15]。已有研究表明协同克里格法相比普通克里格法能明显改进估计精度及采样效率^[16-21]。本文选取陕西省蒲城县^[22]为研究区,在陕西省耕地地力调查与质量评价项目支持下,研究土壤有机质与全氮的空间变异特征、丰缺格局及其影响因素,探讨协同克里格法在蒲城县耕层土壤全氮估值中的适用性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

蒲城县隶属陕西省渭南市,位于109°20′16″~109°54′55″E,34°45′02″~35°10′35″N,东西长52.60 km,南北宽47.50 km,县域面积1 582 km²,总人口79万(2011年)。地处关中盆地与陕北黄土丘陵沟壑区的交接处,其基底构造为古生代奥陶系灰岩,上伏新生代第三、第四系沉积物。地势自西北向

收稿日期: 2014-01-12 修回日期: 2014-04-17

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102401)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH29B04)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20120204110013)和陕西省耕地地力调查与质量评价资助项目

作者简介: 赵业婷,博士生,主要从事土地资源与空间信息技术研究,E-mail: sofiacoffee@163.com

通讯作者: 常庆瑞,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究,E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

东南呈坡阶状递降,海拔高度 350 ~ 1 282 m,地貌类型以台塬为主,分为南部平原区(350 ~ 400 m)、中部台塬区(400 ~ 600 m)、北部山原区(大于 600 m)(图 1)。气候属暖温带半干旱大陆季风型气候,四季分明,年均气温 13.2 ℃,年均降水量 550 mm,无霜期 180 ~ 220 d。土地利用以耕地为主,土地垦殖率达 60%。种植业以粮食作物(小麦、玉米)为主,粮食播种面积 87 178 hm²,粮食产量 336 481 t。本县耕作土壤主要为壤土、黄绵土和淤土,其中以壤土分布面积最多。

1.2 土壤样品采集与测定

按照 NY/T 1634—2008《中国耕地地力调查与质量评价技术规程》,在作物收获后、施肥前,根据蒲城县地形地貌、土壤性质和管理水平等因素特点,以全面性、均匀性、客观性和可比性(参照文献[22])为原则,确定采样单元。在每一耕地采样单元的 0 ~ 20 cm 土层上,根据单元形状和大小确定适当的布点方法即长方形地块采用“S”法,近似正方形地块采用“X”法或棋盘形布点等。用差分 GPS 仪确定样点空间地理位置及海拔高度,同时记录周围的景观信息、耕作制度和生产能力等情况。将采集的样点土壤充分混匀后,用四分法留取 1 kg 土样装袋以备分析。本次共采集 734 个有效土样(图 1),遍及蒲城县 24 个镇,310 个村庄,48 个耕地土种类型。土壤有机质与全氮含量均采用常规方法测定^[23]。

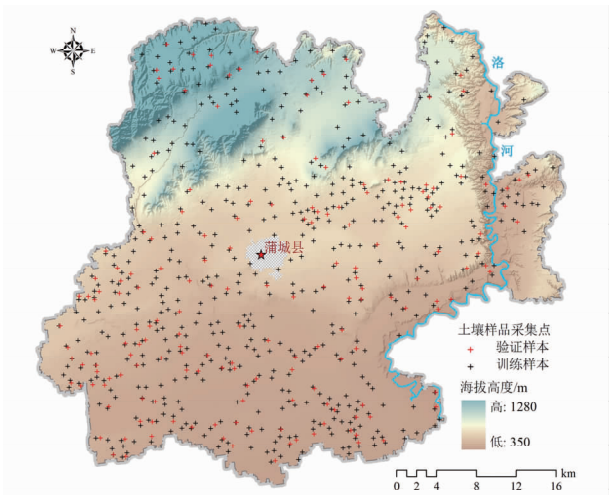


图 1 蒲城县地形和土壤采集点分布图
Fig. 1 Distribution map of DEM and soil sampling sites in Pucheng County in 2011

1.3 半方差函数与空间自相关分析

半方差函数分析与空间自相关分析是衡量空间相关性分析的 2 种方法,不同在于半方差函数计算的是方差,得出的相关尺度包含了正相关和负相关,而自相关指标计算的是协方差,分析时区

分了正、负两种相关性^[24]。空间自相关分析弥补了半方差函数中缺乏的对空间相关显著性及正负性提供的统计学检验,但其无法实现半方差函数在插值方面的优势即无法定量揭示区域变量空间相关程度与空间变异的尺度范围,无法为克里格插值提供参数依据,只有二者结合分析,结果才真实可靠。

本研究应用目前发展较为成熟的球状、指数和高斯 3 种模型,以残差平方和最小、决定系数 R^2 最大为原则,获取最优的半方差函数理论模型及其参数。在本征平稳假设^[15]下,2 个协同区域化变量的交互半方差函数表示为

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{a=1}^{N(h)} [Z_i(x_a) - Z_i(x_a + h)] \cdot [Z_j(x_a) - Z_j(x_a + h)] \quad (1)$$

式中, $\gamma_{ij}(h)$ 为交互半方差函数值, $N(h)$ 是间距为 h 的区域化变量 $Z_i(x)$ 和 $Z_j(x)$ 的样点对数。当 $i = j$ 时,该式表示单变量的半方差函数。

全局 Moran's I 是空间自相关分析中应用最广泛的参数,取值范围是 $[-1, 1]$,用标准化统计 Z 值检验其是否存在显著性空间自相关^[9, 15, 25 - 26]。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n w_{ij}} \quad (i \neq j) \quad (2)$$

式中, n 是变量 x 的样本数; x_i, x_j 是位置 i 和 j 的样本实测值, S^2 是其方差, $\bar{x}$ 是平均值, w_{ij} 是对称二项分布空间权重矩阵元素。

1.4 插值精度的评价

本研究参照文献[22],兼顾采样尺度效应,进行 600 m 空间等间距抽稀处理,获取 554 个(75%)训练样本进行插值,余下 180 个(25%)为验证样本(图 1)。鉴于土壤碳氮比指标不属于区域化变量范畴,不满足克里格法应用的基本前提,本研究拟采用栅格计算的方法获取蒲城县耕地土壤碳氮比空间分布图。因此,克里格法插值精度是获取高质量土壤碳氮比分布图的关键。结合相关研究方法^[16 - 21, 26],本研究通过比较各指标的实测值与估测值来评价插值精度,采用绝对评价指标即平均绝对误差反映估测值的实测误差范围,均方根误差反映样点数据的估值和极值效应,相对评价指标即平均相对误差和相关系数 R 进行评价。

1.5 软件分析

利用 SPSS 20 进行基本统计特征分析、单因素方差分析和相关性分析。利用 GS + 9.0 分析、构建最优半方差理论模型及其参数,绘制半方差图。利

用 ArcGIS 10.2 将样点数据标准化 (Beijing_1954_ GK_Zone_19), 在“地统计模块”中进行克里格插值 (普通克里格和协同克里格), 实现养分值由点到面; “空间分析模块”中计算空间自相关性 (全局 Moran’s I), 栅格运算, 计算距离等; “3D 分析模块”中建立数字地面模型 (DEM), 提取地形因子等。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机质和全氮的基本统计特征

2011 年蒲城县耕地土壤有机质质量比为 8.30 ~ 22.70 g/kg, 平均值为 13.58 g/kg; 全氮质量比为 0.45 ~ 1.33 g/kg, 平均值为 0.81 g/kg, 二者间

具有极显著的正相关关系 ($R = 0.60, n = 734$); 土壤碳氮比介于 4.96 ~ 22.20, 平均值为 9.84。3 项指标的变异系数介于 16% ~ 20%, 均属中等变异强度。由表 1 可知, 本研究采用的训练样本和验证样本数据与蒲城县总样点数据具有相似的统计特征, 均值精度误差均控制在 0.50% 内, 且空间分布均匀 (图 1), 表明 2 项数据集均具有较好的代表性。各项数据集中, 土壤有机质与全氮含量数据符合或近似符合正态分布, 经自然对数变换后均能完全通过 Kolmogorov – Smironov ($K - S$) 正态分布性检验, 即 $P_{K-S} > 0.05$ (表 1), 满足空间统计学克里格方法进行土壤特性研究的前提。

表 1 2011 年蒲城县耕地土壤有机质与全氮含量基本统计特征

Tab.1 Statistical characteristics of soil OM and TN in cultivated land of Pucheng County in 2011										
项目 (样本数)	参数	最小值	最大值	平均值	中值	标准差	变异 系数/%	偏度	峰度	P_{K-S}
训练样本 ($n = 554$)	有机质质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	8.30	22.7	13.58	13.3	2.64	19.44	0.00	2.82	0.94
	全氮质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	0.45	1.33	0.81	0.80	0.15	18.52	0.34	3.03	0.27
	碳氮比	4.96	22.20	9.86	9.51	1.87	18.97	1.94	10.51	
验证样本 ($n = 180$)	有机质质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	8.30	20.10	13.58	13.2	2.31	17.01	0.41	2.66	0.79
	全氮质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	0.47	1.15	0.81	0.82	0.13	16.05	0.01	3.01	0.13
	碳氮比	5.98	17.40	9.80	9.38	1.70	17.35	1.60	7.30	
蒲城县总样本 ($n = 734$)	有机质质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	8.30	22.70	13.58	13.30	2.56	18.85	0.51	3.17	0.65
	全氮质量比/($g \cdot kg^{-1}$)	0.45	1.33	0.81	0.81	0.15	18.52	0.29	3.08	0.08
	碳氮比	4.96	22.20	9.84	9.48	1.83	18.60	1.88	10.04	

与文献[22]相比, 全县土壤有机质平均质量比增加了 44.47%, 全氮增加了 32.78%, 碳氮比随之增加了 0.54, 而变异系数分别下降了约 26 个和 15 个百分点, 表明 30 年来蒲城县耕地土壤有机质和全氮含量整体在增加且向区域均匀化方向发展; 24 个镇级单位统计, 土壤有机质与全氮的变化量 (变化率) 与 20 世纪 80 年代时期含量间达到极显著的负相关性 ($P < 0.01$), 表现出原低值区含量增速快、原高值区含量增速慢的变化规律。

2.2 土壤有机质与全氮的空间变异特征

蒲城县耕地土壤有机质、全氮及二者交互变量的最优半方差函数及其参数见表 2, 半方差图如图 2 所示。由此可知, 各指标在变程范围内的点逼近理论模型曲线, 决定系数 R^2 均达到 0.95 以上, 表明本研究拟合的半方差函数理论模型具有较高的拟合精度。在本采样尺度下, 单变量下的土壤有机质与全氮最优半方差理论模型均为指数模型, 空间相关域相近, 块金系数接近, 其值均处于 0.25 ~ 0.75, 均表现为中等强度的空间相关性^[15], 空间变异受结构性因素和随机因素共同作用即受研究区水热条件和耕作管理综合影响, 二者属于空间相关性密切的本征

协同区域化变量^[18-20]。基于土壤有机质与全氮的交互半方差函数的最优理论模型为球状模型, 相较单变量, 其块金系数稍有降低, 为 0.463, 空间相关性相应略有加强, 其模型的拟合精度相对较高, 但仍能维持单变量的空间结构性, 仍属中等强度的空间相关性, 此与庞凤^[18-20]等的研究结果一致, 表明土壤有机质可以协助土壤全氮构建更为稳定的半方差函数模型。全局 Moran’s I 指数中, 土壤有机质与全氮的 Z 值均大于 2.58, 说明本采样尺度下, 二者均具有极显著的空间自相关性 ($P < 0.01$), 表明二者在土壤中的分布具有良好的空间结构。块金系数与全局 Moran’s I 指数及其标准化 Z 值均呈现出有机质空间相关性高于全氮的规律 (表 2), 说明本研究构建的半方差函数严格可靠。土壤有机质与全氮的变程均远超过采样间距, 表明可以在区域内根据一定的精度要求尝试优化采样数量, 以期达到经济、精准的插值^[18-19]。

2.3 插值方法评价

空间插值图是土壤养分含量分等定级, 量化等级面积, 进行空间比值运算的基础。本研究从训练样本和验证样本 2 个角度, 结合土壤碳氮比指标, 较

表 2 2011 年蒲城县耕地土壤有机质与全氮最优半方差函数理论模型及其参数

Tab.2 Parameters fitted by semivariogram models for soil OM and TN in cultivated land of Pucheng County in 2011									
指标	模型	变程/km	块金值	基台值	块金系数	残差平方和	R ²	Moran's I	标准化 Z 值
有机质	指数	27.261	0.020	0.041	0.482	6.72 × 10 ⁻⁶	0.982	0.30	16.04
全氮	指数	26.498	0.019	0.039	0.491	1.39 × 10 ⁻⁵	0.960	0.29	15.56
交互	球状	25.300	0.011	0.025	0.463	2.93 × 10 ⁻⁶	0.988		

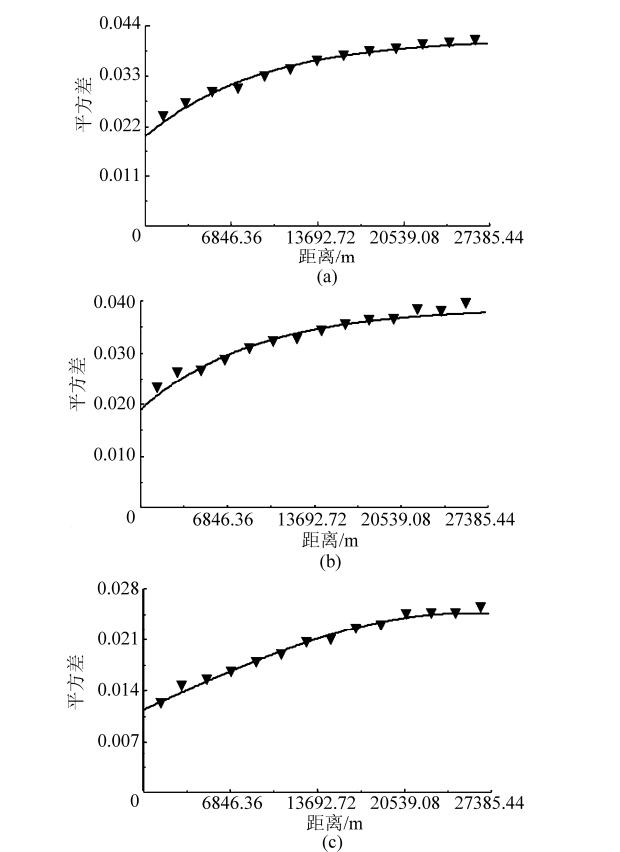


图 2 2011 年蒲城县耕地土壤有机质、全氮和交互变量的半方差图

Fig.2 Semi-variograms of soil OM, TN and cross variates in cultivated land of Pucheng County in 2011

(a) 有机质 (b) 全氮 (c) 交互

全面地进行插值精度评价,进而分析和探讨最佳的插值方法及碳氮比值运算图层。与同类研究^[19-21]相比,本研究插值精度整体较好,因训练样本参与插值运算,其插值精度的提高程度(提高量)相对验证

样本高(表 3)。就土壤全氮而言,相同采样数量下,以有机质为辅助变量的协同克里格法的插值精度优于普通克里格法,精度提高 0.60%~6.48%。精度评价指标中均以均方根误差提高程度最高,其中训练样本精度提高了 6.48%,验证样本精度提高了 1.68%。此外,协同克里格法相较普通克里格法,所得土壤全氮含量极值范围扩大 4.17%,等级图斑数增加 13%,空间镶嵌结构更为复杂,能够提供更多的局部细节信息,与庞凤等^[18-21]的研究结果相吻合。

就土壤碳氮比而言,C/N^a的插值精度整体高于 C/N^b,尤以训练样本中表现明显,其精度提高介于 4.11%~7.86%。精度评价指标中均以相关系数 R 的精度提高程度最高,其中训练样本精度提高了 7.86%,验证样本中提高了 7.17%(表 3)。分析原因,克里格插值法本身具有一定的平滑压缩效应,获得的含量插值范围是样点数据集的子集(表 1 和表 3),使得本研究中土壤全氮与有机质的插值图层间的相关性普遍高于实测样点间的相关性,融合了辅助变量有机质信息的图层 TN^b与辅助变量图层 OM 间的相关系数(R=0.783)相较 TN^a(R=0.753)稍高,进而使得图层 C/N^b与辅助变量图层 OM 间的相关系数(R=0.26)明显低于图层 C/N^a(R=0.32),更低于样点数据集中的相关系数,导致图层 C/N^b预测精度低于图层 C/N^a。同时,图层 C/N^a相比 C/N^b含量极值范围扩大了 1.83%,等级图斑数增加 10%,表达信息更为丰富。

本采样尺度下,以有机质为辅助变量的土壤全氮协同克里格法插值精度整体上优于普通克里格

表 3 蒲城县耕地土壤有机质与全氮空间插值精度

Tab.3 Precision evaluation of predicting soil OM and TN in cultivated land of Pucheng County										
图层	计算方法	插值范围	训练样本 (n=554)				验证样本 (n=180)			
			平均绝对误差	平均相对误差	均方根误差	R	平均绝对误差	平均相对误差	均方根误差	R
有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	普通克里格	10.12~17.02	1.386	10.31	1.801	0.750**	1.654	12.70	2.062	0.588**
全氮 TN ^a /(g·kg ⁻¹)	普通克里格	0.60~1.08	0.079	10.08	0.108	0.753**	0.090	11.67	0.119	0.552**
全氮 TN ^b /(g·kg ⁻¹)	协同克里格	0.59~1.09	0.075	9.58	0.101	0.783**	0.089	11.60	0.117	0.561**
碳氮比 C/N ^a	(OM×0.58)/TN ^a	7.97~12.42	0.932	9.11	1.459	0.700**	1.162	11.78	1.672	0.516**
碳氮比 C/N ^b	(OM×0.58)/TN ^b	8.07~12.44	0.979	9.06	1.520	0.645**	1.165	11.82	1.676	0.479**

注:**表示相关系数水平在 0.01 水平显著,下同。

法,适用于当下蒲城县土壤全氮的估值研究,但其不适用于进行主辅变量栅格比值运算即不适宜构建土壤碳氮比图。分析认为,本研究区采样数量较丰富,样点代表性强,在一定程度上保证了普通克里格法较高的插值精度^[18-20],以此参照标准,限制了协同克里格法的适用性强度,可尝试加大主辅变量的差异^[18-21],优化土壤全氮的采样数量,提高采样效率和经济效益。

综合研究,本研究采用普通克里格法绘制有机质空间分布图,协同克里格法绘制全氮空间分布图,通过普通克里格法下的有机质与全氮的插值图间的栅格比值运算来获得土壤碳氮比分布图,如图 3 所示。

2.4 土壤有机质与全氮的空间格局

蒲城县耕地土壤有机质与全氮空间协同性强,整体呈南高北低、西南最高格局,北部含量梯度变化明显,中南部则多呈团状或块状镶嵌分布特征(图 3),现含量多集中在陕西省土壤养分分级标准的第 5 级(表 4),整体偏低,需积极育土培肥。

目前,土壤有机质质量比基本处于 10 ~ 18 g/kg,以偏低水平即 12 ~ 15 g/kg 为本底,所占耕地面积比例达 66.03%,主要分布在县中南部和县西北部的高阳、罕井 2 镇及东北部的洛滨以北地块;适中水平即 15 ~ 20 g/kg,耕地面积占 14.88%,空间呈 3 大片状分布,主要分布于县西南部即城关镇以南的贾曲、兴隆、苏坊、荆姚和原任镇,此外少量分布于东部的永丰与东陈相接区域;低水平即 10 ~ 12 g/kg,耕地面积占 19.09%,集中位于县北部的由大孔-上王-洛滨-翔村围拱的呈条带状区域。

土壤全氮质量比基本处于 0.60 ~ 1.10 g/kg,中南部的等级镶嵌结构突出。以偏低水平即 0.75 ~ 1.00 g/kg 为本底,耕地面积占 69.67%,主要集中分布于北部的罕井、上王、洛滨和翔村镇,此外呈散落的团块状分布于东部的东阳、平路镇内;高于 1.00 g/kg 的适中水平区集中分布于南部的原任镇东部,耕地面积仅占 1.76%;余下 28.57% 耕地含量处于低水平即小于 0.75 g/kg,多分布于县中东部。

土壤碳氮比基本处于 8 ~ 12,其耕地地面积累计占 99.76%,其中 68.78% 耕地处于 8 ~ 10,比值偏

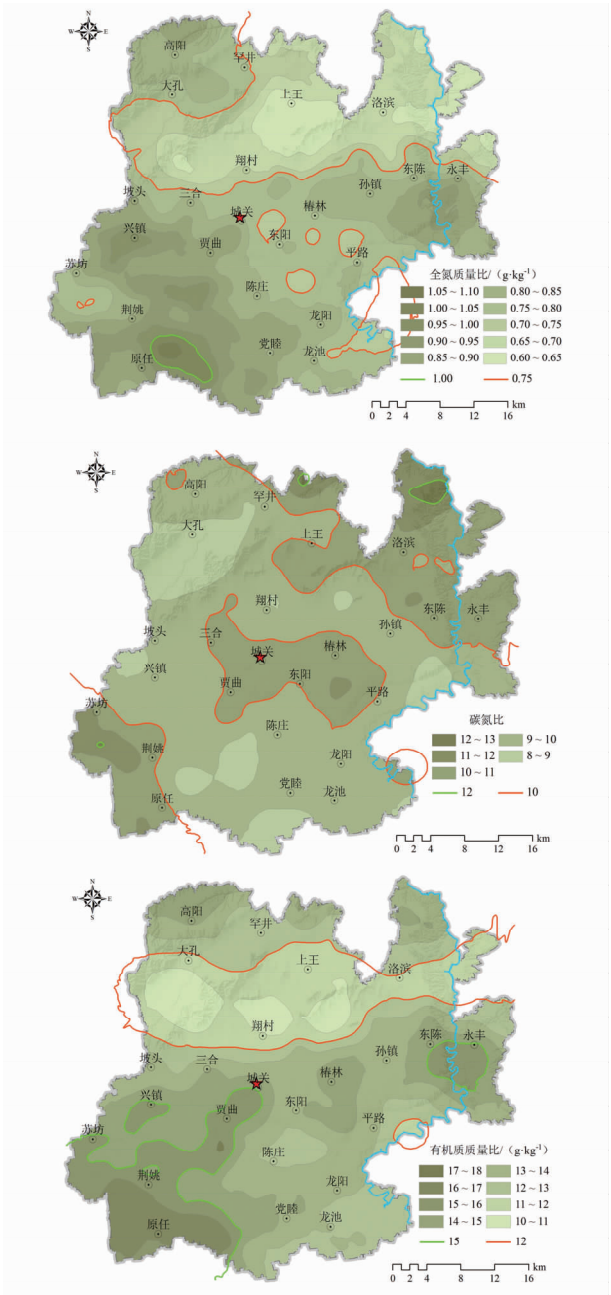


图 3 2011 年蒲城县耕地土壤有机质、全氮和碳氮比空间分布图
Fig.3 Distribution maps of soil OM, TN and C/N in Pucheng County in 2011

低,遍布于县大部分,施用氮肥时,应注意适量,避免损失;比值介于 10 ~ 12 的区域空间主要呈 3 大块状,即县东北部的罕井-上王-东陈-永丰一线北部区域,其次是中部的三合-贾曲-东阳-平路-椿林-城关

表 4 2011 年蒲城县耕地土壤有机质、全氮和碳氮比等级面积比

有机质质量比			全氮质量比			碳氮比	
等级	范围/(g·kg ⁻¹)	面积百分比/%	等级	范围/(g·kg ⁻¹)	面积百分比/%	范围	面积百分比/%
4	15 ~ 20	14.88	4	1.00 ~ 1.25	1.76	12 ~ 14	0.24
5	12 ~ 15	66.03	5	0.75 ~ 1.00	69.67	10 ~ 12	31.03
6	10 ~ 12	19.09	6	0.50 ~ 0.75	28.57	8 ~ 10	68.73

围拱区域,再者为西南角的苏芳-荆姚-原任一线南部区域,耕地面积共占 31.03%;比值大于 12 的地块呈碎斑状分布于县北界的北白村、南店村、党家湾村及西南角的苏坊镇的封村,耕地面积仅占 0.24%,该区域适当施用氮肥可增强微生物活动,促进土壤有机质的分解,提高肥效。

2.5 土壤有机质与全氮的影响因素分析

30 年来蒲城县肥料的大量施用在提高粮食产量的同时也增加了作物残茬和根系的生物量;农业机械化作业程度的提高促进了秸秆还田的推行,使得大量的有机物质进入土壤,促进了有机质与全氮的累积;与此同时,不断发展完善灌溉业,在县中南部修筑洛惠渠、洛西渠等,引洛河水灌溉,大部分旱地变为水浇地,灌溉面积提高了 60%,也促进了有机质与全氮的积累。为掌握当前土壤有机质与全氮含量水平的影响因子,以更好地指导农业生产,本研究选取地形地貌、土壤类型、人为利用因素等因子的

样点数据进行统计(表 5、表 6)。地形地貌方面,土壤有机质和全氮含量在不同地貌类型间均存在显著性差异($P < 0.05$),从大到小依次表现为南部平原区、中部台塬区、平均水平、北部山原区,同时与海拔高度、坡度呈极显著负相关关系($P < 0.01$);土壤类型方面,二者从大到小均表现为塬土、平均水平、淤土、黄绵土,其中塬土含量显著高于其他土类,即成土年代长、耕种熟化程度较高的土壤类型养分含量高于成土年代较短、耕种熟化程度低的土壤类型;熟制方面,一年两熟制地区含量显著高于一年一熟;土地利用方面,水浇地含量显著高于旱地。此外,有机质与全氮的积累与人为活动密切相关,表 6 相关性统计表明,蒲城县土壤有机质、全氮与距居民点及主干道路距离均呈极显著负相关关系($P < 0.01$),即近地点含量高远地点含量低的规律,人口密集的城镇周围如城关镇比远离城镇人口稀少的地区含量高,这些地区有机肥料来源多、施用广、投入大。

表 5 蒲城县不同因素下耕地土壤有机质、全氮的方差分析

因素		有机质质量比		全氮质量比	
		平均值 ± 标准误差/(g·kg ⁻¹)	<i>F</i>	平均值 ± 标准误差/(g·kg ⁻¹)	<i>F</i>
地貌类型	南部平原区	14.07 ± 0.15 ^a	18.18	0.86 ± 0.01 ^a	28.91
	中部台塬区	13.57 ± 0.14 ^b		0.80 ± 0.01 ^b	
	北部山原区	12.38 ± 0.18 ^c		0.74 ± 0.01 ^c	
土壤类型	塬土	14.21 ± 0.16 ^a	9.50	0.86 ± 0.01 ^a	23.13
	黄绵土	13.32 ± 0.13 ^b		0.78 ± 0.01 ^b	
	淤土	13.44 ± 0.27 ^b		0.80 ± 0.02 ^b	
熟制	一年一熟	12.42 ± 0.15 ^b	35.55	0.74 ± 0.01 ^b	45.28
	一年两熟	14.07 ± 0.12 ^a		0.84 ± 0.01 ^a	
土地利用	旱地	12.17 ± 0.16 ^b	69.90	0.73 ± 0.01 ^b	69.65
	水浇地	13.98 ± 0.11 ^a		0.83 ± 0.01 ^a	

注:同列数据后同一因素中不同小写字母表示差异达 5% 显著水平(采用最小显著差数法)。

表 6 蒲城县耕地土壤有机质、全氮与环境变量间的相关分析

Tab.6 Correlations between soil OM, TN and environment variables in cultivated land of Pucheng County				
指标	海拔高度	坡度	与居民点距离	与主干道路距离
有机质质量比	-0.226 **	-0.221 **	-0.112 **	-0.209 **
全氮质量比	-0.362 **	-0.305 **	-0.102 **	-0.167 **

影响因子间往往相互关联着并表现出一定程度的一致性与继承性特征(表 5、表 6),养分含量大致随地形地貌呈纵向增加趋势(图 3)。整个北部山原区以雨养农业为主,种植模式以一年一熟为主,虽气温较低、降水较多,但地势起伏大,水土流失严重,有

机质与全氮含量整体低,而其西北部的高阳镇突出,因其大量施用腐殖酸肥料,含量相对较高(图 3)。中南部区域虽自然降水较少、气温较高,但居民点多、塬土分布广、以一年两熟制为主导,且自家庭承包责任制实施以来,土地分产到户,加上灌排设施改善和农户精耕细作等措施促使土壤有机质与全氮含量相对较高,等级分布则多呈团块状镶嵌结构特征;其中中部台塬区,物质装备齐全,经济发展好,省道 S106、京昆高速过境,交通便利,灌溉系统完善,农事管理便捷,投入高,有助于有机质与全氮的积累;南部平原区气候与中部台塬区相似,地势平坦,灌溉方便,地下水位浅,土壤湿度大,农业生产中上绿肥种植面积大等,有机质的积累比中部多。

与文献[22]相比,地貌类型间的含量极差增大、分异程度加强,同时地貌类型间的含量趋势发生

逆转,由原来的“北部>南部>中部”转变为现在的“南部>中部>北部”,其主要是由人为耕作管理的地理区位导向所致,即人为施肥管理的侧重方向与力度大体与地形地貌趋势一致所致,相应地也在一定程度上模糊了降水、气温等自然因素的影响。由此可见,单纯的从半方差函数的块金系数数值上判断结构性因素和随机因素的作用强度是不合理的,需进行影响因素的定量研究与分析,才可有效服务于农业生产。

3 结束语

30 年来,蒲城县耕地土壤有机质、全氮含量及其碳氮比值均在提高,但目前含量整体处于“偏低”水平,仍需积极育土培肥。今后的农业生产中在积极提高氮投入水平的同时,应注意碳素的归还水平,

维持土壤碳氮耦合平衡。蒲城县耕地土壤有机质与全氮属相关性强的本征协同区域化变量,均达到极显著的空间自相关性,并表现出中等强度的空间相关性程度;其空间变异性是受地形地貌、土壤性质等自然因素和灌溉、施肥等人为因素的综合影响,其中人为耕作管理的地理区位导向明显,在一定程度上也加强了地形地貌间的分异。相同采样数量下,以有机质为辅助变量的全氮协同克里格法优于普通克里格法,能够提高半方差函数的稳定性和插值精度,同时能提供更多局部细节信息,适于当下蒲城县土壤全氮的估值研究,可进一步加大主辅变量的差异,优化土壤全氮的采样数量,提高工作效率和经济效益;但该方法不适于进行其主辅变量的栅格比值运算。

参 考 文 献

- 1 Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. *Nature*, 1994, 371: 783 – 785.
- 2 陈涛, 常庆瑞, 刘钊, 等. 耕地土壤有机质与全氮空间变异性对粒度的响应研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10): 122 – 129.
Chen Tao, Chang Qingrui, Liu Zhao, et al. Spatial variability response of farmland soil organic matter and total nitrogen to sampling grain size[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 122 – 129. (in Chinese)
- 3 张世文, 叶回春, 王来斌, 等. 景观高度异质区土壤有机质时空变化特征分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 105 – 113.
Zhang Shiwen, Ye Huichun, Wang Laibin, et al. Temporal and spatial characteristics of soil organic matter for landscape heterogeneity area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 105 – 113. (in Chinese)
- 4 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1407 – 1413.
Zhang Chunhua, Wang Zongming, Ju Weimin, et al. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(5): 1407 – 1413. (in Chinese)
- 5 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 等. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4778 – 4782.
Dong Kaikai, Wang Hui, Yang Liyuan, et al. Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4778 – 4782. (in Chinese)
- 6 赵业婷, 常庆瑞, 李志鹏, 等. 1983—2009 年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 132 – 140.
Zhao Yeting, Chang Qingrui, Li Zhipeng, et al. Spatial characteristics and changes of soil organic matter for cultivated land in suburban area of Xi'an from 1983 to 2009[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(2): 132 – 140. (in Chinese)
- 7 崔潇潇, 高原, 吕貽忠. 北京市大兴区土壤肥力的空间变异[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 327 – 333.
Cui Xiaoxiao, Gao Yuan, Lü Yizhong. Spatial variability of soil fertility in Daxing District of Beijing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 327 – 333. (in Chinese)
- 8 Wang Y Q, Zhang X C, Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2009, 150(1 – 2): 141 – 149.
- 9 司涵, 张展羽, 吕梦醒, 等. 小流域土壤氮磷空间变异特征分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 90 – 96.
Si Han, Zhang Zhanyu, Lü Mengxing, et al. Spatial variability of soil nitrogen and phosphorus in small watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 90 – 96. (in Chinese)
- 10 Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 19 – 29.
- 11 Huang B, Sun W X, Zhao Y C, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices[J]. *Geoderma*, 2007, 139(3 – 4): 336 – 345.
- 12 Darilek J L, Huang B, Wang Z G, et al. Changes in soil fertility parameters and the environmental effects in a rapidly developing region in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1 – 3): 286 – 292.
- 13 Shah Z, Malik W, Bhatti A, et al. Spatial variability of nutrients in wheat plants in semi-arid regions of Northwestern Pakistan

[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(16): 2472 – 2487.

14 Marchetti A, Piccini C, Francaviglia R, et al. Spatial distribution of soil organic matter using geostatistics; a key indicator to assess soil degradation status in Central Italy[J]. *PEDOSPHERE*, 2012, 22(2): 230 – 242.

15 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.

16 Liao K H, Xu S H, Wu J C, et al. Cokriging of soil cation exchange capacity using the first principal component derived from soil physic-chemical properties[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(8): 1246 – 1253.

17 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.

Li Runlin, Yao Yanmin, Tang Pengqin, et al. Optimization of spatial interpolation and sampling size for soil zinc content in cultivated land at county scale using Cokriging method[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4): 830 – 838. (in Chinese)

18 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤铜含量的协同克里格插值及采样数量优化[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2828 – 2836.

Pang S, Li T X, Wang Y D, et al. Spatial interpolation and sampling numbers of the concentration of copper in cropland soil on county scale using Cokriging[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 42(8): 2828 – 2836. (in Chinese)

19 赵业婷, 李志鹏, 常庆瑞, 等. 基于 Cokriging 的耕层土壤全氮空间特征及取样数量优化研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 415 – 422.

Zhao Yeting, Li Zhipeng, Chang Qingrui, et al. Study on spatial distribution of total nitrogen in arable soil layer and optimization of number of soil samples for the study based on Cokriging[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 415 – 422. (in Chinese)

20 郭鑫. 罗江县农田土壤全氮协同克里格插值和采样数量优化研究[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(5): 2576 – 2760.

Guo Xin. Spatial interpolation and sampling numbers of concentration of total nitrogen in cropland soil of Luojiang County scale using cokriging[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2012, 40(5): 2576 – 2760. (in Chinese)

21 Wu C F, Wu J P, Luo Y M, et al. Spatial estimation of soil total nitrogen using cokriging with predicted soil organic matter content[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(5): 1676 – 1681.

22 蒲城县农业区划办公室土壤组. 蒲城土壤[M]. 蒲城: 蒲城县农业区划办公室, 1985.

23 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

24 刘庆, 夏江宝, 谢文军. 半方差函数与 Moran's *I* 在土壤微量元素空间分布研究中的应用——以寿光市为例[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2011, 36(9): 1129 – 1133.

Liu Qing, Xia Jiangbao, Xie Wenjun. Application of semi-variogram and Moran's *I* to spatial distribution of trace elements in soil; a case study in Shouguang County[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(9): 1129 – 1133. (in Chinese)

25 陈云坪, 王秀, 马伟, 等. 小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(10): 180 – 184.

Chen Yunping, Wang Xiu, Ma Wei, et al. Spatial autocorrelation analysis of wheat yield over five years[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(10): 180 – 184. (in Chinese)

26 李启权, 王昌全, 张文江, 等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 459 – 466.

Li Qiquan, Wang Changquan, Zhang Wenjiang, et al. Prediction of soil nutrients spatial distribution based on neural network model combined with geostatistics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 459 – 466. (in Chinese)

Spatial Characteristics of Soil Organic Matter and Total Nitrogen in Cultivated Land of Weibei Tableland Area

Zhao Yeting Chang Qingrui Li Zhipeng Liu Jiaqi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With the aim to provide scientific and guidance for the sustainable development of Weibei Tableland cultivated land, a study was conducted to explore the application of Cokriging with OM as auxiliary variable in the regional spatial estimation of topsoil TN content and carbon to nitrogen ratio (C/N) applying traditional statistics, geostatistics combining with GIS technology. The spatial variability and influencing factors of topsoil OM and TN was researched and the spatial pattern of their contents and topsoil C/N was further analyzed based on the data of the Cultivated Land Productivity Investigation and Quality Evaluation Project of Pucheng County in 2011. The results showed that the current average

content of topsoil OM was 13.58 g/kg, TN was 0.81 g/kg and C/N was 9.84, and all of them were in relatively low level. Spatially, topsoil OM and TN contents generally increased from north to south along with geomorphologic types while topsoil C/N was high in north and south and low in the middle. Both OM and TN showed spatial cluster at 0.01 significance level and demonstrated moderate spatial correlation. The spatial variability was influenced by both natural factors such as topography and geomorphology, soil types and human factors including fertilization, cropping system, irrigation and so on, and the geographical guide of human activity was playing more and more important roles. With the same sampling numbers ($n = 554$), compared with ordinary Kriging, Cokriging with OM as subsidiary variable was more suitable for spatial interpolation of TN and could provide more local variation information, but was unavailable for the raster ratio calculation to obtain soil C/N map.

Key words: Soils Organic matter Total nitrogen Carbon to nitrogen ratio Spatial variability



(上接第 133 页)

Drop Size Distribution of Fixed Spray-plate Sprinklers with Two-dimensional Video Disdrometer

Gong Xinghui¹ Zhu Delan^{1,2} Zhang Lin^{2,3} Zhang Yisheng¹ Ge Maosheng¹ Yang Wen¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A two-dimensional video disdrometer (2DVD) was used to measure drop size, drop velocity and drop angle from Nelson D3000 spray-plate sprinklers with a 4.78 mm nozzle and operating pressure of 50, 100, 150, 200 kPa. The relationship among drop sizes, drop velocity and drop angle were analyzed. Results indicated that the relationship between drop diameter and distances along the sprinkler met exponential function. The volumetric mean diameter increased with the distance along the sprinkler increased, and at the same location from the sprinkler the average droplet diameter decreased with the increase of working pressure. The relationship between drop velocity and drop diameter met logarithmic function. Drop velocity increased with the drop diameter increased, and the effect of operating pressure on the relationship between drop diameter and velocity was not obvious. Drop angle decreased with the increase of drop diameter. When drop diameter was smaller than 1.0mm and operating pressure was at 50, 100, 150, 200 kPa, 90.46%, 84.46%, 89.91% and 89.15% of the droplets descended perpendicularly to the ground, respectively. The rest of the droplets descended to the ground with angle between 30° ~ 89°. When drop diameter was between 1.0 mm and 2.25 mm, the drop angle decreased rapidly with the drop diameter increased. And when drop diameter was greater than 2.25 mm, the decrease trend became slower. The relationship between drop angle and drop diameter met a good linear function, and the effect of operating pressure on the relationship between drop angle and diameter was not obvious.

Key words: Sprinkler Drop size Drop velocity Drop angle Operate pressure Two-dimensional video disdrometer