

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.018

景观高度异质区土壤有机质时空变化特征分析*

张世文¹ 叶回春² 王来斌¹ 王胜涛³ 黄元仿² 崔良满⁴

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

3. 北京市土肥工作站, 北京 100104; 4. 密云县农业技术推广站, 北京 101509)

摘要: 基于 GIS 和环境相关法, 构建了集传统统计学、空间趋势分析、时间稳定性评估、结合辅助信息的地统计混合模型联合的景观高度异质区土壤属性时空变化研究模型, 并利用该联合模型揭示了北京市密云县土壤有机质时空变化特征及其影响因素。结果表明, 构建的时空联合模型能够较好地体现景观高度异质区土壤有机质时空变化细节特征; 土壤有机质以中等稳定为主, 且随着时间的推移, 随机部分占土壤有机质空间变异的比例越来越大; 不同时期土壤有机质含量空间分布格局一致; 高土壤有机质含量区域的土壤有机质随时间呈减小趋势, 低区与之相反, 且高土壤有机质含量区变幅大, 而低土壤有机质含量区变幅小; 影响密云县土壤有机质时空变异的因素主要为土壤质地和土地利用方式。

关键词: 时空联合模型 景观高度异质区 土壤有机质 时空变化

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0105-09

Temporal and Spatial Characteristics of Soil Organic Matter for Landscape Heterogeneity Area

Zhang Shiwen¹ Ye Huichun² Wang Laibin¹ Wang Shengtao³ Huang Yuanfang² Cui Liangman⁴

(1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

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

3. Beijing Soil and Fertilizer Station, Beijing 100104, China

4. Miyun Pomotion Stations of Agricultural Technology, Beijing 101509, China)

Abstract: A joint model of the temporal and spatial variation of soil properties was built, which integrated traditional statistics, spatial trend analysis, time stability assessment, and geostatistical hybrid model based on GIS. The joint model was used to reveal the spatio-temporal changes of soil organic matter and its influencing factors in Miyun County, Beijing. The results showed that the joint spatio-temporal model could preferably reflect the characteristics of soil organic matter(SOM) for high landscape heterogeneity in detail. SOM displayed medium time stability, and the random parts accounted for the spatial variability increased gradually. Patterns of spatial distribution of SOM content were consistent in different years. The SOM content in high value area gradually decreased over time, and increased in low value area. And the variation was large in high values range and small in low value area. The main factors impacting spatio-temporal variation of SOM were soil texture and land use in the study area.

Key words: Spatio-temporal joint model Area of highly heterogeneous landscape Soil organic matter Spatio-temporal variation

收稿日期: 2013-06-09 修回日期: 2013-07-03

* 国家自然科学基金资助项目(41071152)、公益性行业(农业)科研专项资助项目(201103005-01-01)、国土资源部公益性行业科研专项资助项目(201011006-3)和农业部科研杰出人才及创新团队资助项目(2012)

作者简介: 张世文, 讲师, 博士, 主要从事土壤属性空间异质性、土地利用与信息技术研究, E-mail: mamin1190@126.com

通讯作者: 黄元仿, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤水分、养分模型与水土资源管理研究, E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

引言

土壤有机质(Soil organic matter, SOM)是衡量土壤质量的重要指标之一,解释和理解土壤有机质时空变异及其规律对于土地利用可持续发展十分重要^[1-2]。国内外学者采用传统统计学和地统计学方法从区域尺度对土壤有机质时间或空间变异进行了大量研究^[3-11],研究区域包括黄淮海冲积平原区、干旱荒漠区、新疆绿洲棉区等。上述相关研究解释了区域因素如气候、土壤类型、地形、地貌、土地利用类型和土壤侵蚀等对土壤有机质时空变异的影响。相关研究表明不同的施肥、种植系统和农民个人习惯是导致土壤有机质改变的主要原因^[12]。然而,现阶段的研究多采用半方差模型和普通克里格法对区域土壤有机质时间或空间变异特征进行研究,研究对象多为平原、盆地和绿洲等景观相对均一的区域,同时时间变异的研究相对较少,时间节点的选择多为第2次土壤普查和当前2个节点。因此,针对景观高度异质区的特征,探究适合这些区域的土壤有机质时空变异研究方法,揭示景观高度异质区土壤有机质时空变化特征具有现实和理论需求。

本文针对景观高度异质区的特征,基于环境相关法,借助GIS技术,探究和构建景观高度异质区土壤有机质时空变异研究的科学方法,并基于构建的集传统统计学、空间趋势分析、时间稳定性评估、结合辅助信息的地统计混合模型等联合时空模型,全面、系统地分析北京市密云县土壤有机质时空变化特征,旨在探讨景观高度异质区土壤属性时空变化特征分析的科学方法,揭示研究区土壤有机质时空变化特征及其影响因素,为区域土壤肥力评价和土壤培肥管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处北京市密云县(北纬 $40^{\circ}13'7''$ ~ $40^{\circ}47'57''$,东经 $116^{\circ}39'33''$ ~ $117^{\circ}30'25''$)。区内海拔高度41.49~1704.86 m,由山地、丘陵、平原和水域四大地貌单元构成,景观高度异质。山地(含丘陵)占83.3%、平原占8.3%、水域占8.4%,"八山一水一分田"是研究区最基本的地貌特征。研究区土壤类型包括褐土、棕壤和潮土三大类,土壤质地以轻壤质为主。研究区功能定位为水源保护区和生态涵养区,土地利用以林地为主,耕地主要分布于密云水库以南较为平坦的区域,如图1所示。

1.2 数据获取

1980年采样点数据来源于第2次土壤普查,

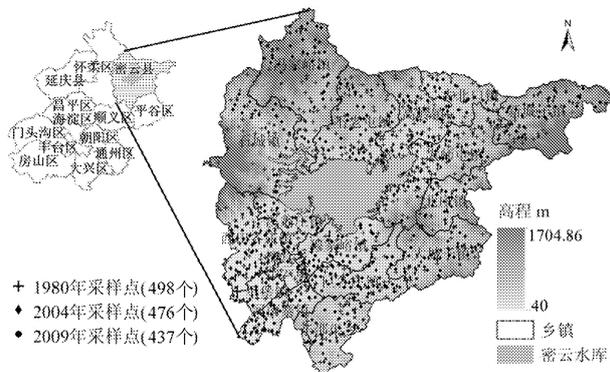


图1 研究区地理位置、采样点分布和高程

Fig.1 Map of site, sampling points and elevation for study area

2004和2009年数据来源于采样实测数据,布设采样点时充分考虑了第2次土壤普查样点分布,先实施网格布点,并在此基础上根据土地利用类型、土壤质地进行分层抽样,田间确定样点后,用GPS定位并记录实际取样点的经、纬度。采集农田耕作层土样(0~30 cm)时,每个样点在直径10 m范围内取5个点混合为待测样带回室内分析。

土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。通过异常值分析,1980、2004和2009年分别确定有效采样点498、476和437个(图1)。用于土壤有机质空间趋势和时间稳定性分析的样点数为46个,包括1980、1990、1995、2000、2002、2004、2006和2009年等8年数据,其中1990、1995、2000、2002和2006年数据来源于北京市数字土壤系统。除了采样点数据外,获取研究区高精度数字高程(25 m×25 m)、土壤图(1:50 000)等相关基础图件。2004、2009年土地利用现状图来源于北京市数字土壤系统,1980年土地利用现状图由第2次土壤普查数据矢量化获取,均采用GB/T 21010—2007进行分类。

2 理论与方法

目前,多采用半方差模型和普通克里格法研究土壤有机质时空变异特征,尚缺乏对研究区和数据特征进行系统的分析,很难全面、准确地掌握区域土壤有机质时空变化特征。在地统计学中,土壤属性变量被作为一种区域化变量来分析,土壤属性的空间变异性可由两部分来代表,即空间确定性部分和随机部分,也称趋势成分和随机成分^[13]。在普通克里格法中,假定确定性部分在空间上是常量,主要是估计随机部分。这些假定在景观高度异质性区域会限制克里格法的应用。土壤特征可能在研究区内表现出明显的趋势,在这种情况下确定性部分在空间上不再是常量,也就不能满足普通克里格法对数据的要求,需要采用地统计混合模型,包括泛克里格

法、外部趋势克里格法、协克里格法和回归克里格法等。针对区域景观高度异质的特征,选择地统计混合模型,结合传统统计学方法,并引入空间趋势和时间稳定性评估模型,形成一套景观高度异质区土壤有机质时空变化特征研究的时空联合模型(图 2)。

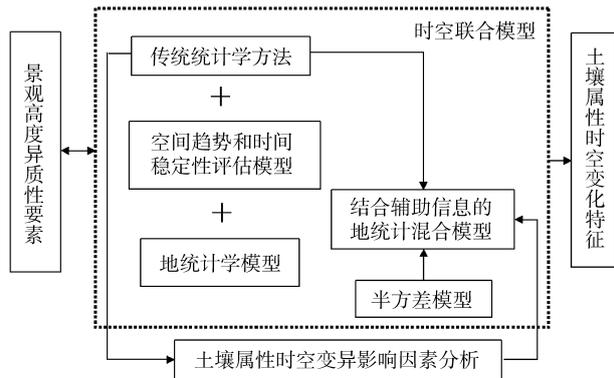


图 2 景观高度异质区土壤属性时空变异研究技术体系

Fig. 2 Technical system of temporal and spatial variability of soil properties for highly heterogeneous landscape region

2.1 回归克里格模型

地统计混合模型主要包括泛克里格法、外部趋势克里格法、回归克里格法和协克里格法等,本研究采用回归克里格法,该方法是将趋势成分和残差成分独立预测的一种方法^[14-18]。先利用已采样点上的目标变量和辅助变量,拟合线性回归方程,并估测预测点上趋势部分

$$z(x_0) =$$

$$a_0 + a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + \dots + a_n y_n = m^*(x_0) \quad (1)$$

式中 a_0, a_1, \dots, a_n ——线性回归方程系数

y_1, y_2, \dots, y_n ——进入拟合方程的辅助变量

$z(x_0), m^*(x_0)$ ——预测点的趋势部分

利用采样点上的实测值和回归预测值得到采样点上的残差值 $r(x_i)$ 。然后,采用普通克里格法估计预测点残差成分

$$r^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i r(x_i) \quad (2)$$

式中 λ_i ——分配给残差值 $r(x_i)$ 的权重

$r(x_i)$ ——采样点上的残差

n ——样点残差的个数

$r^*(x_0)$ —— x_0 位置上的预测点残差成分

最后通过趋势成分和残差成分相加就得到的预测点上目标土壤变量的回归克里格法预测值。

$$z_{RK}^*(x_0) = m^*(x_0) + r^*(x_0) \quad (3)$$

式中 $z_{RK}^*(x_0)$ —— x_0 位置目标土壤变量的回归预测值

地统计学相关理论和方法可以进一步参照文献^[19-22]。本文借助 ArcGIS 10.0 软件地统计功能进行地统计相关分析。

2.2 土壤有机质空间趋势分析和时间稳定性评估

研究区土壤有机质的空间趋势可用空间趋势图表示。空间趋势图是通过计算多次采样的采样点土壤有机质的平均值,经克里格插值后得到,它可以在一定程度上反映区域土壤有机质含量整体高低程度。计算式为

$$\bar{O}_i = \frac{\sum_{t=1}^m O_{it}}{m} \quad (4)$$

式中 \bar{O}_i ——不同时期 i 个样点土壤有机质含量平均值, g/kg

O_{it} ——第 i 个样点在第 t 个采样日期上所测得的土壤有机质含量实测值, g/kg

m ——采样次数,取 $m=8$

土壤有机质时间稳定性是通过不同采样时间多次采样得到的实测值的变异系数来衡量,本研究采用最初由 Blackmore^[23] 提出的变异系数计算方法,经克里格插值后得到。时间稳定变异系数为

$$V_{ii} = \frac{\sqrt{\frac{n \sum_{t=1}^m O_{it}^2 - \left(\sum_{t=1}^m O_{it} \right)^2}{m(m-1)}}}{\frac{\sum_{t=1}^m O_{it}}{m}} \quad (5)$$

式中 V_{ii} —— t 采样时间下的时间稳定变异系数

为了更加准确地反映研究区土壤有机质空间分布整体特征和时间稳定性,本研究中用于土壤有机质空间趋势和时间稳定性分析的数据包括 1980、1990、1995、2000、2002、2004、2006 和 2009 年等 8 年数据。

3 结果和分析

3.1 基于传统统计学的土壤有机质时空变异特征分析

对 1980、2004 和 2009 年采样点数据进行统计分析,获取每年对应的主要描述性统计特征值,采用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 方法进行数据正态分布检验(表 1)。

表 1 显示,1980、2004 和 2009 年土壤有机质变异系数分别为 67.24%、32.87% 和 38.60%,1980 年最大,2004 年最小,这和 3 年的土壤有机质含量的均值和标准差是一致的。按照一般对变异系数(CV)值的评价,当变异系数 $C_v < 10\%$ 时,称弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性,三期土壤有机质含量均呈中等空间变异。通过 K-S 正态性检验(常规)显示,1980、2004 和 2009 年土壤有机质均呈

对数正态分布($p_{lg(SOM1980)} = 0.059 > 0.05$, $p_{lg(SOM2004)} = 0.162 > 0.05$, $p_{lg(SOM2009)} = 0.357 > 0.05$)。1980年的极差和标准差最大,离散程度最高,2004年最小,离散程度最低,2009年介于两者之间。有机质的变

化范围为(18.21 ± 12.24) g/kg, (13.93 ± 4.58) g/kg, (14.17 ± 5.47) g/kg,通过 ANOVA,3个年份的土壤有机质含量存在明显显著性差异($F = 26.27$, 自由度为 21766, $p = 0.00035 < 0.001$)。

表 1 不同年份土壤有机质统计特征

Tab.1 Descriptive statistics of soil organic matter for different years

变量	样本数	极差/g·kg ⁻¹	平均值 ± 标准差/g·kg ⁻¹	偏态值	峰度	变异系数/%	K-S 检验 p 值
SOM1980	498	54.16	18.21 ± 12.24 ^a	1.38	1.17	67.24	
lg(SOM1980)	498			0.41	-0.72		0.059
SOM2004	476	28.21	13.93 ± 4.58 ^c	0.79	1.00	32.87	
lg(SOM2004)	476			-0.19	-0.09		0.162
SOM2009	437	32.47	14.17 ± 5.47 ^b	0.87	1.14	38.60	
lg(SOM2009)	437			-0.34	0.20		0.357

注:SOM1980、SOM2004 和 SOM2009 表示 1980、2004 和 2009 年土壤有机质含量;lg(SOM1980)、lg(SOM2004) 和 lg(SOM2009) 表示 1980、2004 和 2009 年土壤有机质含量的对数值,下同。

3.2 基于空间趋势分析和时间稳定性评估模型的土壤有机质时空变异分析

利用式(4)计算出 1980、1990、1995、2000、2002、2004、2006 和 2009 年 8 年采样时间的重合采样有机质含量平均值,采用 K-S 检验计算后数据分布特征,数据满足对数正态分布($p = 0.113 > 0.05$),采用普通克里格法得到土壤有机质分布的空间趋势图(图 3a)。利用式(5)计算 8 个年份重合采样点土壤有机质时间稳定变异系数,并对计算后的数据进行 K-S 正态分布检验,数据满足对数正态分布($p = 0.072 > 0.05$)。采用普通克里格法,结合时间稳定性分级标准(表 2),得到土壤有机质时间稳定性变异系数评估图(图 3b),从而可以帮助了解土壤有机质含量随时间的变化趋势。

表 2 土壤有机质时间稳定性级别划分指标

Tab.2 Temporal stability class and their conditions for soil organic matter

稳定性级别	代码	时间稳定变异系数/%
稳定	S	< 10
	MS1	10 ~ 15
中等稳定	MS2	15 ~ 20
	MS3	20 ~ 25
不稳定	US	> 25

从图 3 可以得知研究区有机质含量空间分布和时间稳定性总体情况。研究区土壤有机质含量以 10 ~ 15 g/kg 和 15 ~ 20 g/kg 两级为主,从西南到东北,土壤有机质含量呈扇形逐渐增加,西南低,其他区域相对较高。研究区土壤有机质平均变异系数为 16.09%,处于中等稳定的 MS2 之间,最大值和最小值分别为 31.42% 和 6.95%(图 3b)。研究区土壤有机质以中等稳定为主,其中 MS1、MS2 和 MS3 面积分别为 711.46、1161.03 和 228.37 km²,三者占研

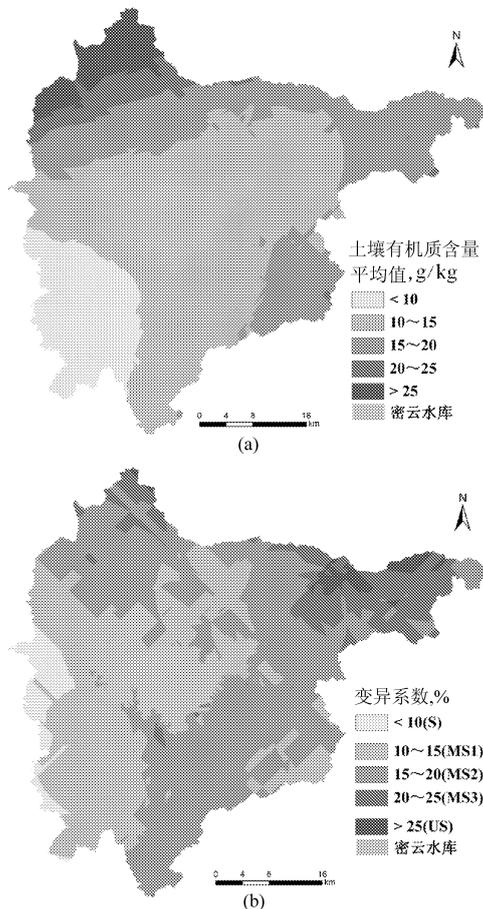


图 3 土壤有机质空间趋势和时间稳定性分析评估

Fig.3 Spatial trends and analysis and evaluation of time stability of soil organic matter

(a) 空间趋势分析 (b) 时间稳定性评估

究区总面积的 90% 以上;稳定区域主要集中在西南部的西田各庄镇和十里堡镇,不稳定区域主要分布于冯家峪镇北端以及新城子镇的东北部。土壤有机质含量时间稳定性与土壤有机质含量呈相反的空间格局,土壤有机质含量越大的区域,时间稳定性越

差。环密云水库四周,地势较为平坦,利用方式以农业用地为主,在种植习惯、施肥方式等的综合影响下,这些区域有机质含量虽然总体较低,但其时间稳定性较强。

3.3 基于半方差及地统计混合模型的土壤有机质时空变异分析

利用 ArcGIS 10.0 地统计模块获取 1980、2004 和 2009 年土壤有机质半方差模型和参数(表 3)。

表 3 1980、2004、2009 年土壤有机质半方差函数模型及其相关参数

Tab.3 Semi-variogram model of SOM transformed by Logarithmic and its parameters

土壤有机质	模型	趋势	变程/km		各项异性比	块金值	偏基台值	块基比/%
			长轴	短轴				
lg(SOM1980)	指数	二阶	10.54	9.79	1.08	0.10	0.19	33.51
lg(SOM2004)	指数	二阶	10.69	7.07	1.51	0.04	0.02	72.57
lg(SOM2009)	指数	二阶	10.30	5.21	1.98	0.09	0.03	72.95

块基比 $C_0/(C_0 + C_1)$ 是随机部分引起的空间变异占系统总变异的比。若该比值越小,说明由随机部分引起的空间变异性程度越小;相反,则由空间自相关部分引起的空间变异性程度越大^[24]。从结构性因素看, $C_0/(C_0 + C_1)$ 的比值可表示系统变量的空间相关性程度,比值小于 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;比值在 25% ~ 75%,变量具有中等的空间相关性;大于 75%,变量空间相关性很弱^[5, 25]。由表 3 可知,1980、2004 和 2009 年对数转换的土壤有机质 $C_0/(C_0 + C_1)$ 分别为 33.51%、72.57% 和 72.95%,1980 年土壤有机质块基比最小,2009 年最大,三者均呈中等空间相关性。随着时间的推移块基比呈逐渐增加的趋势,随着时间的变化随机部分引起空间变异的程度越大,空间相关性越差,这和变程的变化趋势基本一致。拟合的 1980、2004 和 2009 年对数土壤有机质半方差模型在东西方向(长轴)上基本没有改变,分别为 10.54、10.69 和 10.30 km,这表明在东西方向主要受地形因素、土壤质地等区域性变量影响。而在南北方向上分别在 9.79、7.07 和 5.21 km 变程内呈现空间相关性,且随着时间变化变程呈下降趋势,从 1980 到 2004 年仅下降 2.72 km,而从 2004 年到 2009 年,短短的 5 年下降了近 1.86 km。呈现上述下降趋势主要是由于农业结构的调整和种植模式多样化,同时农民个人施肥行为,如施肥方式、肥料投入量将在一定程度上加大土壤有机质空间分布的随机性,这种变化在 2004 年以后更加突出。

研究区为景观高度异质性区域,趋势成分不再为一常数,为了更加准确地反映土壤有机质空间变异特征,本研究将趋势和残差成分独立预测,采用以高程(h)和土壤质地为辅助信息的回归克里格法模拟区域土壤有机质含量分布情况,其中土壤质地作为分类变量(Categorical variable)。回归分析分类变量赋值方法如下:假定某一分类变量包括 x 个亚类,

则可由它派生出 $x - 1$ 个哑变量(Dummy variables),以某一亚类为对照组,则其他亚类被赋予 0 或 1。根据不同采样点土壤质地类型的情况,完成对采样点不同哑变量的赋值,这样的赋值方法能够保证回归分析对自变量的独立性,详细的赋值过程可进一步参阅文献[26]。本研究中采样点土壤质地包括轻壤质、砂壤质、砂质和其他 4 种,以其他为对照组,由此派生出 3 个哑变量,分别记作 T_1 、 T_2 和 T_3 ,这 3 个哑变量分别代表轻壤质、砂壤质和砂质。采用多元线性逐步回归拟合土壤有机质与环境变量的关系,拟合方程及相关参数为

$$y_{\text{SOM1980}} = 6.567 + 0.045h \quad (p < 0.01, R^2 = 0.415) \quad (6)$$

$$y_{\text{SOM2004}} = 10.523 + 0.018h - 3.872T_3 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.369) \quad (7)$$

$$y_{\text{SOM2009}} = 9.940 + 0.016h - 3.872T_3 \quad (p < 0.01, R^2 = 0.274) \quad (8)$$

回归结果显示,进入 1980、2009 年拟合方程的变量为高程,而进入 2004 年拟合方程的变量为高程和 T_3 (砂粒),3 个年份的土壤有机质均与高程呈正相关($p < 0.01$),高程、土壤质地能在一定程度上解释土壤有机质的空间变异($R^2_{1980} = 0.415$, $R^2_{2004} = 0.369$, $R^2_{2009} = 0.274$),最高能够解释总方差的 41.5%,随着时间的推移,人为因素影响的增强,高程解释土壤有机质空间变异的能力逐渐降低,2004 年土壤有机质还与土壤质地中的砂质呈负相关,砂粒含量越大,有机质含量越小,即砂质将影响土壤有机质含量大小。研究区的砂质土壤主要分布于西南部,该区域有机质含量较低。

利用回归方程和预测点上辅助变量值,估计预测点上的趋势成分。图 4 为 3 期回归残差的半方差模型及其参数图。三期残差数据满足正态分布和二阶平稳,采用普通克里格法插值对残差进行估测,最后将估计的趋势成分和残差成分相加就得到的预测点上目标土壤变量的回归克里格法预测值(图 5)。

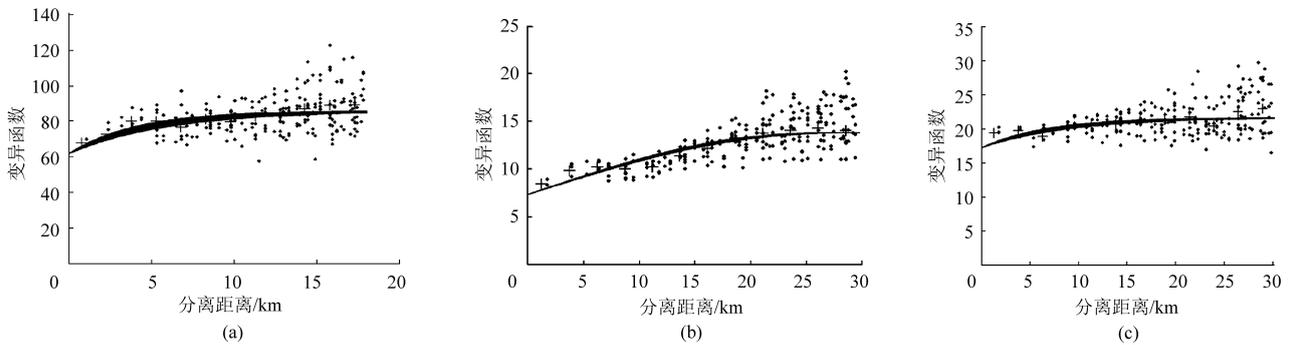


图4 土壤有机质回归残差半方差与参数

Fig. 4 Semivariogram model and related parameters of regression residuals

(a) 1980年 (b) 2004年 (c) 2009年

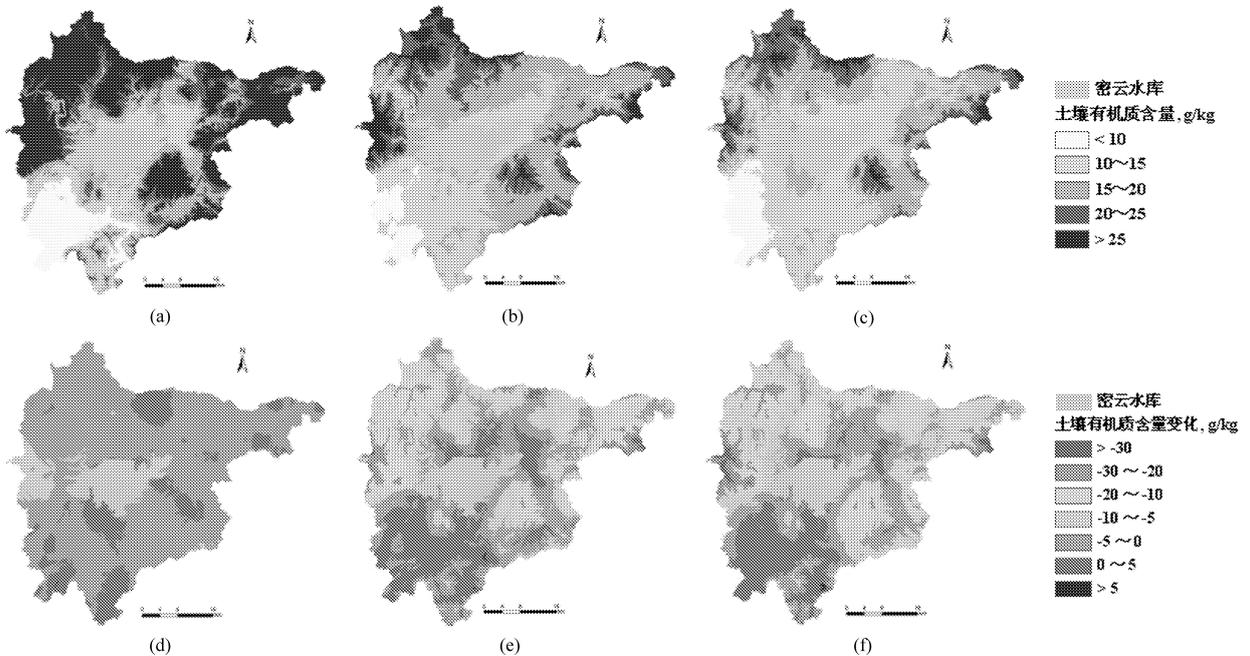


图5 研究区土壤有机质含量分布与变化

Fig. 5 Distribution and change maps of soil organic matter content in the study area

(a) 1980年 (b) 2004年 (c) 2009年 (d) 2004~2009年 (e) 1980~2004年 (f) 1980~2009年

研究区为北京市水源地,地形呈北高南低的分布格局,耕地主要集中分布于西南低海拔区域。图5显示,3个年份均表现出西南、环密云水库地区土壤有机质含量低,而地势较高的东、西和北部地区土壤有机质含量较高的空间分布格局,土壤有机质含量低于 5 g/kg 的区域面积较小,主要分布于西南耕地区,大于 25 g/kg 的区域面积较大,1980年占总面积的53%,而2004和2009年,大于 25 g/kg 的区域仅占总面积不到2%。图5a~5c显示,随着时间的推移,土壤有机质含量较高的区域所在比例逐渐减小,较低区域的面积逐年扩展,区域土壤有机质含量趋于一致。图5d~5f显示,1980~2009和1980~2004年间土壤有机质变化趋势基本相同,基本呈现有机质含量高的区域变化程度大,越低的区域反而呈增加趋势,越高的区域呈减少趋势,土壤有机质含量变化区间主要集中于 $-20\sim 5\text{ g/kg}$,增加的区域

主要集中于西南区,这些区域是研究区农业用地区,早期这些区域利用强度低,后期实施了测土配方实施工程,土壤有机质呈增加趋势,而东、西、北部自1980年以来受人干扰较强,土壤有机质含量呈减小趋势。

3.4 土壤有机质时空变异影响因素分析

采用 ArcGIS 10.0 空间分析功能从研究区土壤图中抽取样点土壤质地类型,采用方差分析分析不同土壤质地类型下的有机质含量的差异性。为定量分析不同土壤质地类型之间各有机质含量的差异是否显著,对4组土壤质地类型的土壤有机质含量进行了方差分析。Levine's 方差齐次性检验表明4组土壤质地类型的有机质含量均值数据均满足方差齐性,故两两比较分析采用最小显著性差方法(Least-significant difference, LSD)。

1980、2004和2009年不同质地类型有机质含

量均值由大到小依次为轻壤质、砂壤质、砂质、其他(砾石、中壤质等)(表 4)。轻壤质土壤有机质含量均值最高,砂质土壤有机质含量最低,1980 年砂质还不到轻壤质的 50%,同一年份不同质地之间差异较为明显,三期均表现出砂质土壤的有机质含量与其他土壤均存在显著性差异($p < 0.05$)。随着时间的推移,除了砂质,其他土壤质地类型土壤有机质含量均值和标准差逐渐趋于一致,且标准差越来越小,

这些说明土壤质地越偏粘,有机质含量越高,这和其他相关研究的发现也是一致的^[9, 27]。土壤有机质的空间分布格局和土壤质地是相符合的,砂质土壤主要分布于研究区西南的西田各庄镇、河南寨镇和十里堡镇等乡镇。研究区西南的地貌类型包括倾斜地、台地、倾斜平原和河漫滩,这些地区河洪水泛滥、河道变迁剧烈,除了台地土壤质地偏黏外,其余的地貌类型质地均较粗。

表 4 不同土壤质地组土壤有机质含量均值两两比较结果

Tab. 4 Results of post hoc tests in ANOVA with LSD method (with mean values of SOM content in each soil texture types group)

土壤质地	样本数	1980 年		2004 年		2009 年	
		土壤有机质含量 (均值 ± 标准差)/g·kg ⁻¹	样本数	土壤有机质含量 (均值 ± 标准差)/g·kg ⁻¹	样本数	土壤有机质含量 (均值 ± 标准差)/g·kg ⁻¹	样本数
轻壤质	422	18.96 ± 12.08 ^a	368	14.52 ± 4.40 ^a	345	14.47 ± 5.21 ^a	
砂壤质	55	16.40 ± 13.70 ^a	63	12.77 ± 4.60 ^b	71	13.88 ± 6.38 ^a	
砂质	16	7.11 ± 3.67 ^c	23	7.54 ± 1.57 ^c	12	7.49 ± 2.38 ^b	
其他	5	10.14 ± 1.22 ^b	22	13.50 ± 3.60 ^{ab}	9	13.61 ± 5.11 ^a	

注:数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

20 多年来,研究区耕地面积呈减小趋势,由 1980 年的 502.59 km²降低到 2009 年的 226.11 km²,将近减小一半,但不论哪一时期,研究区耕地均集中于西南的西田各庄镇、河南寨镇和十里堡镇等乡镇。研究区为首都北京水源地和生态涵养区,自 1980 年以来,林地呈快速增加趋势,2004 年较 1980 年新增了 488.15 km²,园地呈逐年增加趋势,1980 年园地面积占研究区不到 5%,而到 2009 年占到总面积的将近 10%,增加了 1 倍多(图 6)。

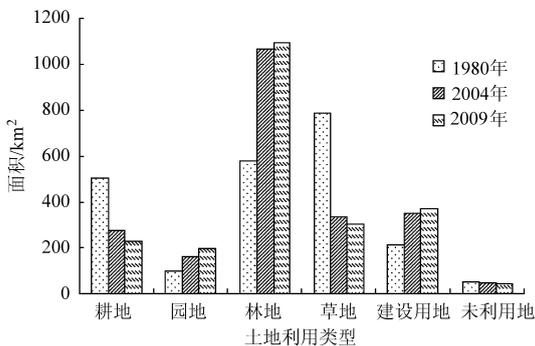


图 6 1980、2004 和 2009 年土地利用类型及面积柱状图

Fig. 6 Histogram of land use types and area for the study area in 1980, 2004 and 2009

采用 ArcGIS 10.0 空间分析功能从不同年份的土地利用现状图中抽取采样点土地利用类型,采用方差分析分析不同土地利用类型下的有机质含量的差异性。为定量分析不同土地利用类型之间有机质含量的差异是否显著,对 5 组土地利用类型的有机质含量进行了方差分析。Levine's 方差齐次性检验表明 5 组土地利用类型有机质含量数据均满足方差

齐性,故两两比较分析采用 LSD 法。

1980 年,不同土地利用类型土壤有机质含量均值相对较大,标准误差也较大,2004 和 2009 年,不同土地利用类型的土壤有机质含量呈现趋同效应,均值绝对差越来越小(表 5)。1980 年土地利用方式单一,人为因素对土地的影响较少,随着时间的推移,土地利用方式逐渐多样化,人为干预从东南部向整个研究区扩展,使得土壤有机质含量逐渐趋于一致,区域差异逐渐缩小;就土地利用类型而言,不同哪个年份,耕地土壤有机质含量均值相对较小,且随着时间的变化,基本呈增加趋势,这些区域是研究区的传统农作区,1980 年耕地施肥量相对较小,同时种植密度较低,土地利用强度较低,1980~2004 年,耕地土壤有机质含量呈减小趋势,这段时间耕地的种植密度加大,土地利用强度逐渐增强,大多数农作物秸秆被移走作为柴火,秸秆还田量少。更多的肥料和更大的种植密度被用作生产更多的农产品。这段时间内有机和无机肥料的施用量将小于由农作物带走的量,故而导致这些区域在此阶段呈现减少趋势。自 2005 年国家实施测土配方工程以来,农田的施肥更加合理,并加大了有机肥的施入量,耕地土壤有机质含量呈现增加趋势。不同时期的林地主要分布于高海拔地区(冯家峪镇、石城镇、不老屯镇、高岭镇、古北口镇、新城子镇等)。林地的土壤有机质含量呈减少趋势,1980 年林地区多数属于天然的、乔灌草结合林地,人为干预少,其土壤有机质含量相对较高,但随着“改革开放、家庭联产承包责任制”

等政策的实施,虽然林地的面积增加了,但林地的投入相对较低,林木自我恢复土壤有机质含量不足于

抵消减少的量,导致研究区林地土壤有机质含量呈减少趋势。

表 5 不同年份不同土地利用类型组土壤有机质含量均值两两比较结果

Tab. 5 Results of post hoc tests in ANOVA with LSD method (with mean values of SOM content in each land use types in different years)

土地 利用类型	1980 年		2004 年		2009 年	
	样本数	土壤有机质含量 (均值 ± 标准差)/g·kg ⁻¹	样本数	土壤有机质含量 (均值 ± 标准差)/g·kg ⁻¹	样本数	土壤有机质含量 (均值 ± 标准差)/g·kg ⁻¹
耕地	219	12.91 ± 8.38 ^c	235	12.76 ± 4.14 ^c	144	13.58 ± 5.11 ^a
园地	29	22.26 ± 14.00 ^{ab}	58	15.42 ± 4.32 ^{ab}	125	15.00 ± 5.89 ^a
林地	110	21.29 ± 12.83 ^b	75	15.97 ± 5.28 ^a	79	13.46 ± 5.49 ^a
草地	114	26.05 ± 13.03 ^a	24	14.43 ± 4.62 ^{ab}	29	15.30 ± 4.09 ^a
其他	26	10.89 ± 4.52 ^c	84	14.20 ± 4.32 ^b	60	14.20 ± 5.79 ^a

注:数据后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。

4 结论

(1) 引入空间趋势分析和时间稳定性评估模型能够更加全面地反映土壤有机质时空变异,构建的时空联合模型能够较好地体现时空变化的细节特征。

(2) 1980、2004 和 2009 年土壤有机质含量存在显著差异($p = 0.00035 < 0.001$)。研究区土壤有机质平均时间稳定变异系数为 16.09%,以中等稳定为主,中等稳定性占总研究区面积的 90% 以上;有机质含量与时间稳定性分布格局正好相反,有机质含量越大的区域,时间稳定性越差。

(3) 1980、2004 和 2009 年土壤有机质均呈现中等空间相关性,且随着时间的推移,随机部分占空间变异的比例越大。在东西方向主要受地形因素、土壤质地等区域性变量影响。而在南北主要是由于农业结构的调整和种植模式多样化的影响。

(4) 1980、2004 和 2009 年区域土壤有机质含量分布趋势一致,西南低、其他区域高,而变化趋势

呈现有机质含量越高的区域,变化幅度越大。越低的区域反而呈增加趋势,越高的区域呈减少趋势,土壤有机质含量变化区间主要集中于 -20 ~ 5 g/kg 之间,增加的区域主要集中于西南区。

(5) 1980、2004 和 2009 年土壤有机质含量均值由大到小依次为轻壤质、砂壤质、砂质、其他(砾石、中壤质等),砂质土壤的有机质含量与其他土壤类型均存在显著性差异($p < 0.05$)。随着时间的推移,除了砂质,其他土壤质地类型土壤有机质含量均值和标准差逐渐趋于一致,且标准差越来越小,这些说明土壤质地越偏粘,有机质含量越高。就不同时期而言,1980 年的不同土地利用类型土壤有机质含量均值相对较大,标准误差也较大,2004 和 2009 年,不同土地利用类型的土壤有机质含量均值呈现趋同效应,均值绝对差越来越小;就土地利用类型而言,不论哪个年份,耕地土壤有机质含量均值相对较小,且随着时间的变化,基本呈增加趋势;林地的土壤有机质含量呈减少趋势。

参 考 文 献

- 1 Chevallier T, Voltz M, Blanchart E, et al. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol (Martinique) [J]. Geoderma, 2000, 94(1): 43 ~ 58.
- 2 Zhang Shirong, Sun Bo, Zhao Qiguo, et al. Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in a rehabilitating ecosystem [J]. Pedosphere, 2004, 14(4): 501 ~ 508.
- 3 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤有机质时空变异特征[J]. 生态学报, 2002, 22(12): 2 041 ~ 2 047. Zhang Shirong, Huang Yuanfang, Li Baoguo, et al. The spatio-temporal variability of soil organic matter in Huanghuaihai alluvial area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(12): 2 041 ~ 2 047. (in Chinese)
- 4 黄元仿, 周志宇, 苑小勇, 等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J]. 生态学报, 2004, 24(12): 2 776 ~ 2 781. Huang Yuanfang, Zhou Zhiyu, Yuan Xiaoyong, et al. Spatial variability of soil organic matter in arid hungriness [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(12): 2 776 ~ 2 781. (in Chinese)
- 5 Yuan Xiaoyong, Chai Xurong, Gao Rutai, et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter in a county scale agricultural ecosystem [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(5): 1 157 ~ 1 168.
- 6 赵汝东, 孙焱鑫, 王殿武, 等. 北京地区耕地土壤有机质空间变异分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 552 ~ 557. Zhao Rudong, Sun Yanxin, Wang Dianwu, et al. Research on spatial variability of soil organic matter in Beijing field [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 552 ~ 557. (in Chinese)
- 7 姜怀龙, 李贻学, 赵倩倩. 县域土壤有机质空间变异特征及合理采样数的确定[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 143 ~ 146.

- Jiang Huailong, Li Yixue, Zhao Qianqian. County-scale spatial variability of soil organic matter distribution and determination of reasonable sampling density [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(4): 143 ~ 146. (in Chinese)
- 8 胡克林, 余艳, 张凤荣, 等. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 764 ~ 771.
Hu Kelin, Yu Yan, Zhang Feirong, et al. The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(4): 764 ~ 771. (in Chinese)
- 9 Hu Kelin, Li Hong, Li Baoguo. Spatial and temporal patterns of soil organic matter in the urban-rural transition zone of Beijing [J]. *Geoderma*, 2007, 141(3 ~ 4): 302 ~ 310.
- 10 彭陶, 吕新. 绿洲棉田土壤有机质的时空变异性研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 563 ~ 567.
Peng Tao, Lü Xin. Study on spatio-temporal variation of soil organic matter in oasis cotton field [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(3): 563 ~ 567. (in Chinese)
- 11 白雪, 王文杰, 王维, 等. 浙江省宁波市土壤有机质的时空变异特征[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(2): 191 ~ 197.
Bai Xue, Wang Wenjie, Wang Wei, et al. Spatio-temporal variability characteristics of soil organic matter in Ningbo City, Zhejiang Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(2): 191 ~ 197. (in Chinese)
- 12 Li Hong, Parent L E, Karam A, et al. Potential of sphagnum peat for improving soil organic matter pool, water holding capacity, bulk density and potato yield in a sandy soil [J]. *Plant and Soil*, 2004, 265(1): 353 ~ 363.
- 13 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 14 Baxter S J, Oliver M A. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation [J]. *Geoderma*, 2005, 128(3 ~ 4): 325 ~ 339.
- 15 Herbst M, Diekkruger B, Vereecken H. Geostatistical coregionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes [J]. *Geoderma*, 2006, 132(1 ~ 2): 206 ~ 221.
- 16 Simbahan G C, Dobermann A, Goovaerts P, et al. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data [J]. *Geoderma*, 2006, 132(3 ~ 4): 471 ~ 489.
- 17 Zhang Shiwen, Huang Yuanfang, Shen Chongyang, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information [J]. *Geoderma*, 2012, 171 ~ 172: 35 ~ 43.
- 18 赵永存, 史学正, 丁东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(3): 379 ~ 385.
Zhao Yongcun, Shi Xuezheng, Ding Dongsheng, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China [J]. *Acta pedologica sinica*, 2005, 42(3): 379 ~ 385. (in Chinese)
- 19 Goovaerts P. *Geostatistics for natural resource evaluation* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1997.
- 20 Webster R, Oliver M. *Geostatistics for environmental scientists* [M]. UK: John Wiley & Sons, LTD., 2001.
- 21 Goovaerts P. *Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives* [J]. *Geoderma*, 1999, 89(1 ~ 2): 1 ~ 45.
- 22 王政权. *地质统计学及其生态学中的应用* [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- 23 Blackmore S. The interpretation of trends from multiple yieldmaps [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 26(1): 37 ~ 51.
- 24 陈翠英, 江永真, 袁朝春. 土壤特性空间变异性研究[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(10): 121 ~ 124.
Chen Cuiying, Jiang Yongzhen, Yuan Chaochun. Study on soil property spatial variability using R language [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(10): 121 ~ 124. (in Chinese)
- 25 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)
- 26 卢纹岱. *SPSS for Windows 统计分析* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- 27 McGrath D, Zhang C S. Spatial distribution of soil organic carbon concentrations in grassland of Ireland [J]. *Applied Geochemistry*, 2003, 18(10): 1629 ~ 1639.

(上接第 93 页)

- 14 Dong Xiang, Zhu Heping, Yang Xuejun, et al. System to investigate 3-D droplet impact on leaf surfaces [C] // *Proceedings of the 2012 ASABE Annual International Meeting*, 2012: 1337317.
- 15 Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. Droplet-wall collisions: experimental studies of the deformation and break up process [J]. *Multiphase Flow*, 1995, 21(2): 151 ~ 173.
- 16 Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C. On the modeling of liquid sprays impinging on surfaces [J]. *Atomization and Sprays*, 1998, 8(6): 625 ~ 652.
- 17 王军锋, 张娟娟, 王贞涛, 等. 风幕式气力辅助静电喷雾沉积特性 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(2): 61 ~ 65.
Wang Junfeng, Zhang Juanjuan, Wang Zhentao, et al. Deposition and distribution characteristics of air-assisted electrostatic spraying by wind-curtain [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(2): 61 ~ 65. (in Chinese)
- 18 Bussmann M, Chandra S, Mostaghimi J. Modeling the splash of a droplet impacting a solid surface [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(6): 3121 ~ 3132.