植物营养与肥料学报 2016,22(4):937-948 doi: 10.11674/zwyf.15135
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

河北省表层土壤有机碳和全氮空间变异特征性及影响因子分析

曹祥会[1],龙怀玉[1],周脚根[2],邱卫文[3],雷秋良[1*],刘 颖[1],李 军[1],穆 真[1]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,农业部面源污染控制重点实验室,北京 100081;
2 中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410125;3 The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited, Private Bag 4704, Christchurch, New Zealand)

摘要:【目的】在陆地生态系统中,土壤全氮和有机碳是重要的生态因子。本研究基于土壤调查获得大量土壤剖面的空间和属性信息,研究河北的土壤有机碳和全氮的空间分布特征,为河北的土壤养分监测和管理提供科学依据,同时也为其他类似地区土壤采样提供参考,减少采样成本。**【方法】**运用传统统计学和地统计学分析方法,以变异函数为工具,初步分析了河北土壤全氮和有机碳的空间变异特征,并应用普通克立格法和回归克里格法进行插值,得出全氮和有机碳含量的分布格局。**【结果】**研究区土壤有机碳和全氮的平均值分别为 15.25 g/kg 和 1.23 g/kg,变异系数分别为 0.73 和 0.63,属于中等强度变异。经对数转换后,土壤有机碳和全氮均符合正态分布。选择球状模型作为土壤有机碳和全氮的半方差函数理论模型,土壤有机碳和全氮的块金值/基台值的比值分别为 1.8% 和 1.2%,有机碳和全氮的块金系数均小于 25%,表明有机碳和全氮具有强烈的空间相关性。有机碳和全氮空间变异的尺度范围不同,分别为 50.400 km 和 59.200 km。研究区的有机碳总体空间分布规律是有机碳在北部较高、南部较低,呈自北向南递减趋势,土壤全氮与有机碳的空间分布趋势相似,但有机碳的空间变异特征较全氮明显,这种空间分布格局主要受环境因子、土壤质地、土壤类型以及土地利用类型等的影响,其中环境因子中的气温和海拔对有机碳和全氮的影响较大。通过比较普通克里格和回归克里格的预测结果,回归克里格能较好地反映东南部有机碳和全氮较低地区的局部变异外,对于西北部的山区也能更好地反映碳、氮与地形及气候等因素的关系。**【结论】**河北土壤有机碳和全氮的空间变异和分布特征较为类似,受地形地貌、气候等因素的影响。通过比较普通克里格法和回归克里格法的空间预测结果,回归克里格法可以消除环境因子的影响,从而得到更准确的空间预测结果,因此建议使用回归克里格法进行预测,以期获得一个更为准确的土壤有机碳和全氮的空间预测结果。

关键词: 地统计学;普通克里格;回归克里格;有机碳;全氮;空间变异;影响因子
中图分类号: S718 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2016)04-0937-12

Analysis of spatial variability and influencing factors of topsoil organic carbon and total nitrogen in Hebei Province

CAO Xiang-hui[1], LONG Huai-yu[1], ZHOU Jiao-gen[2], QIU Wei-wen[3], LEI Qiu-liang[1*], LIU Ying[1], LI Jun[1], MU Zhen[1]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Non-point Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3 The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited, Private Bag 4704, Christchurch, New Zealand*)

Abstract:【Objectives】 In terrestrial ecosystem, soil total nitrogen and organic carbon are important ecological factors. In this paper, spatial distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen are studied using spatially surveyed soil profile information. It is expected that the outcomes of this study can provide scientific basis not only for monitoring and managing soil nutrients, but also for cost-effective soil sampling planning in the similar

收稿日期: 2015-03-16 **接受日期:** 2015-07-26 **网络出版日期:** 2016-05-05
基金项目: 宁夏回族自治区土系调查与土系志编制项目(2014FY110200A07)资助。
作者简介: 曹祥会(1990—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要从事土壤方面的研究。E-mail: 820646658@qq.com
* 通信作者 Tel: 010-82108704, E-mail: leiqiuliang@caas.cn

regions. 【**Methods**】 Both traditional statistic and semi variogram methods are used to study the spatial variability of total nitrogen and organic carbon of the soils. And the distribution patterns of soil total nitrogen and organic carbon are examined using Ordinary Kriging and Regression Kriging. 【**Results**】 The means of soil organic carbon and total nitrogen in the study area are 15.25 g/kg and 1.23 g/kg respectively. And the variance coefficients were 0.73 and 0.63 respectively, which are explained as medium spatial variability. The log transformed soil organic carbon and total nitrogen contents have normal distribution. The theoretical semi-variogram models of soil organic carbon and total nitrogen are all fitted with spherical model well. The nugget and sill ratios of soil organic carbon and total nitrogen are 1.8% and 1.2% respectively. Nugget coefficient of organic carbon and total nitrogen is less than 25%, which indicates that organic carbon and total nitrogen are strongly spatial correlated. Spatial heterogeneity ranges of organic carbon and total nitrogen are different. The range value for soil organic carbon is 50.400 km, while that for total nitrogen is 59.200 km. The overall distribution trend of soil organic carbon in this region is that it is higher in the North than in the South. Although the spatial distribution pattern of the total nitrogen is similar with the soil organic carbon, the spatial variability of organic carbon is significantly higher than that of total nitrogen. The influence of temperature and latitude on spatial variability of the soil organic carbon is more significant than other factors such as soil texture and land use. Based on the predicted values between ordinary kriging and regression kriging, regression kriging not only can reflect the local variation of organic carbon and total nitrogen in the Southeast area, but also can reveal the relationship between carbon, nitrogen, and topographic and climatic factors in the Northwest mountainous area. 【**Conclusions**】 Spatial variability and distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen are similar, which are related with topography, geomorphology and climate etc. Between regression and ordinary kriging, the regression kriging is more suitable to predict spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen.

Key words: geostatistics; ordinary kriging; regression kriging; organic carbon; total nitrogen; spatial variability; influencing factors

土壤有机碳和全氮是全球变化研究中的核心内容。在陆地生态系统中，土壤全氮和有机碳是重要的生态因子[1-3]。一方面，土壤是生态系统中物质与能量交换的重要场所，在全球碳、氮循环中起着十分重要的作用；另一方面，土壤碳和氮不仅为植物生长提供碳和氮源，而且直接影响土壤结构和团聚体的形成以及植物群落的组成与生理活力[4-5]。土壤有机碳和全氮在小区域尺度上的空间分布格局可为土壤生产力、土壤水文特性和以碳为基础的温室气体的收支研究提供重要的信息[6]，尤其是表层土壤有机碳和全氮，易受人为及环境等因素的影响。因此，通过土壤调查获得大量土壤剖面的空间和属性信息，对于土壤碳、氮循环的研究具有重要意义[7]。

国内学者对土壤有机碳和全氮的空间分布等进行了诸多的研究和分析[8-12]，结果表明土壤有机碳和全氮在空间分布上具有不均一性，是发生变化的连续体，同时有机碳和全氮具有较为一致的空间分布格局。土壤有机碳空间分布的影响因子较多，如气候、地形、岩性、土壤和土地利用方式等[13]。由于土壤物理、化学过程以及生物过程在不同方向上存在显著差异，土壤全氮同样具有随机性和结构性的空间变异性质[14-16]。土壤空间变异性是尺度的函数，不同尺度上同一变量的自相关程度相差极大，较小采样间距更能揭示土壤养分的变异性，较大采样间距一般只能揭示土壤养分的空间分布格局[17-18]。为了定量土壤有机碳和全氮的空间分布特征，地统计学方法已被广泛应用。普通克里格法是在给定一个随机过程的实测值的条件下，对未采样点的取值进行线性无偏最优估计，是土壤属性空间预测中应用最为广泛的随机插值方法之一[19]。但是，在地形、气候等因子的影响下，直接应用普通克里格法预测精度不高。近些年来，结合回归分析和普通克里格法进行预测的回归克里格法是混合插值技术中最有效的方法之一，在多数情况下回归克里格方法得到的预测结果比常规的地统计学方法获得的预测结果更精确[20]。

从以往研究来看，大多主要采用普通克里格法在小区域尺度进行研究，同时未考虑影响土壤有机碳和全氮空间变异的影响因子。本研究在前人研究

的基础上,基于野外土壤调查的表层土壤信息资料,一方面应用经典统计学和地统计学相结合的方法,通过普通克里格插值法探讨河北省域尺度上表层土壤有机碳和全氮的空间变异特征;另一方面,分析影响有机碳和全氮的空间变异的因子,进而通过回归克里格法得出土壤有机碳和全氮的空间预测图,通过比较回归克里格法和普通克里格法得出的预测图,以期获得一个更为准确的土壤有机碳和全氮的空间预测结果。这将为河北的土壤养分监测和管理提供科学依据,同时也为其他类似地区土壤采样提供参考,减少采样成本。

1　研究区域概况与研究方法

1.1　研究区概况

河北省地处东经 113°27′～119°50′,北纬 36°05′～42°40′之间。西北环山,东临渤海,东南部是广阔的华北平原,土地总面积 18.88 万 km^2,占全国总面积的 1.9%。属于温带大陆性季风气候,全省年平均气温 9.67℃,年平均降水量 536 mm。全省地貌有高原、山地、平原,海拔高度大致从西北向东南逐级下降。成土母质主要包括残积物、坡积物以及黄土母质等;植被类型主要有阔叶林和针叶林等;土壤类型主要有 21 种,主要包括潮土、褐土等;土地利用主要有耕地、林地以及草地等,其中耕地面积达到 39.91%。

1.2　土壤样品采集及处理

样点的布设要具有代表性、空间分布的均匀性,主要根据当地地质地貌特点、土壤类型以及土地利用方式,在 ArcGIS 中进行叠加,布设了 140 个剖面点,于 2010 年 8 月进行采集,土壤采样深度 0—100 cm,并用 GPS 记录下剖面点的经纬度和高程,并详细记录采样点周围的景观信息(图 1)。实验室测定不同土壤剖面层次的土壤有机碳含量(采用浓硫酸 - 重铬酸钾氧化法)和土壤全氮(采用凯氏定氮法)[21]。由于剖面分层采样,为保证分析的土壤深度一致性,对于不足 20 cm 的土层,采用加权平均法计算获得 0—20 cm 表层土壤的有机碳和全氮含量[22]。

1.3　变异函数计算

地统计学是以区域化变量理论为基础,以半方差函数为基本工具的一种数据方法,常用的插值法为 Kriging 插值法[14]。半方差函数是地统计学解释土壤有机碳和全氮空间变异结构的理论基础[23]。

半方差函数模型有 3 个重要函数:块金值(Nugget)、基台值(Sill)及变程(Range)。块金值由测量误差和最小取样间距内土壤性质(施肥、耕作措施、种植制度等)的随机因子引起,基台值反映区域化变量受结构性因素(土壤类型、气候、地形、植被等)影响的程度。土壤特性的空间相关性可根据块金值与基台值之比 Co/(Co + C)来划分[24],称为块金系数,块金系数高,说明由随机部分引起的空间变异性程度较大,相反则由结构性因素引起的空间变异性程度较大。当 Co/(Co + C) < 25%时,变量具有强烈空间相关性;Co/(Co + C)为 25% ～75%时,变量具有中等空间相关性;而 Co/(Co + C) > 75%时,变量空间相关性很弱[25]。变程反映区域变量的空间变异特性,在变程外区域变量空间独立,在变程内相关。Kriging 插值方法则利用原始数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行最优无偏估值[25]。

1.4　Kriging 插值方法及精度检验

1)普通克里格法(Ordinary kriging, OK)。基于土壤属性的空间连续性,通过邻近的相关观测点权重均值来预测采样点位置的土壤属性值,是土壤属性空间预测中应用最为广泛的方法之一。

2)回归克里格法(Regression-kriging, RK)。以常规的多元回归分析技术和相关的辅助预测数据来分离趋势项,然后对残差进行普通克里格估计,最后将多元回归预测的趋势项和残差的普通克里格相加进行估值,回归克里格方法中的趋势项是辅助预测数据的函数[26]。

空间预测精度采用独立验证法进行评价。在 140 个采样点数据中,随机均匀地抽取 31 个样点作为验证样点,它们不参与插值过程,利用其余 109 个采样数据进行插值。通过验证点处土壤有机碳和全氮的实际观测值和预测值来进行预测精度评价,具体采用平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)2 个指标,分别见公式(1)和(2):

$$ME = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[Z(x_i) - Z^*(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[Z(x_i) - Z(x_i)]^2} \quad (2)$$

式中,n 为验证点的个数,$Z(x_i)$ 和 $Z^*(x_i)$ 分别为样点处的实测值和预测值。ME 越接近零,则预测的精度越高;$RMSE$ 越小,表明预测值愈接近实测值,预测的精度越高。另外,在验证点上的预测值与实测值之间的相关系数(R^2)也被用来评价 OK、RK 的估值效果。

1.5 数据处理

运用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析、正态分布检验、相关分析以及柯尔莫哥洛夫－斯蜜诺夫检验(K－S 检验),实验半方差函数的计算及理论模型的拟合在 GS⁺7.0 软件实现[21]。将采样点的定位数据导入 GIS 软件中,获得样点分布的空间数据,通过关键字段实现空间数据与土壤属性数据之间的联接,作为实验半方差函数的计算和 Kriging 插值法制图的数据源。

本研究采用对数转化和域法处理(样本平均值±3s)2 种数据处理方法和柯尔莫哥洛夫－斯蜜诺夫检验(K－S 检验),计算了偏度、峰度等参数,并对其是否服从正态分布进行了检验。运用 ArcGIS 软件中 Kriging 插值分析得出土壤有机碳和全氮的空间分布格局。

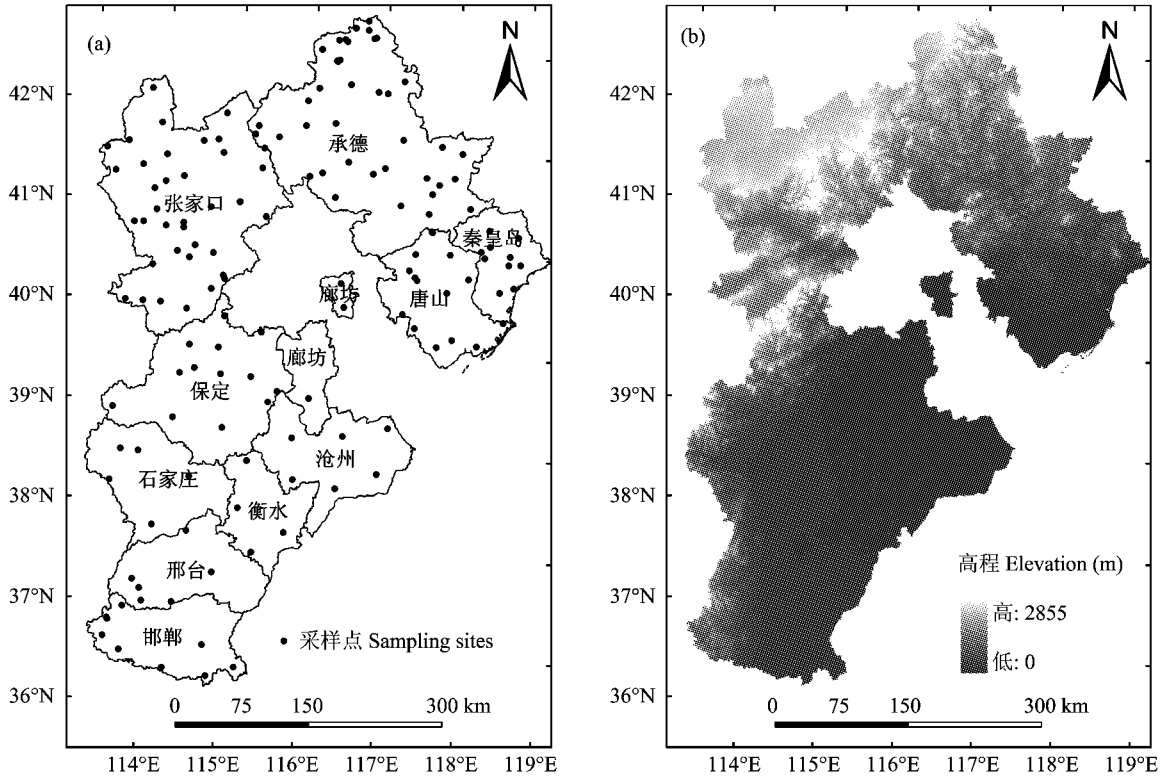

图1 研究区剖面样点分布和高程图

Fig.1 Location of soil profile sampling sites and elevation map

2 结果与分析

2.1 经典统计特征及正态分布性检验

运用 SPSS17.0 对研究区 109 个土壤有机碳和全氮样品进行经典统计特征分析。由表 1 可以看出,没有经过对数转换的有机碳的均值为 15.25 g/kg,中值为 11.12 g/kg; 全氮的均值为 1.23 g/kg,中值为 0.96 g/kg,没有进行对数转换的有机碳和全氮的均值和中值差异较大,说明在一定区域内有机碳和全氮的分布不均匀,易受异常值、地形等因素影响。然而,经对数转化后,有机碳均值为 2.50 g/kg,中值为 2.41 g/kg; 全氮均值为 0.03g/kg,中值为 －0.04 g/kg,有机碳和全氮的均值和中值较接近,且中值均小于均值,这说明经对数转换后,减小了异常值以及地形等因素的影响,有机碳和全氮的分布比较均匀,这与梁中龙等[27]对耕层土壤养分等研究中的中数与平均数相近的结果一致。经对数转换后的有机碳的变异系数为 0.27,全氮的变异系数为 0.67,按照变异系数的划分等级; 弱变异性,$CV < 0.1$; 中等变异性, $CV = 0.1 \sim 1.0$; 强变异性, $CV > 1.0$[28],有机碳和全氮在空间上存在中等程度的变异性。

鉴于经典统计描述分析只能概括研究区有机碳和全氮分布特征的全貌,在一定程度上反映样本全体,没能定量地刻画其随机性和结构性、独立性和相关性。因此,进一步采用地统计方法进行土壤有机碳和全氮的空间变异结构分析。

数据的正态分布性是使用地统计学方法进行土

壤特性空间分析的前提。由表 1 和图 2 可知,没有进行对数转换的有机碳和全氮经 K－S 检验(α = 0.05)和频数分布直方图检验,均不符合正态分布。然而,经过对数转换后,有机碳的偏度和峰度分别为 0.21 和 －0.68,全氮的偏度和峰度分别为 －0.02 和 －0.50；另一方面,有机碳和全氮经 K－S 检验后的 P 值分别为 0.761 和 0.845,这说明有机碳和全氮均符合正态分布。因此,研究区经对数转换后的土壤有机碳和全氮均满足地统计分析的假设条件。

表 1　土壤有机碳、全氮的统计特征值

Table 1　Statistics characters of soil organic C(SOC) and total N

项目 Item	统计值 Statistics (g/kg)					变异系数 Variation coefficient	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K－SP
	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	均值 Mean value	中值 Median value	标准差 Standard deviation				
有机碳 SOC	2.81	60.79	15.25	11.12	11.14	0.73	1.54	2.33	0.004
全氮 Total N	0.23	3.74	1.23	0.96	0.77	0.63	1.12	0.43	0.009

注(Note)：α = 0.05；K－SP 表示正态分布检验 K－SP means the test of normal distribution.

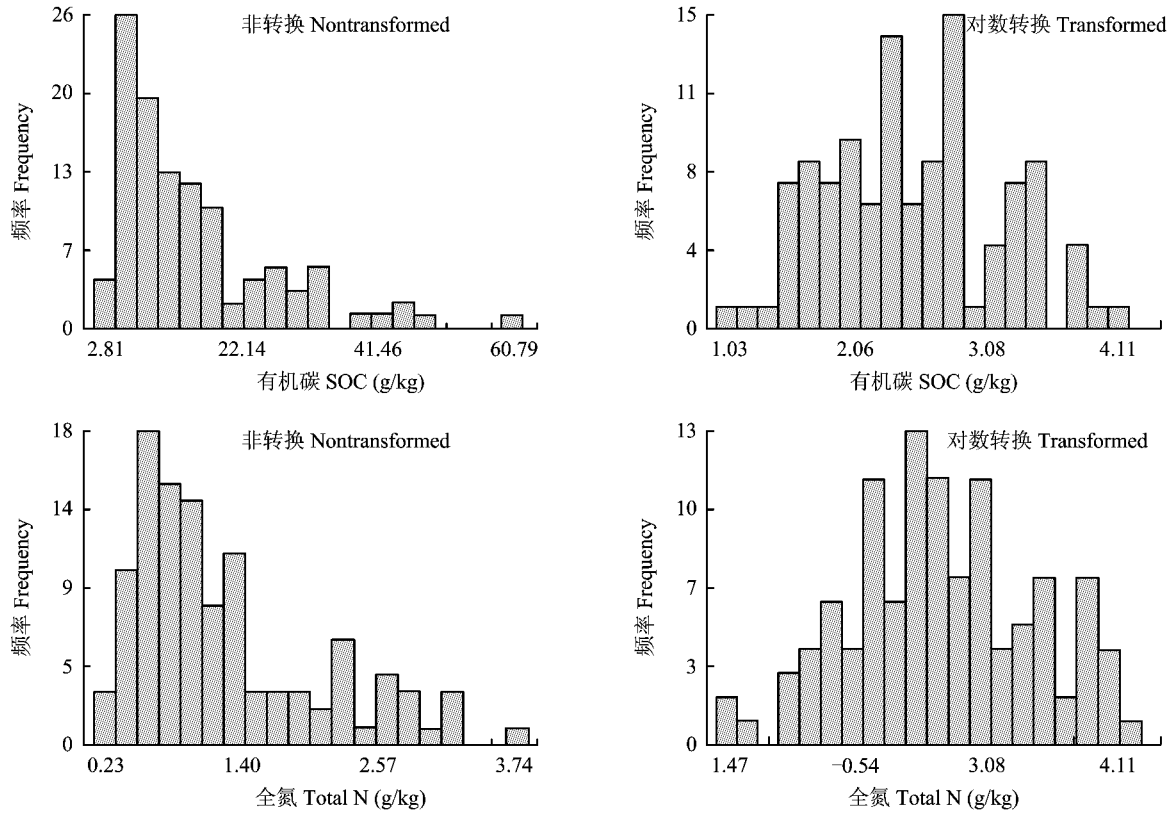

图 2　土壤有机碳、全氮频率分布直方图

Fig. 2　Frequency distribution histogram of soil organic C(SOC) and total N

2.2　半方差函数分析

土壤有机碳和全氮空间变异结构分析是基于半方差函数模型的选择,采用 GS$^+$7.0 对土壤有机碳和全氮进行分析,比较不同模型产生的块金值、基台值 、块金值/基台值、决定系数和残差等相关参数。在这几个参数中,首先要考虑的是决定系数,其次是残差,然后再考虑块金值的大小。决定系数较大、残差较小表明半方差函数理论模型的拟合效果较好。根据这个原则,选择球状模型作为土壤有机碳和全氮含量的最优半方差函数拟合模型(表 2 和图 3)。本研究选择的有机碳模型与其他研究结果[13,15,29]较为一致,而全氮模型有所不同,主要是

因为土壤有机碳和全氮的异质性是结构性因素和随机性因素共同作用的结果。结构性因素，如气候、母质、地形、土壤类型等可以导致土壤养分强的空间相关性，而随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动使得土壤养分的空间相关性减弱，朝均一化方向发展。在半方差函数模型中，块金值/基台值（块金系数）表示空间变异性程度，该比值越小，表明由结构性因素引起的空间变异性程度较大；反之，表明由随机部分引起的空间变异性程度较大[30-31]。由表2可以看出，土壤有机碳和全氮的块金值/基台值分别为1.8%和1.2%。有机碳和全氮的块金值/基台值小于25%，说明其具有强烈的空间相关性。另外，结构性因素是土壤有机碳和全氮空间变异的主要影响因素。

变程表示空间变异的尺度范围，在变程范围内，样点间的距离越小，其相似性越大。从表2可以看出，有机碳和全氮的变程分别为50.400 km和59.200 km，当某点与已知点的距离大于变程时，该点数据不能用于内插或外推，据此可避免在相关距离内重复设置样点。在不同的观测尺度下，其变程的大小不同，本文属于中等观测尺度，大多研究集中于小观测尺度（表3）。

2.3 影响有机碳和全氮的空间变异的因子分析与回归分析

研究区土壤有机碳的空间变异特征受该地区各种气候类型、地形地貌、植被和人为活动等因素的

表2 对数转化后的土壤有机碳、全氮的半方差函数理论模型及其相关参数

Table 2 Theoretical semivariogram models of logarithmic soil organic C(SOC) and total N with related parameters

项目 Item	理论模型 Theory model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill	变程(km) Range	决定系数 R^2	残差 RSS
有机碳 SOC	球状模型 Spherical model	0.008	0.450	0.018	50.400	0.532	1.42×10^{-3}
全氮 Total N	球状模型 Spherical model	0.005	0.386	0.012	59.200	0.652	2.13×10^{-3}

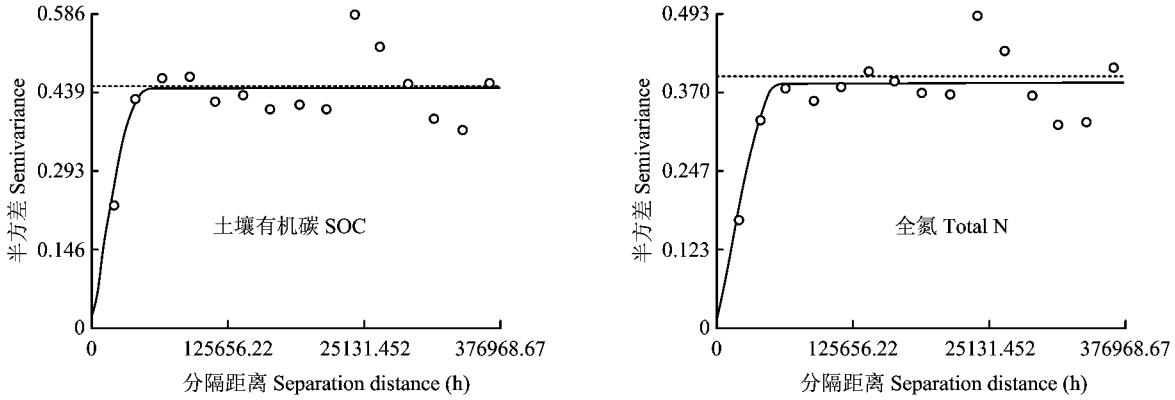

图3 对数转换后的土壤有机碳和全氮的各向同性方差

Fig.3 Isotropic variogram for logarithmic soil organic C(SOC) and total N

表3 不同研究区域的土壤有机碳和全氮的空间变异特征研究

Table 3 Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in different research areas

研究区域 Study area	面积(km^2) Area	研究对象 Study object	理论模型 Theory model	变程(km) Range
南京邓下 Dengxia, Nanjing[13]	32.16	有机碳和全氮 SOC, TN	球状和指数模型 Spherical, Exponential	9.11/1.20
兴国县 Xingguo County[29]	3210.00	有机质和全氮 SOC, TN	球状和指数模型 Spherical, Exponential	5.41/9.36
南京市区 Down Nanjing[15]	6421.00	全氮 TN	球状模型 Spherical	3.6

影响,例如, 气候、水文、地理、母质、土壤肥力、生物多样性和土地利用方式均在较大范围内影响土壤有机质的分解和积累[32]; 陈庆美等[33]指出,土壤有机碳、氮蓄积量主要受气候和质地因素的影响,而且植被也是土壤有机碳、氮蓄积量的调控因子之一。河北北部和西侧少数地区地势较高(图 1),北部地区植被(落叶阔叶林、常绿针叶林和灌丛)较多,温度、湿度适宜,土壤植物根系愈发达,微生物活性较强,枯枝落叶越易于分解,有利于土壤有机碳的累积,这与地表覆被是土壤有机碳的重要来源相一致[34]。南部地势较低,植被较少,土壤有机碳由于土地的长期耕作、过度利用以及温度和湿度的不适宜等因素,使微生物分解有机碳加速,造成有机碳含量相对较低。

表 4 从与气候和地形有关的几个主要影响因子进行了分析。从分析结果可以看出,有机碳和全氮的空间分布与年均气温、海拔和年均降水量在 0.05 或 0.01 水平上呈显著的相关性。海拔不同,一方面使植被生产力不同而使植物残体的形成量和碳、氮的输入不同,另一方面也使气候要素和土壤性质不同而致使土壤碳和氮的分解、矿化和淋溶等过程不同。Smith 等[35]在美国华盛顿东南部半干旱区 500 m 海拔梯度范围和 Bonito 等[36]在美国阿巴拉契亚山脉南部高海拔硬木林都研究发现土壤全氮含量随海拔升高而呈现增加的趋势。气候要素主要影响植被的生产力、土壤微生物活性以及养分的淋溶迁移等,从而影响土壤有机质和氮素的输入与分解速率。但有机碳和全氮受气温、海拔、降水量和坡度综合作用的影响,进行多元回归分析可以得出有机碳和全氮的预测方程(表 5)。

表 4　影响土壤有机碳和全氮的环境因子 Pearson 相关性分析

Table 4　Pearson correlation analysis of factors influencing soil organic carbon and total nitrogen

因子 Factor	土壤有机碳 Soil organic C		全氮 Total N	
	相关性 Correlation	显著性 Significance	相关性 Correlation	显著性 Significance
气温 Temperature	-0.436**	0.000	-0.397**	0.000
海拔 Latitude	0.408**	0.000	0.371**	0.000
降水量 Precipitation	0.290*	0.035	0.286*	0.045
坡度 Gradient	0.353*	0.018	0.334*	0.029

注(Note): *、**表示在 0.05、0.01 水平相关性显著(双尾) Correlation is significant at the 0.05 and 0.01 level (2-tailed).

表 5　有机碳和全氮与气温、海拔、降水量及坡度的回归分析

Table 5　Regression analysis of soil organic C(SOC) and total N with temperature, latitude, precipitation and gradient

项目 Item	回归方程 Regression equation	R^2	F	Significance
有机碳 SOC	$SOC = -8.046 + 0.010x_1 - 0.311x_2 + 0.035x_3 + 0.052x_4$	0.258	9.025	0.000
全氮 Total N	$TN = -0.650 + 0.001x_1 - 0.012x_2 + 0.003x_3 + 0.003x_4$	0.249	8.643	0.000

注(Note): x_1—气温 Temperature; x_2—海拔 Latitude; x_3—降水量 Precipitation; x_4—坡度 Gradient.

除了气候、地形等影响土壤有机质的含量外,土地利用方式、土壤本身性质及土壤类型均在较大范围内影响土壤有机质和全氮的变化[4,33]。从图 4 可以看出,不同土壤质地和土地利用方式的有机碳和全氮含量存在差异($a = 0.05$)。

从土壤质地来看,砂质粘壤土的有机碳和全氮含量最高,其值分别为 28.05 g/kg 和 2.16 g/kg,除与粉砂粘壤土存在显著差异之外,与其他均无显著性差异; 粉砂粘壤土的有机碳和全氮含量最低,其值分别为 11.51 g/kg 和 1.01 g/kg,除与砂质粘壤土存在显著差异之外,与其他均无显著性差异。从土地利用方式来看,草地的有机碳和全氮含量最高,其值分别为 22.85 g/kg 和 1.71 g/kg,除与耕地有显著性差异外,与其他均无显著性差异; 耕地的有机碳和全氮含量最低,其值分别为 9.37 g/kg 和 0.83 g/kg,除与荒地和盐碱地无显著差异外,而与草地和林地存在显著性差异。从土壤类型来看(表 6),不同土壤类型的有机碳和全氮含量不同,其中,灰色森林土的有机碳和全氮含量最大分别为 29.40 g/kg 和 2.11 g/kg; 风沙土最小分别为 4.98 g/kg 和 0.49 g/kg。土壤有机碳和全氮的分布不仅与气候、土壤特性及土地利用方式有关,还会受到母质、基岩、

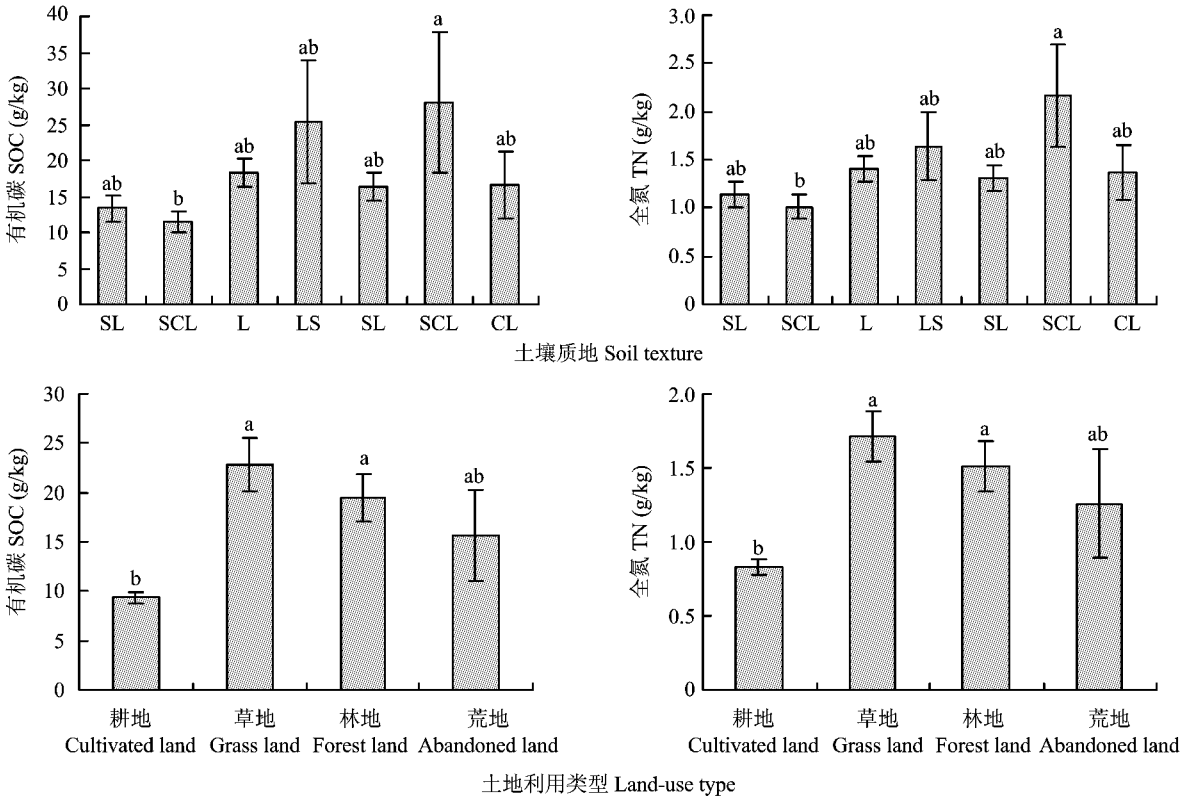

图4 不同质地和土地利用方式土壤有机碳和全氮含量比较

Fig. 4 Comparison of soil organic C(SOC) and total N content in the soils of different texture and land-use types

[注(Note): SL—粉砂壤土 Silt loam; SCL—粉砂粘壤土 Silt-clay loam; L—壤土 Loam; LS—壤质砂土 Loamy sand; SL—砂质壤土 Sandy loam; SCL—砂质粘壤土 Sand-clay loam; CL—粘壤土 Clay loam.]

植被特性、种植制度和人类活动干扰程度(如耕作、施肥、秸秆还田以及其他农艺措施)等因素的影响[4]。

2.4 有机碳和全氮空间分布特征

通过有机碳和全氮与气温、海拔、降水量和坡度进行多元回归分析(表5),将多元回归预测的趋势项和残差的普通克里格相加进行估值,最终得出有机碳和全氮的空间分布状况。从图5可以看出,研究区土壤有机碳总体呈条带状分布,冀北含量较高,主要分布在张家口地区东北部坝缘山地、燕山山地以及保定和石家庄西部的太行山地;冀南含量较低,有机碳含量最小值主要分布在河北东南的保定市以东以南、廊坊、唐山以及张家口市的南部和北部。门明新等[4]研究发现,张家口地区东北部坝缘山地的土壤有机碳密度最大,主要可能是因为该地区年平均气温较低,干旱少雨,大陆性气候较明显,羊草草原也占有相当大的比重,人类活动干扰较少,有机质分解缓慢,这与本研究较为一致。全氮的总体分布趋势与有机碳保持较为类似的空间分布规律,表现为北部较高,东南部较低。

表6 不同土壤类型有机碳和全氮(g/kg)

Table 6 Soil organic C and total N in different soil types

土壤类型 Soil types	有机碳 Soil organic C	全氮 Total N
栗钙土 Castanozem	19.61 ± 4.32	1.57 ± 0.17
棕壤 Brown soil	12.95 ± 2.94	1.13 ± 0.27
草甸土 Meadow soil	27.60 ± 7.35	1.60 ± 0.01
沼泽土 Bog soil	28.89 ± 9.16	1.72 ± 0.37
石质土 Lithosol	22.59 ± 9.66	1.79 ± 0.74
黑土 Black soil	28.81 ± 6.02	2.03 ± 0.83
粗骨土 Skeletal soil	14.96 ± 3.49	1.21 ± 0.64
风沙土 Aleolian soil	4.98 ± 0.83	0.49 ± 0.03
砂姜黑土 Shajiang black soil	11.33 ± 1.33	0.96 ± 0.11
盐土 Solonchak	8.04 ± 2.15	0.60 ± 0.13
灌淤土 Irrigated silting soil	8.02 ± 2.44	0.63 ± 0.12
新积土 Neo-alluvial soil	8.88 ± 1.57	0.71 ± 0.05
栗褐土 Castano-cinnamon soil	6.96 ± 1.42	0.64 ± 0.13
褐土 Cinnamon soil	9.81 ± 1.58	0.82 ± 0.21
潮土 Fluvo-aquic soil	9.36 ± 2.41	0.79 ± 0.08
水稻土 Paddy soil	10.09 ± 2.46	0.88 ± 0.09
灰色森林土 Gray forest soil	29.40 ± 3.65	2.11 ± 0.61
山地草甸土 Mountain meadow soil	24.53 ± 4.26	1.81 ± 0.45

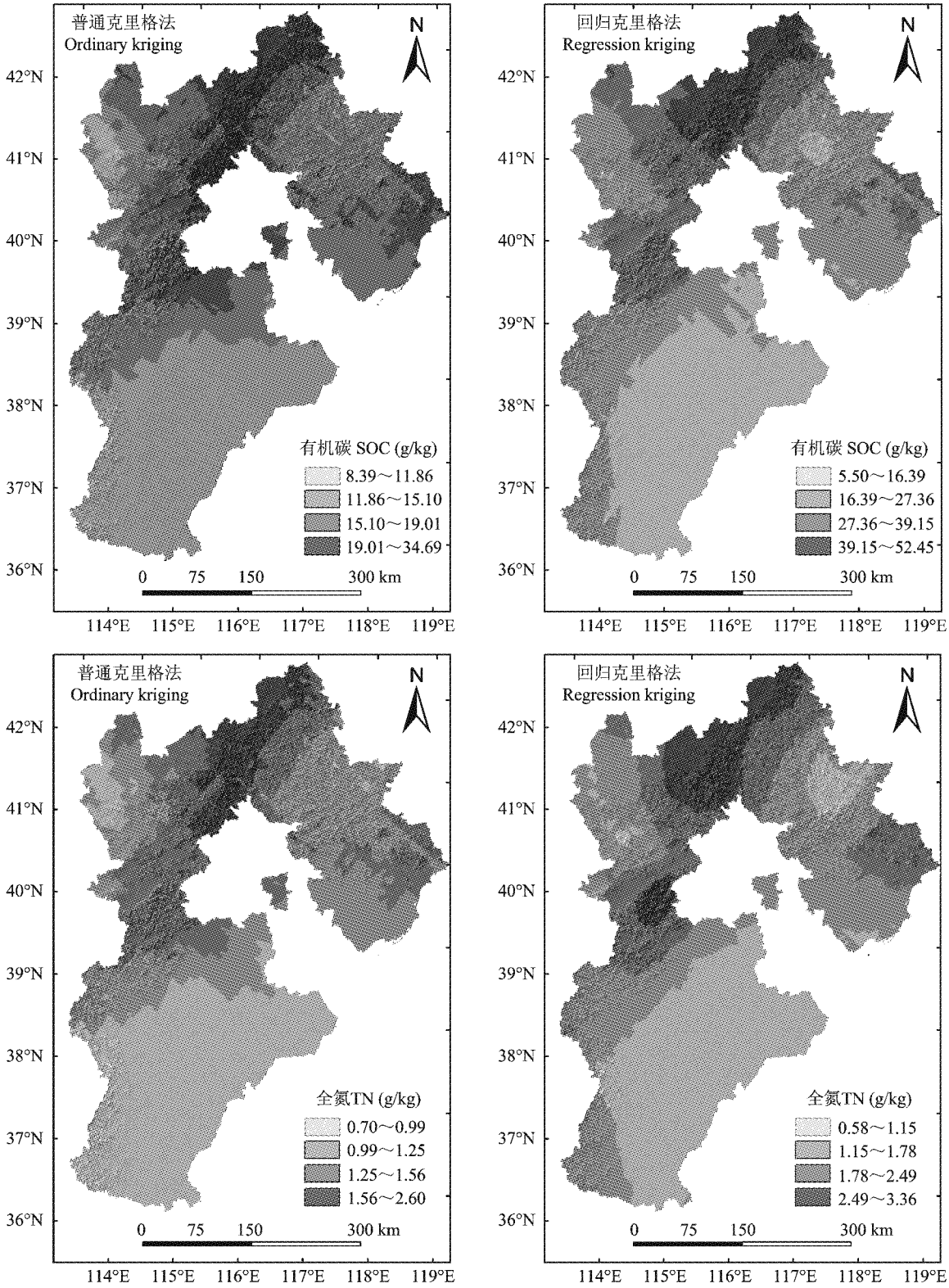

图 5　土壤有机碳和全氮的空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of soil organic C(SOC) and total N

2.5　有机碳和全氮预测结果准确性检验

从表 7 可以看出,普通克里格法和回归克里格法的平均预测误差和均方根预测误差均较小,表明这两种方法的预测结果在一定程度上比较准确。不同预测结果中,普通克里格法的预测结果比较平滑,高值区和低值区块状分布明显。相比之下,回归克

里格的预测结果空间变异比较复杂,更好地表达了研究区土壤有机碳和全氮局部空间变异的细节信息。从预测结果的值域范围来看,普通克里格法预测结果范围较小(有机碳为8.39～34.69 g/kg;全氮为0.70～2.60 g/kg),表明该方法平滑效应最明显,导致较高值被过低估计,较低值被过高估计;回归克里格法预测结果范围较大(有机碳为5.50～52.45 g/kg;全氮为0.38～3.36 g/kg),与研究区土壤有机碳和全氮统计特征较为接近(图5)。从平均预测误差、均方根预测误差及 R^2 来看,回归克里格法ME和RMSE均比普通克里格法小(表7),且回归克里格法得到的验证点土壤有机碳和全氮预测值与实测值的决定系数要高于普通克里格法(图6)。总体来看,回归克里格法在一定程度上提高了研究区土壤有机碳和全氮的空间预测精度。

表7 有机碳和全氮预测结果的准确性分析

Table 7 Prediction accuracy of soil organic C and total N at validation points

方法 Method	有机碳 Soil organic C			全氮 Total N		
	ME	RMSE	R^2	ME	RMSE	R^2
普通克里格法 Ordinary kriging	2.82	8.83	0.405	0.20	0.89	0.384
回归克里格法 Regression kriging	1.37	6.87	0.697	0.12	0.83	0.530

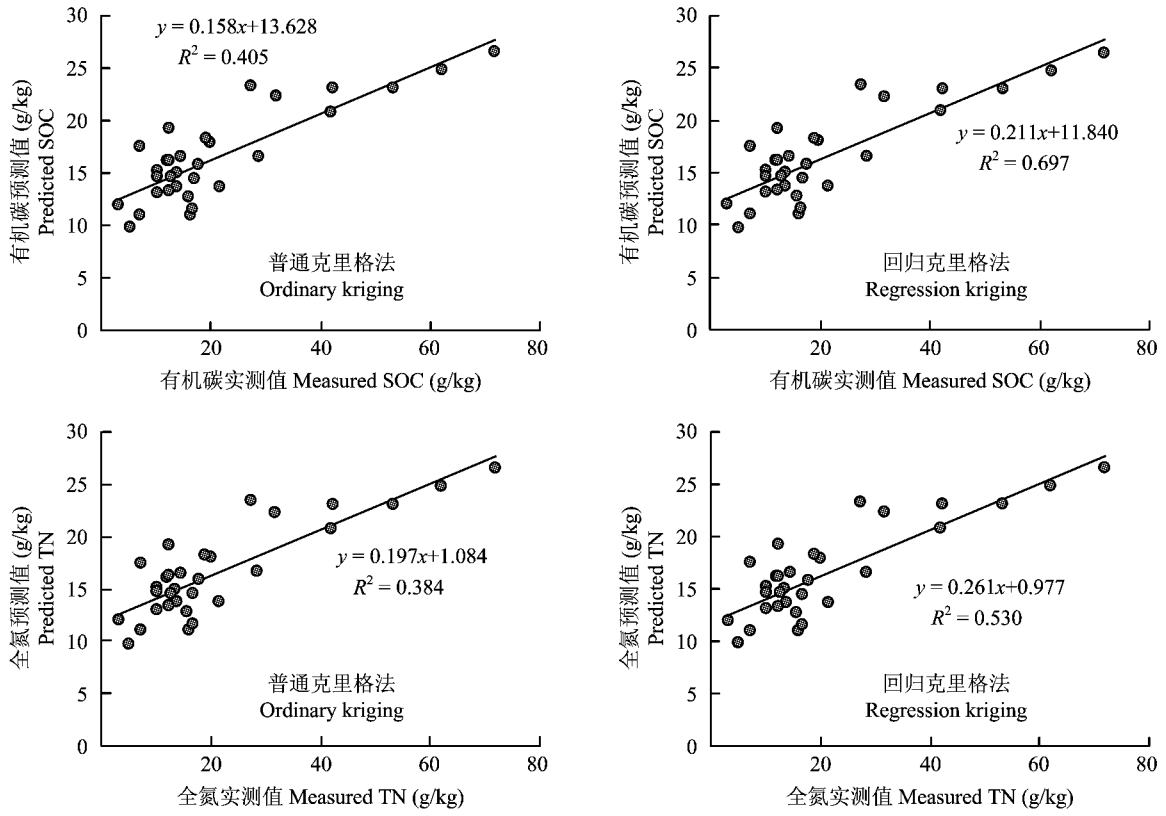

图6 验证点土壤有机碳和全氮含量预测值与实测值散点图

Fig.6 Scatter plots of the measured and estimated soil organic C(SOC) and total N content from validation sites

3 结论

1)研究区土壤有机碳和全氮的平均值分别为15.25 g/kg和1.23 g/kg,变异系数分别为0.73和0.63,属于中等强度变异。土壤全氮的变异系数小于有机碳的变异系数,说明土壤有机碳的变异性大于全氮的变异性,而经对数转换后,有机碳的变异性小于全氮的变异性。

2)土壤有机碳和全氮的块金值/基台值的比值分别为1.8%和1.2%,有机碳和全氮的块金系数小

于25%,表明有机碳和全氮均具有强烈的空间相关性。有机碳和全氮的变程不同,有机碳为 50.400 km,全氮的变异尺度为 59.200 km,据此土壤调查和统计分析中可避免在相关距离内重复设置样点,以遵守和满足统计抽样的独立性原则,节约调研和测试费用。

3) 研究区的有机碳总体空间分布呈自北部向南部递减的特征。土壤全氮与有机碳的空间分布趋势相似,但有机碳的空间变异特征较全氮明显。影响土壤有机碳和全氮的空间分布的因素主要是气候、地形、土壤质地、土壤类型以及土地利用类型,其中气候因子中的气温和海拔对有机碳和全氮的影响较大。

4) 通过比较普通克里格法和回归克里格法的预测结果,回归克里格法在一定程度上提高了研究区土壤有机碳和全氮的空间预测精度。

参 考 文 献:

[1] Lal R. Carbon sequestration in drylands[J]. Annual of Arid Zone, 2000, 39 (1): 1-10.

[2] Kucharik C J, Brye K R, Norm an J M, *et al*. Measurements and modeling of carbon and nitrogen cycling in agroecosystems of southern Wisconsin: Potential for SOC sequestration during the next 50 years[J]. Ecosystems, 2001, 4: 237-258.

[3] Shaffer M J, Ma L W, Hansen S. Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 2001.

[4] 门明新, 彭正萍, 刘云慧, 宇振荣. 基于 SOTER 的河北省土壤有机碳、氮密度的空间分布[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 469-473.
Men M X, Peng Z P, Liu Y H, Yu Z R. Spatial distribution of soil organic carbon and nitrogen in Hebei Province based on SOTER [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(4): 469-473.

[5] 曹丽花, 赵世伟. 土壤有机碳库的影响因素及调控措施研究进展[J]. 西北农林科技大学学报, 2007, 35(3): 177-182.
Cao L H, Zhao S W. Progress of study on factors of affecting the SOC pool and measures for its regulating and controlling [J]. Journal of Northwest A & F University, 2007, 35(3): 177-182.

[6] Kern J S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous United States[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 439-455.

[7] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47 (2): 151-163.

[8] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海沉积物中有机质和全氮含量分布特征[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 620-624.
Sun H M, He J, Lü C W, *et al*. Distribution characteristics of organic matter and total nitrogen in sediments of Lake Wuliangsuhai[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17 (4): 620-624.

[9] 甘海华, 吴顺辉, 范秀丹. 广东土壤有机碳储量及空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1499-1502.
Gan H H, Wu S H, Fan X D. Reserves and spatial distribution characteristics of soil organic carbon in Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1499-1502.

[10] 吕成文, 崔淑卿, 赵来. 基于 HNSOTER 的海南岛土壤有机碳储量及空间分布特征分析[J]. 应用生态学报, 2006, 7 (4): 1014-1018.
Lü C W, Cui S Q, Zhao L. Soil organic carbon storage and its spatial distribution characteristics in Hainan Island: a study based on HNSOTER[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 7(4): 1014-1018.

[11] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍. 坡耕地黑土有机碳空间异质性及其格局[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 20-28.
Fang H J, Yang X M, Zhang X P, Liang A Z. Spatial heterogeneity and pattern of black soil organic carbon of sloping field[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25 (3): 20-28.

[12] 吴海勇, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛洼地土壤有机碳和氮素空间变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1029-1036.
Wu H Y, Zeng F P, Song T Q, *et al*. Spatial variations of soil organic carbon and nitrogen in peak-cluster depression areas of Karst Region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1029-1036.

[13] 李海东, 林杰, 张金池, 等. 小流域尺度下土壤有机碳和全氮空间变异特征[J]. 南京林业大学学报, 2008, 32(4): 38-42.
Li H D, Lin J, Zhang J C, *et al*. Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen based on small watershed scale [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2008, 32(4): 38-42.

[14] 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.
Wang Z Q. Geostatistics and its application in ecology [M]. Beijing: Science Press, 1999.

[15] 王辛芝, 张甘霖, 俞元春, 张金池. 南京城市土壤 pH 和养分的空间分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(4): 69-72.
Wang X Z, Zhang G L, Yu Y C, Zhang J C. Spatial distribution of soil pH and nutrients in urban Nanjing[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2006, 30(4): 69-72.

[16] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性的空间变异性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39-44.
Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 39-44.

[17] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651-657.
Li H B, Wang Z Q, Wang Q C. Theory and methodology of

spatial heterogeneity quantification [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 651-657.

[18] 张玉铭，毛任钊，胡春胜，等. 华北太行山前平原农田土壤养分的空间变异性研究[J]. 应用生态学报，2004，15(11)：2049-2054.
Zhang Y M, Mao R Z, Hu C S, *et al*. Spatial variability of farmland soil nutrients at Taihang piedmont[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2049-2054.

[19] 李艳，史舟，程街亮，等. 辅助时序数据用于土壤盐分空间预测及采样研究[J]. 农业工程学报，2006，22(6)：19-55.
Li Y, Shi Z, Cheng J L, *et al*. Spatial forecast and sampling of soil salinity by Kriging with temporally auxiliary data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 19-55.

[20] 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): 471-489.

[21] 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.
Lu R K. Analytical methods of soil and agronomic chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[22] SSSSC. Soil survey technical report [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1996.

[23] Robertson G P. GS+: Geostatistics for the environmental science [M]. Plainwell: Gamma Design Software, 2001.

[24] 张金池，李海东，林杰，等. 基于小流域尺度的土壤可蚀性K值空间变异[J]. 生态学报，2008，31(5)：2199-2207.
Zhang J C, Li H D, Lin J, *et al*. Spatial variability of soil erodibility (K-Factor) at a catchment scale in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 31(5): 2199-2207.

[25] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(3): 1501-1511.

[26] Hengl T, Heuvelink G B M, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression kriging [J]. Geoderma, 2004, 120(1): 75-93.

[27] 梁中龙，袁中友，林兴通，范秀丹. 城郊耕层土壤养分的空间变异特征[J]. 土壤通报，2006，37(3)：417-421.
Liang Z L, Yuan Z Y, Lin X T, Fan X D. Spatial variability of soil nutrients in Guangzhou suburb[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(3): 417-421.

[28] 雷志栋，杨诗秀，许志荣，等. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报，1985，35(9)：10-21.
Lei Z D, Yang S X, Xu Z R, *et al*. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 35(9): 10-21.

[29] 程先富，史学正，于东升，潘贤章. 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.
Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Spatial variance and distribution of total nitrogen and organic matter of soil in Xingguo County of Jiangxi, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(1): 64-67.

[30] 路鹏，彭佩钦，宋变兰，等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和GIS分析[J]. 中国农业科学，2005，38(6)：1204-1212.
Lu P, Peng P Q, Song B L, *et al*. Geostatistical and GIS analyses on soil total P in the typical area of Dongting Lake Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1204-1212.

[31] 刘杏梅，徐建民，章明奎，等. 太湖流域土壤养分空间变异特征分析—以浙江省平湖市为例[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版)，2003，29(1)：76-82.
Liu X M, Xu J M, Zhang M K, *et al*. Study on spatial variability of soil nutrients in Taihu Lake region—A case of Pinghu City in Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2003, 29(1): 76-82.

[32] 王淑平，周广胜，吕育财，邹建军. 中国东北样带土壤碳、氮、磷的梯度分析及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报，2002，26(5)：513-517.
Wang S P, Zhou G S, Lü Y C, Zou J J. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along northeast China transect and their relationships with climatic factors [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(5): 513-517.

[33] 陈庆美，王绍强，于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间分布特征[J]. 应用生态学报，2003，14(5)：699-704.
Chen Q M, Wang S Q, Yu G R. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (5): 699-704.

[34] 刘国华，傅伯杰，吴钢，段桂兰. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究[J]. 应用生态学报，2003，14(9)：1489-1493.
Liu G H, Fu B J, Wu G, Duan G L. Soil organic carbon pool and its spatial distribution pattern in the Circum Bohai Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1489-1493.

[35] Smith J L, Halvorson J J, Bolton J H. Soil properties and microbial activity across a 500 m elevation gradient in a semi-arid environment[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(11): 1749-1757.

[36] Bonito G M, Coleman D C, Haines B L, *et al*. Can nitrogen budgets explain differences in soil nitrogen mineralization rates of forest stands along an elevation gradient? [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 176(1-3): 563-574.