

# 北京山区土壤养分空间变化特征研究<sup>①</sup>

梁 斌, 齐 实\*

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为了揭示土壤养分空间变异分布特征并且指导土壤规划管理, 以北京市西部山区水源林和京津风沙源地带为研究对象, 在野外大田采集样本的基础之上, 运用了地统计学与 GIS 相结合的研究方法, 探究了典型区域土壤碱解氮、有效磷、速效钾、有机质和全氮的空间变化格局, 同时采用模糊模式识别理论对土壤养分等级进行了综合评价, 并结合地区的实际情况分析了其变异特性的影响因素。结果表明: 土壤养分的空间分布整体上符合正态分布 ( $P < 0.05$ ), 有效磷、速效钾和有机质的空间分布变异性较强, 碱解氮和全氮的变异系数相对降低, 并且随着土层深度的增加, 土壤的养分含量呈现逐渐缩小趋势。土壤养分的各项指标能够较好地符合半方差函数模型, 有机质和全氮具有较好的空间自相关性, 碱解氮、速效钾和有效磷体现出中等自相关性, 土壤养分整体分布格局的空间自相关性水平较强。土壤碱解氮含量等级为中等的比重最大, 其面积占比为 27.87%; 有效磷、速效钾含量整体处于缺乏状态; 而有机质含量在很丰富等级比重较大, 且区域 73.77% 的土壤质地类型属于有机质丰富; 全氮含量变化程度较低, 并且大部分地区处于丰富的水平; 区域土壤肥力的综合水平为 IV。研究成果为区域土壤资源使用划分、修复重建以及可持续利用提供科学依据。

**关键词:** 土壤养分; 空间变异; 地统计学; 综合评价

**中图分类号:** S158.3 **文献标识码:** A

土壤是分布复杂、变异随机的时空连续体, 质地、植被、环境以及地形地貌等因素影响了土壤的形成过程, 同时也决定了土壤在空间变异上的普遍存在性和复杂性特征<sup>[1-2]</sup>。土壤作为植物生长的营养库, 其养分的空间变异情况必然会影响到植物种类的分布<sup>[3]</sup>。土壤养分是土壤的重要属性之一, 频繁人类活动对自然的改造以及农业资源的大力开发增强了土壤的空间异质性<sup>[4-6]</sup>。土壤肥力修复过程中, 往往会无针对性地对土壤大量施加肥料, 对于改善土壤的养分结构、提升肥料偏生产力以及有效地控制农业面源污染具有一定的负面影响<sup>[7-9]</sup>。研究土壤养分空间变异的规律, 是指导区域土壤规划利用、提高产业经济效益以及完善管理措施的基础, 同时也是实现精准性、数字化农业发展的趋势所在<sup>[10]</sup>。

近些年来, 国内外学者对于土壤养分空间变异性特征做了大量的研究, 分别从土壤养分时空变异与施肥<sup>[11]</sup>、地形地貌<sup>[12]</sup>、作物种类<sup>[13]</sup>等因素的关系进行了阐述。Glendell 等<sup>[14]</sup>采用了高分辨率的地质统计

学方法研究了土壤性质的空间变异规律, 阐明了土壤性质和相应的生态系统之间的协同效应关系; Ozgoz 等<sup>[15]</sup>对比分析了 3 种不同作物的轮作田和天然牧场的土壤物理和化学指标的变异特性, 并提出了多年的作物栽培并没有导致土壤质量下降; Foroughifar 等<sup>[16]</sup>基于规则格网获取 98 个样点数据研究了土壤的微量元素变异特征, 结果表明地下水位、土壤成土过程是影响土壤微量元素空间变异的重要因素; 宁静等<sup>[17]</sup>利用实测分析手段及 GIS 空间分析方法讨论了农林交错区土壤肥力空间分异特征, 阐述了坡度梯度和高程梯度变化差异下土壤肥力值的空间分布规律; 赵明松等<sup>[19]</sup>采用地统计学方法和 GIS 技术研究了土壤有机质、全氮等养分含量的空间变异特征和影响因素, 表明土壤养分空间分布主要受地形和土壤类型影响。可见土壤养分空间异质性的研究有助于加深对土壤发育格局及其环境因子和生态格局分布的研究。北京山区地带是水源林主要的分布区, 同时也是京津地带的风沙源头区。探究山区土壤养分组成空间变异特

基金项目: 北京市科委项目(Z151100002115006)和北京市园林绿化局项目(2016HFWSBXY020、2016HXFWSBXY012)资助。

\* 通讯作者(qishi@bjfu.edu.cn)

作者简介: 梁斌(1992—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1509030398@qq.com

征,对于加强北京市饮用水水源地森林植被保护、改善水源地水土流失现状以及促进建设区的经济发展具有重大的现实意义。

以往关于土壤养分空间分布的预测与评价主要来源于传统的土壤图,而这些传统土壤图的精度较低,已经不能满足现代精准农业和环境评估模型对于土壤详细信息的需求。本文通过野外调研采集土样,通过传统地统计学理论结合 GIS 克里格插值的方法,研究北京市山区地带土壤养分空间分布格局,并且采用属性识别理论方法对土壤养分进行了综合评价,弥补了传统土壤养分空间识别与评价理论的不足。该研究可为区域土壤养分分区管理以及水土资源可持续利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

山区地带主要分布在北京市的西部和北部,本文采样区选择在包括密云、怀柔、延庆、昌平、门头沟和房山等 6 个区县,地理位置位于  $115^{\circ}36' \sim 116^{\circ}56'E$ ,  $39^{\circ}34' \sim 40^{\circ}48'N$ ,东西长 100 km,南北宽 150 km。该地区属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,7 月份温度最高,平均气温为  $29^{\circ}C$ ,1 月份温度最低,平均温度为  $-6^{\circ}C$ ,全年平均降水量为 585 mm,主要集中在夏季 7、8 月份,全年平均气温  $\geq 0^{\circ}C$  累计积温值为 5 603.4  $^{\circ}C$ ,日照时数为 2 600 ~ 2 800 h,全年的无

霜期为 180 ~ 200 d。采样地的植被覆盖类型主要包括天然林、灌木、草地以及农业耕作区。

### 1.2 样品采集与分析

样品的采集时间为 2015 年 7 月,在综合考虑当地的土壤类型、植被、地形地貌以及土地利用类型等影响因素的基础之上布设了 224 个采样点。经统计,区域主要地貌类型为水源林、风沙源带和耕地,根据不同地貌类型的面积比重,水源林区域设置 80 个采样点,风沙源带和耕地采样点分别为 80 和 64 个。样点的选择力图反映区域土壤养分空间分布格局特征,并且距离控制在 10 km 范围之内(图 1)。用 GPS 定位每个采样点的位置,土壤的取样通过取土器人工采集。垂直剖面取样分为 4 层,分别为 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 45、45 ~ 60 cm,共收集 896 个土样。以取样点为圆心,30 m 为半径的范围内取 5 个重复,将土样混合均匀,取 1 kg 作为试验样土(在下述研究中,土壤养分垂直剖面统计分析分别以 4 个土层的测量数值进行研究,而在土壤平面空间变异性分析、分布格局以及综合评价研究则以 4 个土层的平均值作为每个采样点的研究值来进行探讨)。采集的土壤在室内自然风干、磨碎、过筛处理,进行碱解氮、有效磷、速效钾、全氮和有机质 5 种养分成分的测定<sup>[19]</sup>。结合前人研究的经验与成果,土壤有机质的测定方法为重铬酸钾外加热法;碱解氮测定方法为碱解扩散法;有效磷测定方法为恒温水浴振荡浸提法;速效钾的测定方法为醋酸铵浸提火焰光度法;全氮的测定方法为凯氏法。

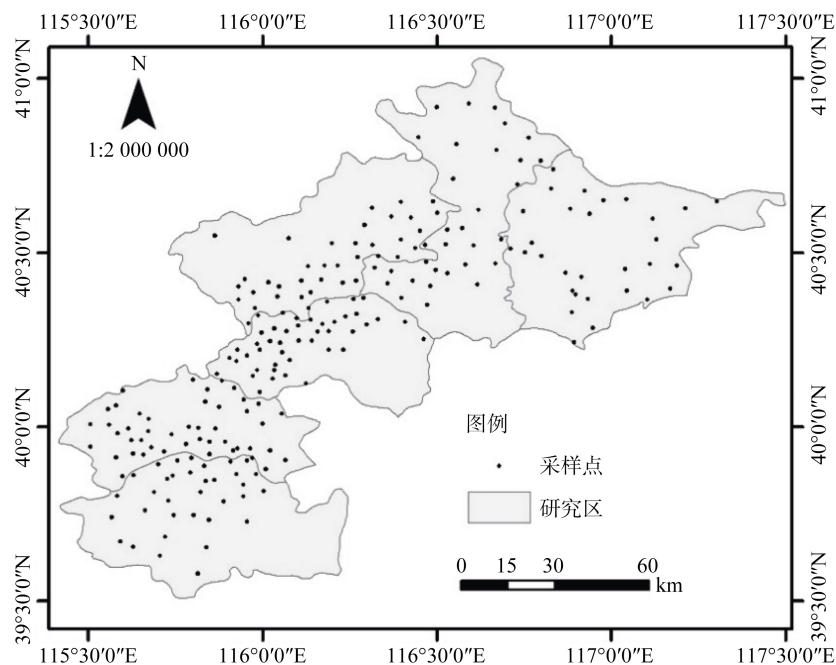


图 1 研究区及采样点分布图

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

### 1.3 数据处理方法

本研究借助 SPSS 22.0 软件进行统计分析,并采用 K-S 检验方法结合相伴概率来分析土壤养分空间格局是否符合正态分布。利用 GS+V9.0 经典地统计学软件进行土壤半方差函数分析,并且验证其符合的模型种类,最终采用 ArcGIS 10.2 软件中数据变异趋势模拟以及 Kriging 空间插值绘制各养分的空间变异规律,展示各养分指标的平面分布效果。

其中,半方差函数体现的是土壤养分的空间变异性特征。在土壤养分测量值满足二阶平稳假设的前提下可以通过如下公式进行计算<sup>[20-21]</sup>:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中: $r(h)$  表示经验半方差函数, $h$  表示步长,即相邻两个样点之间的空间距离。 $N(h)$  表示步长间包含的实验数据点对的个数。 $Z(x_i)$  指变量函数  $Z(x)$  在位置  $x_i$  处的具体实测函数值。 $Z(x_i + h)$  指变量函数  $Z(x)$  在位置  $x_i + h$  处的具体实测函数值。在研究过程中取每个测量样点指标的平均值代入公式中。

此外,在土壤养分状况综合评价过程中,参照全国第二次土壤普查养分分级标准以及结合区域实际土壤质地情况,对土壤养分含量的等级进行分类,具体如表 1 所示。

表 1 土壤养分分级标准  
Table 1 Classification standard of soil nutrients

| 等级  | 碱解氮(mg/kg) | 有效磷(mg/kg) | 速效钾(mg/kg) | 有机质(g/kg) | 全氮(g/kg)   |
|-----|------------|------------|------------|-----------|------------|
| 很丰富 | >150       | >40        | >200       | >40       | >2         |
| 丰富  | 120 ~ 150  | 20 ~ 40    | 150 ~ 200  | 30 ~ 40   | 1.5 ~ 2    |
| 中等  | 90 ~ 120   | 10 ~ 20    | 100 ~ 150  | 20 ~ 30   | 1 ~ 1.5    |
| 缺乏  | 60 ~ 90    | 5 ~ 10     | 50 ~ 100   | 10 ~ 20   | 0.75 ~ 1   |
| 很缺乏 | 30 ~ 60    | 3 ~ 5      | 30 ~ 50    | 6 ~ 10    | 0.5 ~ 0.75 |
| 极缺乏 | <30        | <3         | <30        | <6        | <0.5       |

### 1.4 评价方法

在研究过程中,运用模糊模式识别理论建立土壤肥力的单指标分级标准化矩阵,确定各指标的权重,然后通过最优权法来确定土壤各指标权重,根据模糊识别模型综合评价土壤养分状况所属级别,具体过程如下<sup>[22-25]</sup>:

1) 数据量纲化处理。设研究区域有  $m$  个样本,每个样本有  $n$  项评价指标的实测值  $x$ ,则土壤各项养分指标的实测值矩阵为  $X=(x_{ij})$ 。则  $x_{ij}$  是样本  $j$  指标  $i$  的特征值,其中  $i=1,2,\dots,m$ ;  $j=1,2,\dots,n$ 。土壤养分等级的分类为  $c$ ,评价指标的数值为  $y$ , $n$  项指标  $c$  级评价标准值矩阵为  $Y=(y_{ih})$ 。 $y_{ih}$  是级别  $h$  指标  $i$  的标准特征值; $h=1,2,\dots,c$ 。

在研究过程中,采用指标标准特征值  $y_{ih}$  随级别  $h$  的增大而增大的研究模式,按照式(2)计算样本值  $x_{ij}$  对模糊子集的相对隶属度,按照式(3)计算指标标准值  $y_{ih}$  对模糊子集的隶属度。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{ic} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{i1} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{i1} \end{cases} \quad (2)$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{i1} - y_{ic}} & y_{i1} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1 & y_{ih} = y_{i1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_{ij}$  为样本  $j$  指标  $i$  的特征值对模糊子集的相对隶属度; $y_{ic}$  为指标  $c$  级标准值; $s_{ih}$  为级别  $h$  指标  $i$  的标准值对模糊子集的相对隶属度。同时,利用公式(2)、(3)可将矩阵  $X$  和  $Y$  变换为对应的隶属度矩阵  $R$  和  $S$ 。

$$R = (r_{ij}) \quad (4)$$

$$S = (s_{ij}) \quad (5)$$

2) 权重确定。由于各个指标高低有所不同,在总的评价中所起的作用也会有所差别,在本研究过程中,采用加权法计算指标权重,土壤样本养分含量的高低在一定程度上决定着该指标的权重数值,其计算公式通常为

$$W_i = \frac{c_i / a_i}{\sum_{i=1}^n c_i / a_i} \quad (6)$$

式中: $W_i$  为第  $i$  个指标的权重; $c_i$  为该指标的实测值; $a_i = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6) / 6$ ;  $a_1, a_2, a_3, a_4,$

$a_5, a_6$  为土壤该指标标准值。

3) 模糊模式识别的模型。根据土壤养分综合评价模式的特点, 建立模糊模式识别模型:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ \frac{1}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij} - s_{ih})]^P}{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ik} - s_{ih})]^P} \right\}^{\frac{1}{P}}} a_j \leq h \leq b_j, d_{hi} \neq 0} & \\ 1 & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_{hj}$  为样本  $j$  对模糊子集级别  $h$  的相对隶属度,  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $h = 1, 2, \dots, c$ ;  $a_j, b_j$  为样本  $j$  的  $n$  项指标的级别下限值和上限值;  $P$  为距离参数, 取  $P = 2$ 。

4) 土壤养分级别的判定。对于土壤养分模糊识别的最终判定结果由  $H_j$  来确定, 级别变量  $H_j$  的计算

公式为

$$H_j = \sum_{h=1}^c hu_{jh} \quad (8)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤养分统计分析结果

将该地区的土壤养分指标进行经典统计学分析和 K-S 检验。分析表 2 结果可知, 土壤养分在水源林、风沙源带和耕地采样点呈显著性差异, 其中碱解氮的含量变化区间为 12.16 ~ 150.71 mg/kg, 变异系数为 25.84%, 属于中等变异水平。对比 5 种养分指标在空间分布的变异系数, 其从大到小的顺序依次为速效钾 > 有效磷 > 有机质 > 碱解氮 > 全氮, 由此可知, 碱解氮、速效钾和有效磷含量的空间变异程度相对较大。

表 2 土壤特性的统计特征值  
Table 2 Statistical characteristics of soil nutrients

| 养分指标       | 最小值   | 最大值    | 平均值   | 标准差   | 变异系数(%) | K-S 值 | 相伴概率  | 分布类型 |
|------------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|------|
| 碱解氮(mg/kg) | 12.16 | 150.71 | 54.69 | 14.13 | 25.84   | 1.345 | 0.074 | N    |
| 有效磷(mg/kg) | 1.48  | 5.98   | 3.29  | 1.22  | 37.08   | 0.885 | 0.414 | N    |
| 速效钾(mg/kg) | 48.48 | 171.91 | 86.71 | 34.56 | 39.86   | 1.127 | 0.516 | N    |
| 有机质(g/kg)  | 20.21 | 54.06  | 36.39 | 10.55 | 28.99   | 1.038 | 0.231 | lgN  |
| 全氮(g/kg)   | 0.74  | 3.44   | 1.66  | 0.46  | 21.68   | 1.346 | 0.053 | N    |

在整体分析土壤养分空间分布特征的基础上, 分析各养分指标含量在土壤垂直剖面上的变化过程。其中, 在 0 ~ 15 cm 土层内, 土壤的碱解氮含量为 106.12 mg/kg, 而在 15 ~ 30 cm 土层处, 其碱解氮含量降低到 61.07 mg/kg, 相对于表层有所降低, 而随着土层深度的增加, 在 30 ~ 45、45 ~ 60 cm 处, 土壤碱解氮含量分别相对浅层降低了 70.63% 和 75.91%, 分别相对于表层土壤养分含量有了大幅度的降低。随着土层深度的增加, 土壤碱解氮含量呈现逐渐递减的趋势。同时, 分析有效磷的含量变化趋势, 在 0 ~ 15 cm 土层内, 其土壤有效磷的含量为 5.06 mg/kg, 而在 15 ~ 30、30 ~ 45、45 ~ 60 cm 土层中, 土壤有效磷的含量分别相对于表层 0 ~ 15 cm 土层减少了 2.18、2.01、2.43 mg/kg, 整体的变化趋势与碱解氮保持相一致。此外, 对比分析速效钾、有机质和全氮的变化趋势可知, 在 0 ~ 45 cm 土层之间, 其养分含量均呈现出不同程度的降低, 但是在 45 ~ 60 cm 土层处, 养分含量出现了增加的现象, 并且在不同的坐标采样点中, 该土层深度处的土壤速效钾、有机质和全氮的含量均处于一个相对稳定并且含量较高的水平。

综上所述可知, 从土壤整体平均变化趋势分析, 土壤的碱解氮、有效磷和速效钾的含量相对较低, 处

于缺乏水平, 而有机质和全氮含量较为丰富, 具体分析研究区的地形、地貌以及土壤的植被覆盖状况可知, 该区域的植被覆盖量相对较高, 植物有机质的腐殖程度较大, 因此, 其有机质含量较为丰富。另外, 从土壤空间垂直剖面分析各养分指标的迁移规律可知, 随着土层深度的增加, 土壤养分含量整体呈现出依次减少的趋势, 但是在 45 ~ 60 cm 土层处, 由于该土层距离地表较远, 其养分被植被的利用程度较低, 并且受环境变化的影响程度较低, 因此该土层的养分含量呈现小幅度的增加。

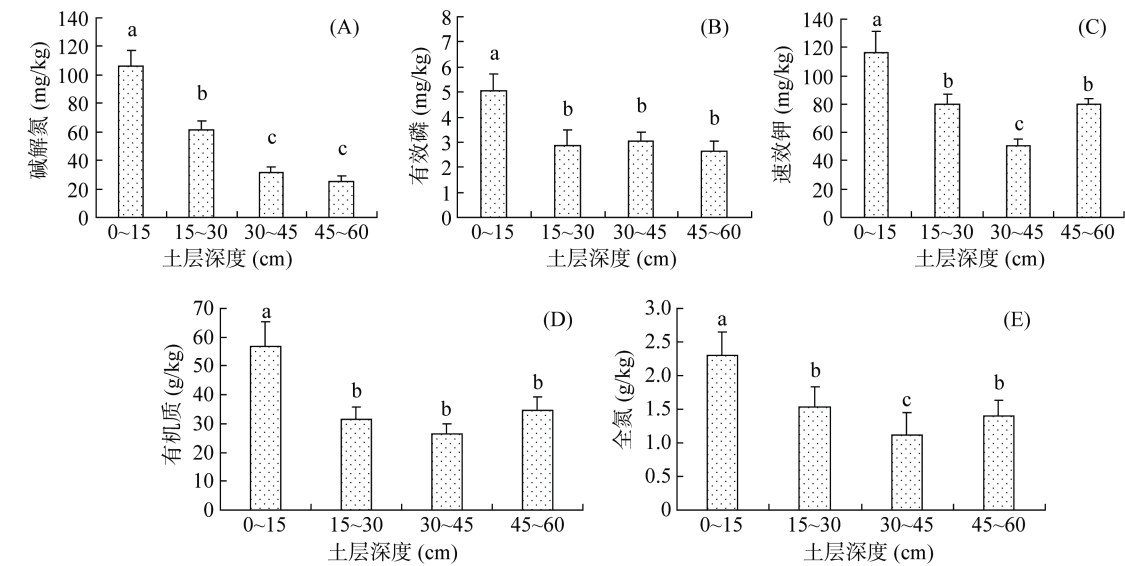
### 2.2 土壤养分要素空间变异性

在研究过程中, 为了更好地分析土壤养分在空间变异过程的连续性以及其结构特征, 采用半方差分析的地统计学方法对土壤空间分布数据进行了处理, 具体结果见表 3。

由土壤养分要素的半方差函数模型分析可知, 土壤碱解氮含量空间变异的半方差函数符合球形模型, 其决定系数为 0.736; 有机质含量空间变异的半方差函数符合指数函数模型, 而有效磷、速效钾和全氮的半方差函数符合高斯函数模型, 并且各个养分指标的决定系数均大于 0.8, 拟合效果较好。在参数分析过程中, 块金值  $C_0$  表示小于取样尺度下的空间变异,

而基台值  $C_0+C$  表示在变量范围内总的空间变异强度。对比可知,在各种养分空间变异过程中,碱解氮的基台值为 54.497,其空间变异程度相对较强,总体

对比各种养分元素空间变异基台值,其从大到小的变化顺序依次是:速效钾>碱解氮>有机质>有效磷>全氮,也由此得出其空间变异程度依次减弱。



(图中小写字母不同表示土层间差异达到  $P<0.05$  显著水平)

图 2 不同土层处土壤养分变异状况

Fig. 2 Variations of soil nutrients in different soil layers

表 3 土壤半方差结构参数

Table 3 Semivariance structure parameters of soil nutrients

| 分析项目 | 理论模型 | 块金值    | 基台值    | 块金系数  | 变程   | 决定系数 $R^2$ | 残差    |
|------|------|--------|--------|-------|------|------------|-------|
| 碱解氮  | 球形   | 28.098 | 54.497 | 51.56 | 7.74 | 0.736      | 0.021 |
| 有效磷  | 高斯   | 1.446  | 4.299  | 33.64 | 5.16 | 0.917      | 0.067 |
| 速效钾  | 高斯   | 25.835 | 65.175 | 39.64 | 6.13 | 0.904      | 0.317 |
| 有机质  | 指数   | 3.201  | 23.605 | 13.56 | 2.68 | 0.821      | 0.008 |
| 全氮   | 高斯   | 0.611  | 3.155  | 19.37 | 3.93 | 0.935      | 0.086 |

当块金系数  $C_0/C_0+C<25\%$  时,表明变量的空间自相关性等级为强烈,当块金系数在  $25\% \sim 75\%$  时,表明空间自相关性等级为中等,当块金系数  $>75\%$  时,表明空间自相关性较弱。分析各种养分指标的块金系数可知,碱解氮的块金系数值为 51.56%,其数值相对较大,属于中等空间自相关性,同时,速效钾和有效磷成分的块金值均属于中等空间自相关性水平,而有机质和全氮的块金系数均小于  $25\%$ ,表明这两种养分元素的空间变化具有强烈的空间自相关性,而这种空间自相关性要受到土壤的母质特征、农业灌溉、气候变异以及人类改造自然活动的影响,而在空间自相关分析结果中,各种养分成分的空间自相关性水平相对较高,表明该地区的土壤养分空间变异特性能够与地区的自然环境较好地匹配,适应环境变化所带来的驱动效应。

2.3 土壤养分空间分布格局

通过分析可知,该区域中土壤的碱解氮、有效磷、

速效钾和全氮的含量整体符合正态分布,同时有机质含量在空间的变化趋势经过对数形式转化也满足正态分布类型,符合进行空间差值的要求。根据土壤养分变异函数所符合的理论模型以及其变化趋势中提取的参数,通过 ArcGIS 10.2 地统计分析模块中的克里格插值方法绘制土壤养分的空间平面变化趋势图(图 3)。

分析土壤养分分布情况可知,土壤的碱解氮、有效磷、速效钾的空间格局主要受到地形、地质结构的影响,由于研究区的东部分布着密云水库、怀柔水库以及河流水系,其地质组成物质主要是花岗岩、片麻岩和石灰岩,区域的地下水位较低,湖泊河流水系的入侵导致土壤矿化度较高,土壤的盐碱化增强,农业生产水平相对较低,肥料的投入量较低,不利于土壤养分的积累,因此东部地区的碱解氮、有效磷、速效钾的含量相对较低。而在北部和中部地区,土壤植被覆盖率相对较高,农田土壤面积较大,对于土壤的养

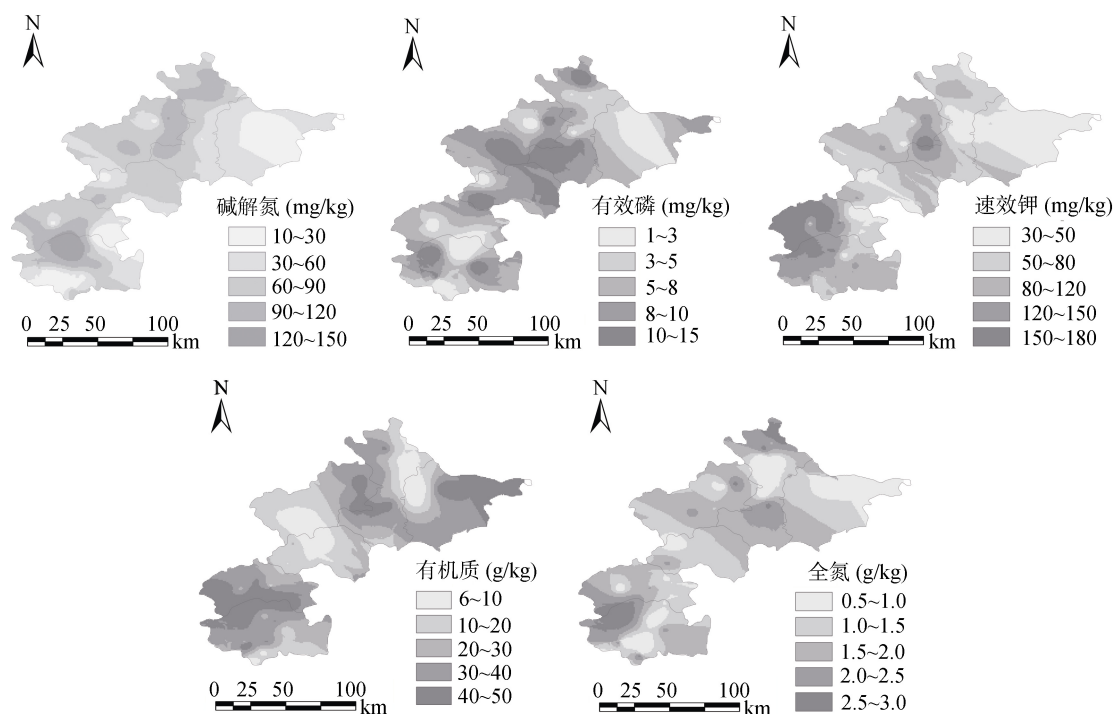


图 3 土壤养分含量空间分布图  
Fig. 3 Spatial distributions of soil nutrients

分成分具有一定的补给与稳固作用,因此,该地区的土壤碱解氮、有效磷和速效钾的含量相对较高。而对于土壤中的有机质,其高值区主要分布在研究区的北部和西南部,结合地区实际情况可知,北部是水源林的主要分布区,土壤表面覆盖落叶松林和云杉林等,植物的腐殖作用对于土壤有机质进行了大量的补给,故此区域的有机质含量较为丰富。

#### 2.4 土壤养分的综合评价

根据上述表 1 土壤养分等级标准,对采样点的土壤养分要素空间分布进行分级,同时对研究尺度内各养分等级所占的面积进行统计,具体见图 4。以此来了解区域土壤各要素空间等级划分及综合水平。

由图 4A 土壤碱解氮等级评价情况可知,区域内土壤碱解氮含量超过 150 mg/kg(很丰富)的面积占区域总面积的 13.11%,碱解氮含量在 120 ~ 150 mg/kg(丰富)之间的面积占区域总面积的 26.73%,而中等、缺乏和很缺乏等级的土壤面积分别占总面积的 27.87%、18.03% 和 11.48%,由此表明,研究区的土壤碱解氮含量处于中等偏上的水平,很丰富和极缺乏的状况占比较低。

由图 4B 土壤有效磷的等级评价情况可知,区域土壤有效磷含量超过 40 mg/kg(很丰富)的面积占区域总面积的 3.27%,含量在 20 ~ 40 mg/kg(丰富)之间的面积占区域面积的 3.27%,而含量在 5 ~ 10 mg/kg

(缺乏)之间的面积比例最大,占总面积的 44.26%,同时很缺乏和极缺乏所占比例分别为 29.03% 和 11.47%,土壤中有有效磷的成分处于缺乏水平。

由图 4C 土壤速效钾的等级评价情况可知,区域土壤的速效钾含量超过 200 mg/kg(很丰富)的面积占区域总面积的 3.27%,含量在 150 ~ 200 mg/kg(丰富)之间的面积占区域面积的 4.92%,所占比例均相对较低,而区域内速效钾的缺乏面积占比为 67.21%,由此可知,在整个研究区内应当适当补充钾肥,同时采取一定的措施减缓钾元素的流失,提高钾肥的利用效率。

同时分析图 4D 和图 4E 可知,土壤有机质和全氮含量很丰富的区域占比分别为 45.90% 和 47.54%,所占比例较大,而其有机质和全氮含量缺乏区域占比分别为 8.19% 和 3.27%,由此可知,整个研究区域的土壤有机质和全氮的含量处于较高的水平。

在上述分析的基础之上,根据各个辖区采集土壤的各项指标测定结果,采用模糊模式识别理论对研究区所属的 6 个辖区以及其整体进行综合评价,参照表 1 的划分标准,将土壤的养分成分等级划分为 6 个级别。经分析可知(表 4),密云、延庆辖区的土壤养分级别为 ,土壤处于相对贫瘠的状态;昌平地区土壤养分等级为 ,该区域土壤各项养分指标处于中等水平,在进行农业生产过程中应适当地补充肥料,以保证土壤中碱解氮、有效磷、速效钾的含量成分;怀柔、

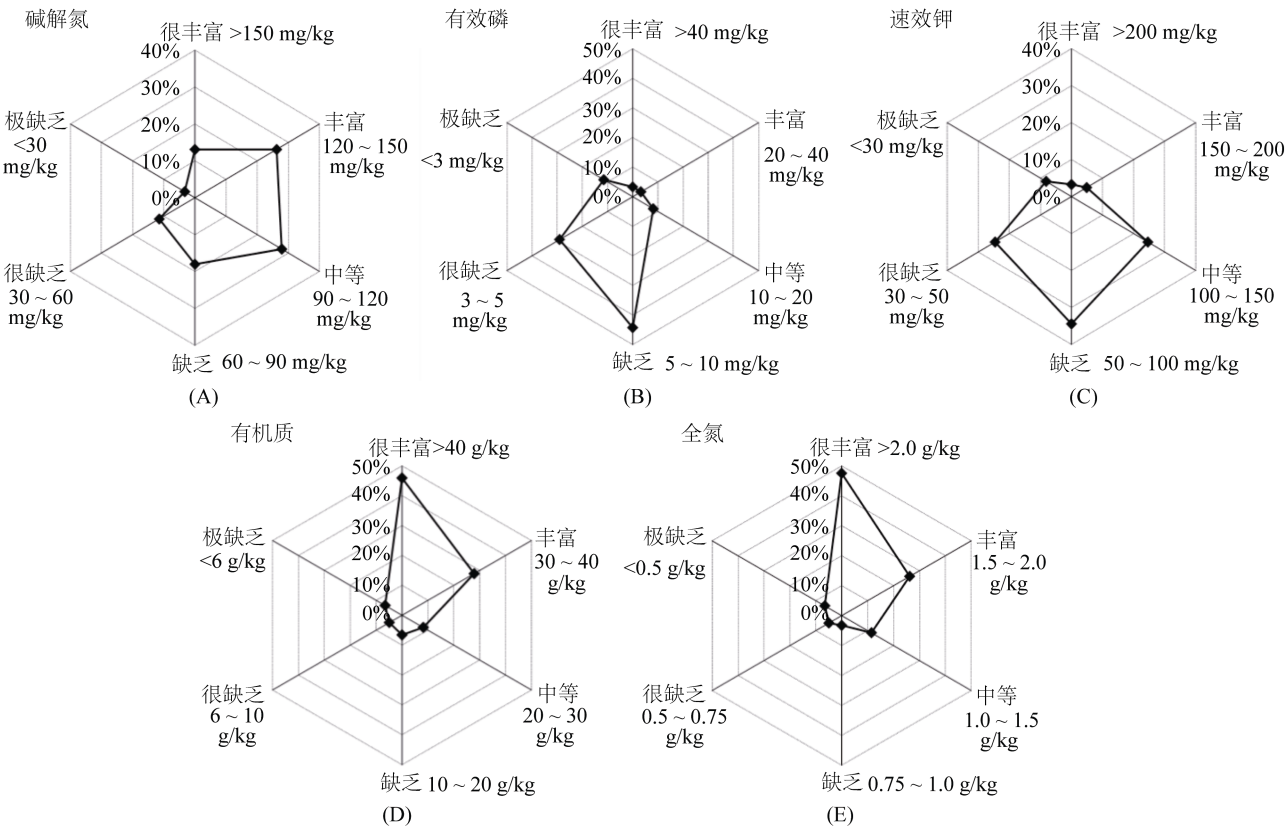


图 4 土壤养分等级统计图  
Fig. 4 Grade statistic maps of soil nutrients

表 4 模糊综合评价结果  
Table 4 Fuzzy comprehensive evaluation results

| 辖区  | 对各级别的相对隶属度 |         |         |         |         |         | Hi      | 级别  |
|-----|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
|     | I          | II      | III     | IV      | V       | VI      |         |     |
| 密云  | 0.367 6    | 0.274 2 | 0.213 1 | 0.057 4 | 0.049 2 | 0.038 5 | 2.261 9 | II  |
| 怀柔  | 0.102 7    | 0.117 6 | 0.241 5 | 0.075 4 | 0.187 6 | 0.275 2 | 3.953 2 | IV  |
| 延庆  | 0.313 4    | 0.387 8 | 0.152 9 | 0.037 8 | 0.047 2 | 0.060 9 | 2.300 3 | II  |
| 昌平  | 0.210 8    | 0.234 1 | 0.042 6 | 0.143 5 | 0.219 2 | 0.149 8 | 3.375 6 | III |
| 门头沟 | 0.087 6    | 0.139 5 | 0.137 8 | 0.117 9 | 0.263 4 | 0.253 8 | 4.091 4 | IV  |
| 房山  | 0.056 5    | 0.076 7 | 0.063 5 | 0.078 6 | 0.278 2 | 0.446 5 | 4.784 8 | V   |
| 研究区 | 0.071 5    | 0.211 7 | 0.112 6 | 0.254 1 | 0.104 5 | 0.245 6 | 3.845 2 | IV  |

门头沟地区林地覆盖面积相对较高，土壤的有机质、全氮含量相对较高，并且有效磷和速效钾的成分相对处于较高的水平，该区域的养分级别为 IV；房山区的土壤相对肥沃，各项指标均处于较高的水平，其综合评价等级优于其他区域。而在整个研究区的评价中，其整体水平处于 IV，区域土壤的综合水平处于中等偏上，因此，在今后的生产与资源开发利用中，应当适当地对土壤肥力的养分进行补给和修复，以保证资源的可持续利用。

综上所述，受到区域地形、地貌以及人类农业活动的影响，在研究区内，土壤的碱解氮和有效磷含量

整体呈现出中等偏上的水平，速效钾呈现缺乏的状态，而土壤中有有机质和全氮的含量整体处于丰富的状态。房山区、怀柔区和门头沟管辖区的土壤养分等级相对较高，密云、延庆相对贫瘠。因此，在今后的农业生产以及土壤规划利用中，应该适当地增加土壤钾肥的施用量，同时采取一定的措施提升土壤吸附固定的能力，高效、可持续地利用土壤水土资源。

3 结论

通过对试验土壤中各种养分含量经典统计学分析，除有机质符合对数正态分布，其余土壤养分分布

类型均符合正态分布。在空间变异规律上,有效磷、速效钾和有机质的变异系数分别为 37.08%、39.86% 和 28.99%,分别相对于碱解氮和全氮的变化幅度有所增加。而在空间剖面上,由于植被覆盖的影响以及环境驱动效应,随着土层深度的增加,土壤养分含量逐渐降低。

在对土壤养分空间变异过程进行半方差分析中,各养分拟合模型的绝对系数均达到了 0.7 以上,受到人类活动、气候变化、地形地貌的影响,各养分指标均具有良好的空间结构,其中有机质和全氮的空间相关性较强,而碱解氮、有效磷、速效钾的空间相关性有所减弱。另外,土壤各个养分的空间变程在 2.68 ~ 7.74 km,体现出随着养分空间相关性的增强,其变程逐渐缩小的趋势。

研究区内碱解氮的指标含量属于中等偏上水平,而速效钾、有效磷在空间分布中体现出普遍缺乏,有机质很丰富区域的面积占比分别相对于碱解氮、有效磷和速效钾很丰富区域的占比增加了 32.79%、42.63% 和 42.63%,有机质含量水平较高,同时全氮的含量水平也较为丰富。研究区整体综合肥力水平为 IV,该地区在生产过程中,应当采取一定的措施改良耕作土壤,避免其盐碱化和沙化,并且在施肥过程中应适当地增加钾肥、氮肥和磷肥的施用量,使各项养分含量均衡,从而提高土壤养分的利用效率和植被生长状况。

#### 参考文献:

- [1] 刘国顺,常栋,叶协锋,等. 基于 GIS 的缓坡烟田土壤养分空间变异研究[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2586–2595
- [2] Ryan J, Ibricci H, Singh M, et al. Response to residual and currently applied phosphorus in dryland cereal/legume rotations in three Syrian Mediterranean agroecosystems[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 28(2): 126–137
- [3] 张伟,陈洪松,王克林,等. 典型喀斯特峰丛洼地坡面土壤养分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 68–73
- [4] 吕真真,刘广明,杨劲松,等. 环渤海沿海区域土壤养分空间变异及分布格局[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 944–952
- [5] 赵庚星,李秀娟,李涛,等. 耕地不同利用方式下的土壤养分状况分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 55–58
- [6] Samake O, Ema S, Kropff M J, et al. Effects of cultivation practices on spatial variation of soil fertility and millet yields in the Sahel of Mali[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 109(3/4): 335–345
- [7] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等. 基于环境相关法和地统计学的土壤属性空间分布预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 237–242
- [8] Sumfleth K, Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(5): 485–501
- [9] 陈海生,刘大双,刘国顺. 河南襄城植烟区土壤中微量元素含量的空间异质性[J]. 土壤通报, 2010(3): 582–589
- [10] 于洋,刘吉平,徐艳艳. 东北典型黑土区土壤养分空间分异影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 66–69
- [11] Gudmundsson T, Björnsson H, Thorvaldsson G. Organic carbon accumulation and pH changes in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland[J]. *Catena*, 2004, 56(1/2/3): 213–224
- [12] 高灯州,闵庆文,陈桂香,等. 联合梯田农业文化遗产稻田土壤养分空间变异特征[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6951–6959
- [13] 方斌,吴金凤. 作物种植前后土壤有机质及养分因子的空间变异分析[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 983–992
- [14] Glendell M, Granger S J, Bol R, et al. Quantifying the spatial variability of soil physical and chemical properties in relation to mitigation of diffuse water pollution[J]. *Geoderma*, 2014, 214(2): 25–41
- [15] Ozgoz E, Gunal H, Acir N, et al. Soil quality and spatial variability assessment of land use effects in a typic haplustoll[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(3): 277–286
- [16] Foroughifar H, Jafarzadeh A A, Torabi H, et al. Using geostatistics and geographic information system techniques to characterize spatial variability of soil properties, including micronutrients[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2013, 44(8): 1273–1281
- [17] 宁静,关志新,卫丹,等. 农林交错区土壤养分空间分异特征分析[J]. 东北农业大学学报, 2014(8): 27–33
- [18] 赵明松,李德成,张甘霖,等. 江淮丘陵地区土壤养分空间变异特征——以安徽省定远县为例[J]. 土壤, 2016, 48(4): 762–768
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 47–56
- [20] Webster R, Oliver M A. Geostatistics for environmental scientists[M]. 2nd ed. Philadelphia: John Wiley & Sons, 2007
- [21] 黄绍文,金继运. 土壤特性空间变异研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2002(1): 8–14
- [22] 赵青,王子龙,姜秋香. 属性识别理论模型在土壤肥力综合评价中的应用[J]. 土壤与作物, 2007, 23(3): 265–267
- [23] 孔健健,张江山. 属性识别理论模型在湖泊水质富营养化评价中的应用[J]. 环境工程, 2004, 22(5): 66–68
- [24] 陶晓燕,朱九龙,王世军. 基于属性识别理论的城市生态安全评价——以广州市为例[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2048–2053
- [25] 肖俊峰,张江山,刘可慰,等. 属性识别理论在淮南市大气环境质量评价中的应用[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(4): 191–194

## Spatial Distributions of Soil Nutrients in Beijing Mountainous Area

LIANG Bin, QI Shi\*

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to reveal the spatial variations of soil nutrients and to guide the reasonable management of soil resources, the water-source forest in the mountainous areas and Beijing-Tianjin sandstorm source area in western Beijing were taken as the study object, on the basis of field sampling and by using the method of combining geostatistics and GIS, the spatial distributions of soil available nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter and total nitrogen were studied. Fuzzy pattern recognition theory was used to evaluate soil nutrient levels analyzed the influential factors of the spatial variation characteristics combined with the actual regional situation. The results showed that the spatial distribution of soil nutrients were in the normal distribution ( $P < 0.05$ ), the spatial variabilities of available phosphorus, available potassium and organic matter were stronger, the variation coefficients of available nitrogen and total nitrogen were lower, and soil nutrient gradually reduced with the increase of soil depth. The indexes of soil nutrients well fitted to the semivariogram model, organic matter and total nitrogen had good spatial autocorrelation, available nitrogen, available potassium and available phosphorus showed moderate autocorrelation, the spatial autocorrelation level of soil nutrient distribution pattern was strong. Available nitrogen was the highest in medium proportion, its area accounted for 27.87%, available potassium and available phosphorus were in lack states, but organic matter was very rich, and 73.77% of the soil texture types were rich in organic matter, total nitrogen was in abundance state with a low variation, the regional soil fertility was in comprehensive IV level. The research results can provide scientific basis for the reasonable division, rehabilitation and sustainable utilization of the regional soil resources.

**Key words:** Soil nutrients; Spatial variability; Geostatistics; Comprehensive evaluation