

# 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析

胡贵贵<sup>1,2</sup>, 杨联安<sup>1,2\*</sup>, 封涌涛<sup>3</sup>, 徐瑾昊<sup>1,2</sup>, 任 丽<sup>1,2</sup>, 李新尧<sup>1,2</sup>, 李亚丽<sup>1,2</sup>

(1. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

3. 宝鸡市农业技术推广服务中心, 陕西 宝鸡 721001)

**摘 要:**为分析陕西省宝鸡市农田土壤养分空间变异情况及其影响因素,选取土地利用类型、成土母质、土壤类型、高程、坡度、坡向、年均降水量、年均气温 8 种影响因子,借助地理探测器分析各因子对土壤有机质(SOM)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、全氮(TN)养分空间变异的影响。结果表明:造成 SOM 空间变异主要三因子分别为土地利用方式、土壤类型、年均气温;AP 与 AK 的主要影响因子为成土母质、高程、土地利用方式;对 TN 解释力较大的三因子为土地利用方式、土壤类型、成土母质。即各因子对土壤养分空间变异原因的解釋力存在一定的差异,气温变化对 TN 和 SOM 影响较大,高程是对 4 种土壤养分解釋力较强的地形因子。交互探测器探测结果表明:两因子间的交互作用对养分的解釋力均强于单因子,地形因子与其他因子交互之后解釋力显著增强。影响因子与养分之间主要作用方式为双协同作用和非线性协同作用。随着高程的变化,4 种养分含量呈现不同的变化趋势。此外,通过与 Pearson 相关系数法分析结果进行对比,发现地理探测器可以得到与之一致的因子重要性排序,适用于该区域土壤养分的研究。

**关 键 词:**土壤养分;影响因子;地理探测器;农田;宝鸡市

**中图分类号:**S147.2 **文献标识码:**A **文章编号:**0564-3945(2020)01-0071-08

DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2020.01.10

胡贵贵, 杨联安, 封涌涛, 徐瑾昊, 任 丽, 李新尧, 李亚丽. 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 71-78

HU Gui-gui, YANG Lian-an, FENG Yong-tao, XU Jin-hao, REN Li, LI Xin-yao, LI Ya-li. Influencing Factors of Soil Nutrients in Farmland of Baoji based on Geographical Detector[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 71-78

## 1 引言

土壤养分是土地质量评价、肥力监测的重要指标。受土壤结构、地形因子、人类行为等条件的影响,土壤养分呈现出明显的空间异质性<sup>[1]</sup>,这对土地质量评价的结果造成了不确定性。因此,土壤养分影响因子研究具有重要的理论和现实意义<sup>[2]</sup>。

近年来,关于土壤养分空间分布的影响因子分析受到越来越多的重视。杨其坡<sup>[3]</sup>、刘潘伟<sup>[4]</sup>、刘孝阳<sup>[5]</sup>等学者进行了高程、坡度、坡向等地形因子对土壤养分变异影响的研究,发现在不同的微地形条件下,地形因子与土壤养分间呈现不同的相关性,各地形因子对土壤养分变异解釋力也存在一定的差异。Kay 等<sup>[6]</sup>基于遥感影像与数字高程模型获得的辅助数据,研究了各因子与土壤养分之间的相关性。Baxter 等<sup>[7]</sup>基于高密集的海拔数据,比较了回归克里格、协同克里格等

地统计学方法在英国贝德福德郡进行的土壤养分预测精度。赵越等<sup>[8]</sup>利用地统计学方法对泰和县耕地养分影响因子进行研究,指出成土母质为影响养分空间分布的主导因子。朱洁等<sup>[9]</sup>采用分类与回归树模型(CART)对气候、成土母质等 11 个环境因子与养分含量相关性进行了研究,结果表明不同环境因子与土壤养分相关性差异较大,不同区域内养分变化主导因子存在差异。此外,不同土地利用结构下土壤养分差异性也受到学者们的关注<sup>[10-12]</sup>。尽管之前的许多研究都聚焦于土壤养分与其影响因子的相关性上,但主要都是基于单因子的影响程度展开的,缺乏组合变量对养分空间差异的研究。

地理探测器是由王劲峰等<sup>[13]</sup>研发的一种研究空间分异性的新方法,最先应用于社会科学、自然科学等方面。它克服了传统分析方法在处理分类型变量时的短板,适合于与空间相关的因子研究。如任相宁<sup>[14]</sup>

收稿日期:2019-08-18;修订日期:2019-11-22

基金项目:国家自然科学基金(41771129)及西北大学研究生自主创新项目(YZZ17151,YZZ17147)资助

作者简介:胡贵贵(1996-),男,硕士研究生,主要从事 RS 与 GIS 在农田土壤养分中的应用研究。E-mail: 17634976916@163.com

\* 通讯作者;E-mail: yanglian@163.com



因子的  $q$  值以及两因子交互作用之后的  $q$  值,来判断两因子之间是否存在交互作用以及作用方式。本文中采用因子探测器、交互探测器与风险探测器<sup>[23]</sup>。

因子探测器用来表示自变量  $X$  对因变量  $Y$  解释力的大小,用  $q$  值来衡量,公式为:

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (1)$$

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (2)$$

其中: $q$  值为养分空间变异影响因子探测指标, $N_h$  和  $N$  分别代表与全区范围的样点个数; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区的方差。 $SSW$  与  $SST$  代表层内方差和区域总方差。对于分类型变量,代表不同的类别属性,如冲积母质、残积母质等;对于数值型变量,层  $h$  则代表不同的划分等级。 $q$  值范围为 $[0,1]$ ,值越接近于 1,表示养分空间分异性越大,影响因子对于养分空间变异的解释力也就越大。

交互探测器用来衡量两因子之间的交互作用,即两个因子共同作用相对于单因子作用时强度的大小。两因子间的交互作用可分为以下几类:

非线性协同: $q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$

相互独立: $q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$

双因子协同: $q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$

单因子非线性拮抗: $\max(q(X1), q(X2)) > q(X1 \cap X2) > \min(q(X1), q(X2))$

非线性拮抗: $q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$

风险探测器用来探测因子内部各类别属性均值是否存在显著差异,用  $t$  统计量来检验:

$$t_{\hat{y}_{h=1}-\hat{y}_{h=2}} = \frac{\hat{y}_{h=1} - \hat{y}_{h=2}}{\left[ \frac{Var(\hat{y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{Var(\hat{y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

其中: $\hat{y}_{h=1}$  表示  $h = 1$  类别中的属性均值,如 SOM、AK 等土壤养分; $n_{h=1}$  表示  $h = 1$  的类别中样本个数, $Var()$  为方差函数。

**2.3.2 数据处理** 由于地理探测器的输入变量要求必须是分类型数据,因此对于获得的连续性变量需要进行分类化处理。土地利用类型、成土母质和土壤类型按照实际对应的类别进行分类;结合《第二次全国土地调查技术规程》<sup>[25]</sup>以及农田分布的地形条件,将高程分为  $< 615$  m、 $615 \sim 808$  m、 $808 \sim 1305$  m、 $1305 \sim 1323$  m、 $> 1323$  m 五级,坡度分为  $< 5^\circ$ 、 $5 \sim 10^\circ$ 、 $10 \sim 15^\circ$ 、 $15 \sim 25^\circ$ 、 $> 25^\circ$  五级;以北方向为基准,坡向分为平面、阴坡( $0 \sim 45^\circ$ 、 $315 \sim 360^\circ$ )、半阴坡( $45 \sim 90^\circ$ 、 $270 \sim 315^\circ$ )、半阳坡( $90 \sim 135^\circ$ 、 $225 \sim 270^\circ$ )、阳坡( $135 \sim 225^\circ$ ) 五大类;按自然间断点分裂法将降雨量和气温分为五级(图 2)。参照《全国第二次土壤普查养分分级标准》对 SOM、AP、AK、TN 四种养分进行分级。

利用地理探测器软件 (Geographical Detector) 对数据进行探测分析;数据统计在 SPSS 22.0 平台上进行;样点分布图和影响因子空间分布图利用 ArcGIS 10.3 软件绘制。

### 3 结果分析

#### 3.1 土壤养分空间分布特征

根据剔除异常值之后得到的 480 个采样点数据,对土壤养分进行一般性统计分析,结果如表 1 所示。由表 1 可见,宝鸡市农田土壤 SOM、AP、AK 和 TN 含量均值分别为  $16.80 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $19.52 \text{ mg kg}^{-1}$ 、 $198.82 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $1.18 \text{ g kg}^{-1}$ 。其中,SOM 含量处于分级标准的第四级( $10 \text{ g kg}^{-1} \sim 20 \text{ g kg}^{-1}$ ),处于稍微缺乏状态;AP 与

表 1 宝鸡市土壤养分统计性特征

Table 1 Statistical characteristics of soil nutrients in Baoji

| 区县<br>County | 样点数<br>Sample number | 土壤有机质<br>Soil organic matter<br>( $\text{g kg}^{-1}$ ) | 有效磷<br>Available phosphorus<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | 速效钾<br>Available potassium<br>( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | 全氮<br>Total nitrogen<br>( $\text{g kg}^{-1}$ ) |
|--------------|----------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 陈仓区          | 112                  | $16.05 \pm 4.35$                                       | $17.95 \pm 14.28$                                      | $199.12 \pm 97.97$                                    | $1.10 \pm 0.27$                                |
| 凤县           | 8                    | $17.54 \pm 4.58$                                       | $32.39 \pm 17.31$                                      | $200.31 \pm 65.98$                                    | $1.11 \pm 0.31$                                |
| 凤翔县          | 48                   | $16.83 \pm 2.98$                                       | $17.19 \pm 9.20$                                       | $186.67 \pm 87.00$                                    | $1.23 \pm 0.19$                                |
| 扶风县          | 45                   | $19.86 \pm 3.22$                                       | $13.33 \pm 7.63$                                       | $191.26 \pm 83.60$                                    | $1.37 \pm 0.19$                                |
| 麟游县          | 9                    | $14.02 \pm 1.93$                                       | $14.98 \pm 6.63$                                       | $196.44 \pm 117.22$                                   | $0.86 \pm 0.16$                                |
| 陇县           | 48                   | $15.42 \pm 3.63$                                       | $20.82 \pm 11.38$                                      | $183.07 \pm 81.04$                                    | $1.08 \pm 0.19$                                |
| 眉县           | 40                   | $17.66 \pm 3.08$                                       | $41.14 \pm 17.62$                                      | $286.54 \pm 84.18$                                    | $1.31 \pm 0.18$                                |
| 岐山县          | 78                   | $16.97 \pm 3.80$                                       | $17.35 \pm 7.86$                                       | $204.41 \pm 88.02$                                    | $1.21 \pm 0.26$                                |
| 千阳县          | 47                   | $15.28 \pm 3.19$                                       | $11.66 \pm 6.96$                                       | $182.10 \pm 99.19$                                    | $1.06 \pm 0.19$                                |
| 太白县          | 45                   | $18.10 \pm 4.64$                                       | $22.45 \pm 10.82$                                      | $167.63 \pm 117.35$                                   | $1.25 \pm 0.31$                                |
| 全区           | 480                  | $16.80 \pm 3.98$                                       | $19.52 \pm 13.57$                                      | $198.82 \pm 96.91$                                    | $1.18 \pm 0.26$                                |

注:表中数据为 4 种土壤养分含量的平均值  $\pm$  标准差。下同。



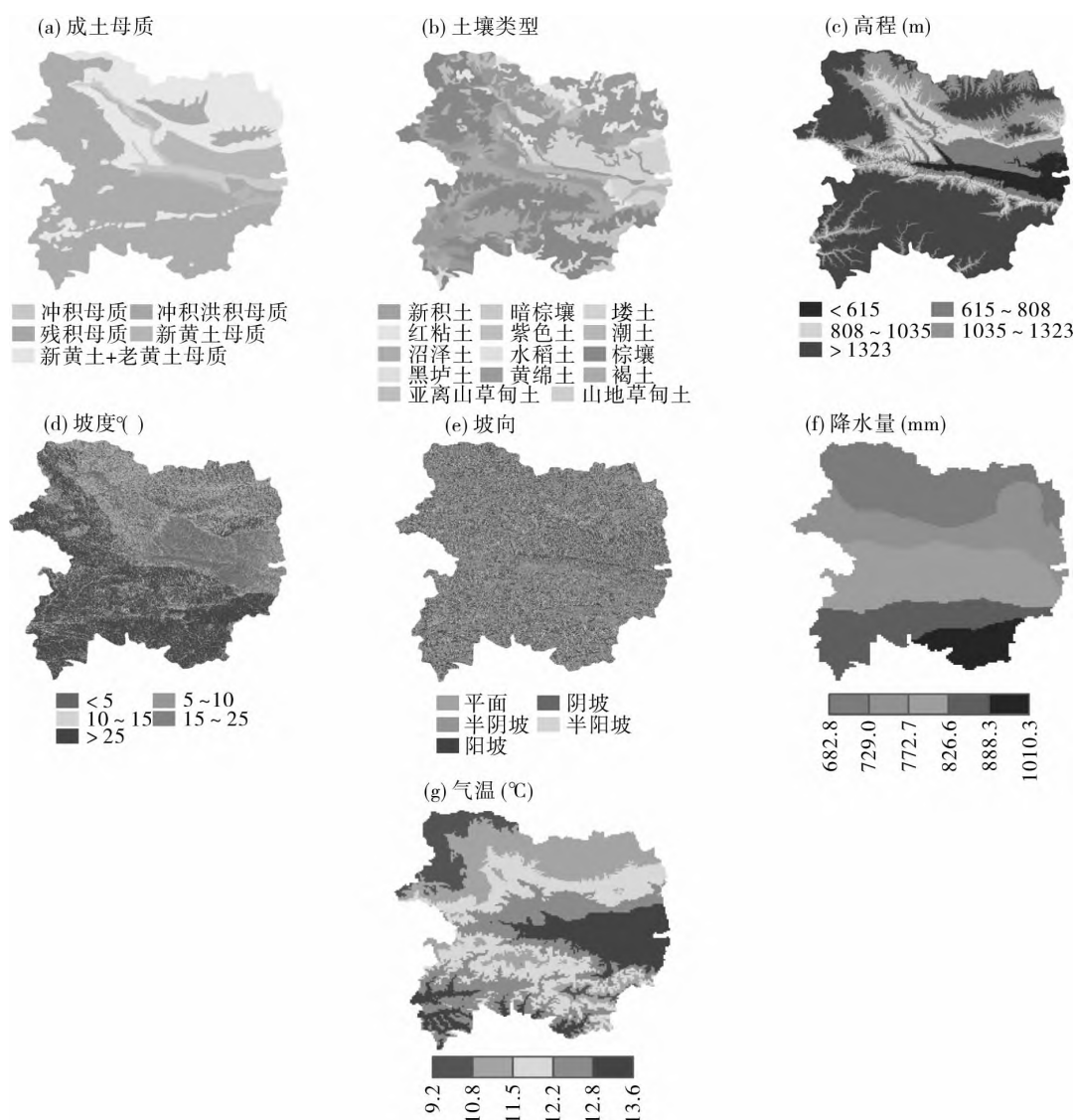


图 2 影响因子空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of influence factors

AK 含量分别处于标准第三级和第二级,但值得注意的是,眉县两种速效养分均达到一级极高水平,这与该县大面积种植猕猴桃、近几年施用有机肥较多有一定的关系;TN 含量处于三级标准水平。此外,经过对比标准差可以发现,太白县养分空间变异程度最高,主要原因在于:太白县境内地形起伏较大,耕地分布较为分散,坡度较陡使得降水对土壤养分离子的运移作用更为明显。

### 3.2 基于地理探测器的不同土壤养分空间变异分析

**3.2.1 因子探测** 利用因子探测器探测各影响因子对于这 4 种土壤养分的解释力,用  $q$  值来度量解释力大小。

因子探测器运行结果表明,影响因子对 4 种土壤养分的解释力存在差异(表 2):造成 SOM 空间变异主要三因子分别为土地利用、土壤类型、年均气温;

AP 与 AK 的主要影响因子为成土母质、高程、土地利用;对 TN 解释力较大的三因子为土地利用、土壤类型、成土母质。土地利用方式是影响 SOM、TN 空间变异的主要因子,但影响程度存在着差异,具体表现为  $q$  值在养分的排序:  $SOM > TN > AP > AK$ 。成土母质对 AP 的解释力为 19.5%,显著高于对其他的养分,主要是因为成土矿物是土壤磷的重要来源。在 3 种地形因子中,高程对土壤养分的解释力明显强于其他两种地形因子。气温对 TN 和 SOM 的解释力高于对其他的土壤养分,这主要因为随着温度的升高,有机质分解加快,造成 SOM、TN 含量减少。

**3.2.2 交互探测** 土壤养分的空间分布差异是由多种因子共同作用所造成的,因此可以利用交互探测器来反映各影响因子的交互作用(表 3)。

表 2 各影响因子对 4 种土壤养分的解释力

Table 2 The explanatory power of each impact factor on soil nutrients

| 养分<br>Nutrient | 土地利用<br>Land use | 解释力 Explanatory power   |                   |                 |             |              |                                       |                                    |
|----------------|------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-------------|--------------|---------------------------------------|------------------------------------|
|                |                  | 成土母质<br>Parent material | 土壤类型<br>Soil type | 高程<br>Elevation | 坡度<br>Slope | 坡向<br>Aspect | 年均降水量<br>Annual average precipitation | 年均气温<br>Annual average temperature |
| SOM            | 0.208            | 0.041                   | 0.123             | 0.047           | 0.010       | 0.014        | 0.078                                 | 0.079                              |
| AP             | 0.053            | 0.195                   | 0.041             | 0.081           | 0.014       | 0.001        | 0.031                                 | 0.029                              |
| AK             | 0.045            | 0.066                   | 0.038             | 0.050           | 0.021       | 0.003        | 0.043                                 | 0.028                              |
| TN             | 0.194            | 0.082                   | 0.182             | 0.083           | 0.020       | 0.006        | 0.077                                 | 0.109                              |

表 3 不同土壤养分影响因子交互作用探测

Table 3 The dominant interaction among different influence factors of soil nutrient

| 交互作用<br>Interaction | 解释力 Explanatory power        |                             |                            |                         |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|
|                     | 土壤有机质<br>Soil organic matter | 有效磷<br>Available phosphorus | 速效钾<br>Available potassium | 全氮<br>Total nitrogen    |
| 单因素<br>q            | 土地利用<br>0.208                | 成土母质<br>0.195               | 成土母质<br>0.066              | 土地利用<br>0.194           |
| 交互作用 1<br>q         | 土地利用<br>∩ 土壤类型<br>0.260      | 成土母质<br>∩ 土地利用<br>0.289     | 成土母质<br>∩ 土壤类型<br>0.155    | 土地利用<br>∩ 土壤类型<br>0.271 |
| 交互作用 2<br>q         | 土地利用<br>∩ 坡度<br>0.247        | 成土母质<br>∩ 高程<br>0.254       | 降水量<br>∩ 高程<br>0.139       | 土地利用<br>∩ 坡度<br>0.263   |
| 交互作用 3<br>q         | 土地利用<br>∩ 气温<br>0.243        | 成土母质<br>∩ 降水量<br>0.234      | 土地利用<br>∩ 降水量<br>0.133     | 土壤类型<br>∩ 气温<br>0.248   |

如表 3 所示,在列出各种养分的单因素影响因子的基础上,通过交互探测器的计算,得到了解释力最高的三种交互作用方式。结果显示:4 种养分在交互作用下的解释力均明显高于单要素的解释力,说明影响因子的共同作用相对于单因子是增强的。可以发现:地形因子作为单因子探测时,解释力并不突出,但在其他因子交互作用后,解释力大大增强。如土地利用类型∩坡度对 TN 解释力为 26.3%、对 SOM 的解释力为 24.7%,成土母质∩高程对 AP 的解释力为 25.4%。坡向经过交互作用后解释力也显著增加,主要是由于不同坡向的土壤水热条件差异所造成的。这可以说明地形因子在短期小尺度条件下是影响养分空间变异的关键因素<sup>[26]</sup>。此外,对于目标土壤养分,各因子之间主要是双协同作用和非线性协同作用,不存在相互单独起作用的因子。不同影响因子对各养分的作用存在着差异,比如,坡向、坡度对 AP 均为非线性

协同作用,但对 SOM 而言,除了坡向坡度,气温也表现为非线性协同作用。值得注意的是,坡度与坡向两因子对于研究的 4 种土壤养分都呈非线性协同作用,它们主要通过影响作物的种植生长来影响养分的分布。

**3.2.3 风险探测** 地理探测器除了可以探测各影响因子对土壤养分空间差异的作用大小外,还可以利用风险区探测器识别各因子内每一类别对养分影响程度的显著性。以高程为例,通过风险区探测器可以得到不同海拔等级下的养分状况(表 4),可以发现:在高程低于 615 m 的区域,SOM、AK、AP、TN 含量相对其他等级的养分含量明显较高,主要是因为该区域主要集中在渭河两侧,成土母质为典型的冲积母质和冲积洪积母质,加上较平坦的地形条件以及便利的灌溉资源,使得该区域养分含量普遍较高。AK、AP 与高程的相关性存在一致性,表现为养分含量随高程的升高而减小,之后逐渐趋于稳定。原因主要有:海拔高的地区

表 4 不同海拔条件下土壤养分状况

Table 4 Soil nutrient status under different altitudes

| 高程<br>Elevation | 样点数<br>Sample number | 土壤有机质 (g kg <sup>-1</sup> )<br>Soil organic matter | 有效磷 (mg kg <sup>-1</sup> )<br>Available phosphorus | 速效钾 (mg kg <sup>-1</sup> )<br>Available potassium | 全氮 (g kg <sup>-1</sup> )<br>Total nitrogen |
|-----------------|----------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| < 615           | 71                   | 18.41 ± 3.59                                       | 21.46 ± 17.19                                      | 221.66 ± 88.18                                    | 1.29 ± 0.23                                |
| 615 ~ 808       | 135                  | 16.89 ± 3.92                                       | 19.82 ± 14.17                                      | 203.97 ± 95.34                                    | 1.19 ± 0.26                                |
| 808 ~ 1035      | 154                  | 16.85 ± 3.98                                       | 19.54 ± 13.70                                      | 198.12 ± 96.99                                    | 1.18 ± 0.26                                |
| 1035 ~ 1323     | 74                   | 16.74 ± 3.95                                       | 19.50 ± 13.59                                      | 198.40 ± 97.08                                    | 1.17 ± 0.26                                |
| > 1323          | 47                   | 16.60 ± 3.96                                       | 19.52 ± 13.58                                      | 198.82 ± 97.09                                    | 1.18 ± 0.26                                |

受制于复杂的地形条件,难以进行大面积的机械耕作,人类对土壤的管理受到一定的制约;随着海拔的升高,农耕地类型也经历由水浇地到旱地的转变,灌溉条件难以满足,从而造成不同海拔上的差异性等等。此外,AK 含量标准差随海拔升高也逐渐变大,可以反映宝鸡市农耕地在较高海拔区域呈现离散化、碎

块状分布,使得空间变异程度较高。

### 3.3 地理探测器与 Pearson 相关系数结果对比分析

土壤养分与影响因子之间的相关分析最常用的是 Pearson 相关系数法。以 SOM 为例,利用 Pearson 相关分析法进行相关性计算,并将计算结果与地理探测器结果进行对比分析,结果如图 3 所示。

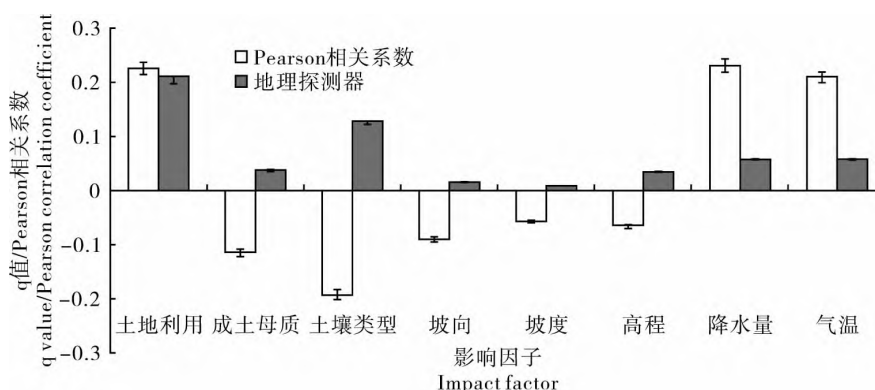


图 3 地理探测器和 Pearson 分析 SOM 与影响因子相关性结果对比

Fig. 3 Comparison of correlation between soil organic matter and influence factors by using the geographical detector and Pearson analysis

利用地理探测器和 Pearson 相关分析对 SOM 与其影响因子相关性分析结果存在一致性和差异性。一致性表现在:利用两种方法都得到了 8 种影响因子与 SOM 的相关性强弱的排序。土地利用类型、土壤类型、降水量、气温是影响 SOM 空间差异的主要因子,成土母质与地形因子的解释力相对较小。差异性表现在 Pearson 相关分析法在指出解释力大小的同时,还指出是正相关还是负相关。例如高程对有机质呈负相关,表明随着海拔的升高,SOM 含量会呈现减少的趋势。而地理探测器的值域介于[0,1],反映的是相对大小,无法得知是正相关还是负相关。这也说明两种方法在分析过程中存在的差异。Pearson 相关系数法是来衡量两组数值变量之间的线性关系,相关系数的正负分别表示正相关或负相关,但对于土地利用类型、土壤类型这样的分类型变量的计算存在一定的缺陷。地理探测器通过计算各类别方差之和与全区总方差来探测变量之间的解释力,适用于数值型变量和分类型变量。

## 4 讨论

宝鸡市土壤养分在空间分布上具有明显的异质性,这是由多种影响因子共同作用导致的。成土母质、土壤类型作为土壤属性特征,它们决定了土壤保水保肥、通气以及耕作难易程度的能力,是造成土壤养分空间分异的主导因素。地形是影响土壤发育的重要因

素之一,通过调节土壤水分与太阳辐射的空间再分配对土壤养分产生影响<sup>[9]</sup>。土壤养分含量与坡度之间存在显著的负相关性,这是由于坡度越大造成的地表径流侵蚀作用越强,从而对养分离子的运移作用越明显,最终大量富集于坡度较缓的区域;不同坡向下的光照条件、温度、水分状况有差异<sup>[27]</sup>,阴坡、半阴坡、半阳坡土壤中光照及温度较为恒定,易于微生物活动与养分积累。降水量与气温主要是通过干预植物生长发育与有机质分解影响土壤养分的分布,单因子对养分空间变异解释力并不强,更多地结合复杂地形来形成局部小气候对土壤养分产生影响<sup>[28]</sup>。

因子探测器在解释土壤养分空间变异上可以取得较好的效果(表 2),但由具体的解释力值来看,显然这些因素并不能完全解释养分的变化。因此,应综合考虑土壤生成、变化的诸多因素,并提取代表性的更强的影响因子,例如土壤容重<sup>[29]</sup>、灌溉方式<sup>[30]</sup>、轮作方式<sup>[31]</sup>、模糊坡位<sup>[32]</sup>以及人类活动因子<sup>[33]</sup>等,更大程度上解释土壤养分的空间变异性。

地理探测器作为研究空间分异性、解释驱动因素的新方法,在处理成土母质、土壤类型等类型变量,揭示变量之间交互作用方面具有明显的优势,可以较好地应用于土壤养分的影响因子分析中。但不可忽视的是,由于模型输入数据必须为类型变量,那么对连续变量的分类分级很大程度上决定了模型探测结果的准确性,一方面既要保证各类别样点数据之间具有明



显的差异性,以便于对造成土壤养分空间变异各因子的解释力进行充分表达;另一方面也要确保各类别包括有足够的样点个数,避免异常值造成的误差。

## 5 结论

利用地理探测器对宝鸡市农田土壤养分空间差异进行了研究,通过因子探测器、交互探测器、风险探测器分别进行了探测,并将探测结果与 Pearson 相关分析结果进行比较,主要得到以下结论:

(1) 利用因子探测器探测结果显示:8 种影响因子对于各养分的影响存在差异性。表现为:造成 SOM 空间变异主要三因子为土地利用方式、土壤类型、年均气温;AP 与 AK 的主要影响因子为成土母质、高程、土地利用方式;对 TN 解释力较大的三因子分别为土地利用方式、土壤类型、成土母质。成土母质对 AP 的影响明显强于其他因子,气温对 SOM 和 TN 的解释力较大。利用交互探测器与风险探测器探测结果显示:两因子间的交互作用对养分的解释力均强于单因子,地形因子与其他因子交互之后解释力显著增强,不同海拔条件下养分含量存在差异性。利用地理探测器与 Pearson 相关分析法进行养分空间变异研究得到大体一致的相关性排序,表明地理探测器在养分研究中的适用性。

(2) 宝鸡市农田土壤养分整体上表现为:土壤有机质含量稍微偏低,速效养分含量中等偏高,全氮处于中等水平。各县域土壤养分含量存在差异,空间变异程度不同。不同区县土壤养分含量存在差异性,太白县境内养分空间变异较大,眉县的速效养分显著高于平均水平。因此,应该结合不同土壤养分状况调整施肥策略,深入开展耕地质量保护与提升行动,大力推广深松整地、秸秆还田、有机肥增施、测土配方施肥等技术,提升土壤肥力,改善土壤质量,实现土壤资源可持续利用。

## 参考文献:

- [1] LUIS M, CASTRO J, ZAMORA R. Soil-nutrient availability under a global-change scenario in a Mediterranean mountain ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(4):1646 – 1657.
- [2] 陈桂香,高灯州,曾从盛,等.福州市农田土壤养分空间变异特征[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(2):216 – 224.
- [3] 杨其坡,武伟,刘洪斌.基于地形因子和随机森林的丘陵区农田土壤有效铁空间分布预测[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(3): 422 – 431.
- [4] 刘潘伟. 基于 NDVI 和地形因子的江西大岗山流域土壤碳氮空间分布特征[D]. 山东农业大学, 2018.
- [5] 刘孝阳,周伟,白中科,等.平朔矿区露天煤矿排土场复垦类型及微地形对土壤养分的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 6 – 12.
- [6] SUMFLETH KDUTTMANN 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.
- [7] BAXTER S J, OLICER M A. The spatial prediction of soil mineral N and potentially available N using elevation[J]. *Geoderma*, 2005, 128 (3 – 4): 325 – 339.
- [8] 赵越,罗志军,廖牧鑫,等.泰和县耕地土壤养分空间分布及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5):296 – 303.
- [9] 朱洁. 重庆东南烟区环境因子对土壤养分含量的影响[D]. 西南大学, 2018.
- [10] 傅伯杰,马克明,周华峰,等.黄土丘陵区土地利用结构对土壤养分分布的影响[J]. *科学通报*, 1998, 43(22):2444 – 2447.
- [11] 孔祥斌,张凤荣,齐伟,等.集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(3):333 – 342.
- [12] NIU X Y, WANG Y H, YANG H, et al. Effect of land use on soil erosion and nutrients in Dianchi Lake watershed, China [J]. *Pedosphere*, 2015, 25(1):103 – 111.
- [13] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107 – 127.
- [14] 任向宁,董玉祥.基于地理探测器的区域土壤耕层有机碳含量多元复合模型构建[J]. *热带地理*, 2018, 38(4):546 – 556.
- [15] 柳年青,张金茜,李红瑛,等.基于地理探测器的流域土壤磷流失影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(12):4814 – 4822.
- [16] 张莹,张学玲,蔡海生.基于地理探测器的江西省万安县生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(4):207 – 214.
- [17] 杨振,丁启燕,周晴雨,等.长江中下游地区人口健康水平空间分异特征与地理影响因子[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34 (6): 77 – 84 + 2.
- [18] 吕晨,蓝修婷,孙威.地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(8):1385 – 1397.
- [19] 马小雯,章笑艺,来丽芳,等.基于地理探测器的浙江省空气质量风险因子分析[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2018, 45(3):351 – 362.
- [20] XU QDONG Y X, WANG Y Y, et al. Determinants and identification of the northern boundary of China's tropical zone [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(1):31 – 45.
- [21] 廖颖,王心源,周俊明.基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(6):767 – 778.
- [22] 徐冬,黄震方,胡小海,等.浙江省县域旅游效率空间格局演变及其影响因素[J]. *经济地理*, 2018, 38(5): 197 – 207.
- [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] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116 – 134.
- [25] TDT 1014 – 2007. 第二次全国土地调查技术规程[S].
- [26] 翟朝阳,邱娟,司洪章,等.微地形对大西沟新疆野杏萌发层土壤因子的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(6):1 – 11.
- [27] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土高原小流域土壤养分的时空变异及其影响因子[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(3): 294 – 299.

- [28] 徐莉, 闫俊杰, 陈晨, 等. 新疆察布查尔县农耕层土壤养分空间特征及其与地形因子的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 38 – 45.
- [29] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 土壤通报, 2001, 32(05): 209 – 213.
- [30] 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性[J]. 土壤学报, 2003, 40(05): 697 – 703.
- [31] 张志毅, 范先鹏, 夏贤格, 等. 长三角地区稻麦轮作土壤养分对秸秆还田响应 – Meta 分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 401 – 406.
- [32] 秦承志, 卢岩君, 邱维理, 等. 模糊坡位信息在精细土壤属性空间推测中的应用[J]. 地理研究, 2010, 29(9): 1706 – 1714.
- [33] 李学梅, 任志远, 张翀. 气候因子和人类活动对重庆市植被覆盖变化的影响分析[J]. 地理科学, 2013, 33(11): 1390 – 1394.

## Influencing Factors of Soil nutrients in Farmland of Baoji Based on Geographical Detector

HU Gui-gui<sup>1,2</sup>, YANG Lian-an<sup>1,2\*</sup>, FENG Yong-tao<sup>3</sup>, XU Jin-hao<sup>1,2</sup>,  
REN Li<sup>1,2</sup>, LI Xin-yao<sup>1,2</sup>, LI Ya-li<sup>1,2</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China;  
2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. Baoji Agricultural Technology  
Extension and Service Center, Baoji 721001, China)

**Abstract:** Soil nutrients are essential indicators for land quality assessment and fertility monitoring. To investigate spatial variation and its influence factors in Baoji, eight types of impact factors including land use type, soil parent material, soil type, elevation, slope, aspect, annual average precipitation and annual average temperature were selected and imported into Geographical Detector. The spatial variabilities of four soil nutrients (soil organic matter, SOM; available phosphorus, AP; available potassium, AK; total nitrogen, TN) were analyzed. The results showed that the spatial variability of SOM was mainly affected by land use type, soil type and annual mean temperature. The main influencing factors of AP and AK were soil parent material, elevation and land use type and those of TN were land use type, soil type, and soil parent material. The annual mean temperature had significant impacts on TN and SOM. The elevation was a topographic factor with strong explanatory power. The explanatory power for soil nutrients by the interaction between the two factors was stronger than that by the single factor, and that by the interpretation between the topographic factor and other factors was significantly enhanced. The interpretation between impact factor and soil nutrients showed the primary dual synergy and nonlinear synergy modes. The four nutrients showed different trends with the change of elevation. Besides, the Geographical Detector obtained the same result of the significance order of soil nutrients as the Pearson correlation coefficient and was more suitable for the study of soil nutrients. In the future production activities, the fertilization strategy should be adjusted in combination with different soil nutrient conditions, and soil testing and formula fertilization should be carried out scientifically and rationally to achieve sustainable use of soil resources.

**Key words:** Soil nutrient; Impact factor; Geographical Detector; Farming area; Baoji

[责任编辑: 孙福军]