

尧都区西南部褐土耕层土壤养分的空间分布特征

孟阳阳^{1,2,3},张永清^{3,4},周进财⁴,刘冰¹

(1. 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站,中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室,中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000;2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 山西师范大学地理科学学院,山西 临汾 041004;4. 山西师范大学生命科学学院,山西 临汾 041004)

摘要:【目的】为探讨褐土耕层土壤养分的空间分布特征及其变异规律。【方法】以临汾市尧都区为研究区,应用地统计学、克里格插值法和地理探测器等方法,研究褐土耕层有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾等土壤养分要素的空间分布特征及其影响因素。【结果】褐土耕层土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾均服从对数正态分布,平均含量分别为 12.34 g/kg,1.15 g/kg,53.54 mg/kg,23.45 mg/kg 和 229.58 mg/kg,变异系数在 38.36%~85.40%之间,均呈中等变异强度。【结论】有机质与全氮的空间变异主要受结构性因素影响,而速效养分主要受随机因素影响;速效钾表现为单一斑块,其他养分均呈从两边区域向中间区域逐渐增加的趋势。人为管理措施对速效养分格局起主导作用,成土母质和灌溉水源条件是影响有机质和全氮分布的主要因素。此外,灌溉水源条件对各养分影响均较大,土壤质地的影响均较小。

关键词:褐土;土壤养分;空间格局;克里格插值;尧都区

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

文章编号:1003-4315(2018)01-0102-08

Spatial distribution of soil nutrients in cinnamon soil arable layer in southwest of Yaodu district

MENG Yang-yang^{1,2,3},ZHANG Yong-qing^{3,4},ZHOU Jin-cai⁴,LIU Bing¹

(1. Linze Inland River Basin Research Station,Chinese Ecosystem Network Research,Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin,Northwest Institute of Eco-Environment and Resources,Chinese Academy of Sciences,Lanzhou 730000,China;2. University of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100049,China;3. College of Geography Science,Shanxi Normal University,Linfen 041004,China;4. College of Life Science, Shanxi Normal University,Linfen 041004,China)

Abstract:【Objective】The aim was to study the spatial distribution and variation pattern of soil nutrients in cinnamon soil,and provide theoretical basis for the precision management and sustainable development of soil fertility.【Method】Geostatistical methods,the ordinary Kriging interpolation method in ArcGIS,and geographical detector were used to analyze the spatial distribution and the influencing factors for soil organic matter(SOM),total nitrogen(TN),alkali-hydrolyzable nitrogen(AN),available phosphorus(AP) and available potassium(AK) in cinnamon soil arable layer at Yaodu district of Shanxi province.【Result】SOM,TN,AN,AP and AK all obeyed logarithmic normal distribution with the average content of 12.34 g/kg,1.15 g/kg,53.54 mg/kg,23.45 mg/kg and 229.58 mg/kg,respectively,and the variation coefficients ranged from 38.36% to 85.40% being at moderate variation intensity.【Conclusion】The spatial

第一作者:孟阳阳(1993-),女,硕士研究生,主要从事生态水土方面的研究。E-mail:mengyangyang@lzb.ac.cn

通信作者:张永清,男,教授,主要从事土壤与植物地理学的研究。E-mail:yqzhang208@126.com

基金项目:国家自然科学基金面上项目(30871483);国家自然科学基金面上项目(41471024)。

收稿日期:2016-03-06;修回日期:2017-04-06

variation of SOM and AN were mainly affected by structural factors, while the spatial variation of available nutrients were mainly affected by random factors, AK appeared single patch, and other nutrients took the increasing trend from the two sides to the middle area. Human management measures played dominant role in the distribution pattern of available nutrients. Soil parent material and sources of irrigation water had an important impact on distribution of SOM and TN. In addition, the effect of sources of irrigation water was large to soil nutrients and the influence of soil texture was small.

Key words: cinnamon soil; soil nutrient; spatial pattern; Kriging interpolation; Yaodu district

土壤养分作为土壤肥力的基本属性,决定着农作物的产量和农田生态系统的生产力,其分布特征是土壤资源合理利用、土壤肥力评价和土壤养分管理的前提与基础^[1-3]。受气候、母岩等因素的影响,土壤养分具有明显的空间自相关性。同时,土壤是地形、植被等局地因素以及人类活动等共同作用形成的非均质和变化的时空连续体,因此土壤养分又具有高度的空间异质性^[4]。掌握土壤养分空间变异特征及其影响因素,对土壤分区管理、土壤质量的改良、土壤调查采样数的合理化等具有重要意义,是提高土壤肥力的重要手段^[3-5]。

近年来,地统计学、神经网络、线性模型、模糊系统、回归树等许多方法都被用来分析农田土壤养分的空间分布,为定量分析土壤养分空间变异规律及其与环境因素的复杂关系提供了更多手段^[4,6-8]。但是,半变异函数与克里格插值结合的地统计学方法仍然是最普遍使用的精确预测不同空间尺度土壤养分分布的基本分析方法。目前,国内外在不同区域尺度利用地统计学对土壤养分空间异质性的研究取得了丰硕的成果^[1,9-11]。如 Kumar 等^[9]对喜马拉雅流域的研究表明,地形地貌显著影响土壤养分变异。张建杰等^[10]研究表明,临汾盆地土壤有机质和全氮的空间自相关距离分别为 20.9 km 和 21.5 km,二者的空间变异主要受到结构性因素的影响。胡艳霞等^[1]针对密云水库一级保护区进行了研究,结果表明土壤速效养分含量变异系数较高,变程较小,随机性因素对土壤速效养分含量的影响较大,而结构性因素对全量养分的影响较大。朱菊兰等^[11]在浑河太子河流域的研究表明,地形和土地利用的交互作用对土壤养分变异影响显著。这些研究为土壤养分的精准管理建立了基础与依据。然而,地理空间环境因素的差异使得土壤养分表现出空间异质性。基于不同的环境因素在地理位置上存在的差异,王劲峰等^[12]

提出的地理探测器方法中的因子探测器,可以分析不同因素对养分指标空间分布差异的影响程度,为探讨土壤养分空间变异的影响力情况提供了有力的工具。

褐土是中国北方地区主要农业土壤之一,山西省是我国褐土分布最集中和较典型的区域^[13]。然而,关于褐土农田的研究多集中在不同培肥措施效应^[14]、养分评价与管理^[15]和养分空间变异规律^[13]等方面,而对其土壤养分分布格局及其影响因素的研究鲜有报道。尧都区是褐土的典型代表区,因此,本研究运用地统计学与 GIS 相结合的方法分析尧都区褐土耕层的土壤养分空间分布特征,并采用地理探测器方法对其影响因素进行了综合定量研究,旨在为土壤肥力精准管理和可持续发展提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省尧都区西南部,地处临汾盆地的中央,地理位置 N 36°54′~36°19′, E 111°05′~111°49′,总面积 305 km²,全境分山地、丘陵、盆地三大地形单元。研究区属暖温带大陆性气候,处于半干旱、半湿润季风区,四季分明,雨热同期。年均降水量 550 mm,主要集中在 7—9 月。年均气温 10 °C,7 月份平均气温 26.3 °C,1 月份平均气温 4.4 °C,年日照时数 2 416.5 h,年均积温 3 357.9 °C,无霜期 203 d。受水热条件影响,地带性土壤主要为褐土、草甸土、棕壤土和沼泽土。研究区域耕地面积约 4 365 hm²,褐土是主要农作土壤,农业历史悠久,约占研究区耕地面积的 85%。褐土耕地主要在西北至东南方向以条状或成片分布。

1.2 样品采集及分析

将尧都区行政区划图、土地利用现状图和全国

第二次土壤普查的土壤图作为基础图件,综合考虑研究区的地形地貌、水文特点和植被等因素,初步确定分层采样点位置.在2010年10月,进行土壤样品的采集,共采样403个.同时,记录每个样点的海拔、地形、地貌、坡度、灌溉方式、熟制、典型耕作制度、成土母质和质地等信息.在每个采样点,采用S法采集5个土样,取样深度20 cm,将土样充分混匀后使用4分法留取1 kg作为该点土壤样品.然后,在实验室内,风干研磨土样,进行各养分测定.土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用半微量凯氏定氮法测定;水解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定.



图1 尧都区西南部褐土耕层土壤样点分布

Figure 1 The distribution of soil samples of cinnamon soil arable layer in southwestern Yaodu district

1.3 数据处理

利用GS+9.0软件将经对数转换后符合正态分布的土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾含量数据进行半方差分析和拟合,依据半变异函数理论模型在ArcGIS10.0软件的地统计学模块(geostatistical analyst)支持下,采用普通克里格插值(ordinary Kriging)法绘制土壤养分空间插值图.采用单因素方差分析法和多重比较法,分析成土母质、土壤质地、地形地貌和灌溉水源等主要自然因素与人为活动对土壤主要养分分布格局的影响,并运用地理探测器模型综合分析主要自然因素对土壤养分空间格局的决定力.

半变异函数是地统计学的理论核心.它是通过测定区域化变量分隔等距离样点之间的差异来

研究区域化变量的空间结构.半变异函数计算公式如下:

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

式中, $\gamma(h)$ 为 h 的半方差, h 是两样点空间间隔距离, $N(h)$ 为间隔距离为 h 的样点对的总数, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_{i+1})$ 分别是区域化变量 $Z(x)$ 在空间位置 x_i 和 x_{i+1} 的观测值^[16].

地理探测器是通过对比某指标在不同类别分区上的方差与该指标在整个研究区的总方差大小,计算某种因素对形成某个指标的空间格局的影响力大小.表达式为:

$$P_{D,H} = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \sigma_{HD,i}^2 \quad (2)$$

式中, D 为影响因子; H 为土壤养分指标; $P_{D,H}$ 为 D 对 H 的解释力; n 和 σ^2 分别为某种养分的整体样本个数和方差; m 为某种因子的分类个数; $n_{D,i}$ 为 D 指标在第 i 类上样本的个数. $P_{D,H}$ 取值范围为 $[0,1]$,其数值越大表明该因子对土壤养分分布格局的影响越大^[17].

2 结果与分析

2.1 土壤养分的分布特征

在研究区,褐土土壤有机质、全氮、水解氮、有效磷和速效钾均服从对数正态分布,平均含量分别为12.34 g/kg, 1.15 g/kg, 53.54 mg/kg, 23.45 mg/kg和229.58 mg/kg(表1).5种主要养分指标变异系数介于38.36%~85.40%之间,总体呈中等变异强度,表明研究区不同位置各养分含量差异较大.其中速效钾变异强度最大(85.40%),其余养分变异强度依次为有效磷(79.71%)、水解氮(41.77%)、全氮(41.39%)和有机质(38.36%).根据全国第二次土壤普查养分分级标准,研究区土壤有机质处于中等水平,全氮属于丰富水平,有效磷和速效钾均属于很丰富水平,水解氮处于缺乏状态.

2.2 土壤养分的空间结构

由表2可见,除全氮的半方差函数为球状模型外,有机质、水解氮、有效磷和速效钾均采用高斯模型,具有较好的拟合效果($r^2 > 0.626$).其中全氮(57.6 km)和有机质(15.2 km)的变程较大,说明二

表 1 土壤养分的描述性统计分析

Table 1 Descriptive statistics analysis of soil nutrients

指标	均值±标准差	变异系数	偏度	峰度
SOM/(g·kg ⁻¹)	12.34±4.73	38.36	3.12	18.84
TN/(g·kg ⁻¹)	1.15±0.48	41.39	2.23	13.80
AN/(mg·kg ⁻¹)	53.54±22.36	41.77	0.65	0.33
AP/(mg·kg ⁻¹)	23.45±18.69	79.71	2.35	7.89
AK/(mg·kg ⁻¹)	229.58±196.06	85.40	2.06	10.78

者在较大范围内空间自相关性强;水解氮(4.9 km)、有效磷(3.3 km)与速效钾(3.2 km)的变程较小,空间相关性较弱,表明当地农户对速效养分的肥料投入量较大,使其产生很大的空间变异.在研究区,有机质、全氮、水解氮和有效磷等土壤养分的 C₀/(C₀+C)介于 29.63%~67.27%之间,具有中等程度的空间自相关性.其中,有机质(29.63%)和全氮(36.67%)的块金系数较小,表明二者受结构性因素(如地形、水文、土壤质地等)的影响大于随机因素(如施肥、耕作制度、管理水平等);相反,水解氮

(55.56%)和有效磷(67.27%)的块金系数相对较大,随机因素对其空间变异影响较大.尽管人为活动对这 4 种养分均具有一定的影响,但并未对其原有分布格局产生强烈的破坏作用.速效钾的 C₀/(C₀+C)为 78.75%,空间自相关性弱,其空间变异格局与原有格局相比,受到了很大的破坏,这主要是由施肥、管理措施等人为因素引起的.尧都区的耕地具有悠久的农耕历史,长期的耕作施肥使其形成了深厚肥沃的熟化表土层,土壤速效养分由此呈现出很强的空间变异性.

表 2 土壤养分的最优半方差函数模型及参数

Table 2 The optimal semivariance function model and parameters of soil nutrients

指标	模型	块金值 C ₀	基台值 C ₀ +C	块金系数 C ₀ /(C ₀ +C) %	变程 A/Km	决定系数 r ²	残差平方和 RSS
有机质	高斯	0.08	0.27	29.63	15.2	0.826	0.012
全氮	球状	0.11	0.30	36.67	57.6	0.792	0.185
水解氮	高斯	0.10	0.18	55.56	4.9	0.934	0.062
有效磷	高斯	0.37	0.55	67.27	3.3	0.809	0.013
速效钾	高斯	0.11	0.14	78.57	3.2	0.626	0.269

2.3 土壤养分的空间格局

研究区褐土土壤主要养分的空间分布格局差异明显(图 2).速效钾表现为单一斑块,有机质、全氮、水解氮和有效磷均呈现从西北、东南两侧向中间区域逐渐增加的趋势,渐变性规律明显.枕头山南侧由于地形平坦,水源丰沛,各养分含量均相对较高.尧庙镇的有机质和水解氮均较缺乏,这是因为丘陵地区管理较粗放,有机质积累少.全区速效钾含量均很高,达到很丰富水平的耕地占 99.08%;有效磷含量也较丰富,达到丰富和很丰富水平的耕地占 83.82%,且主要集中在中间平原区;全氮达丰富和很丰富水平的耕地共占 55.85%;有机质和水解氮处于缺乏和很缺乏状态的耕地分别为 59.77%

和 71.99%.总体上,土壤养分高值区域处在中间平原区域,低值区域分布在西北和东南两侧的丘陵地区.

2.4 土壤养分空间格局的影响因素

2.4.1 成土母质 在研究区,土壤养分状况依次为:黄土状潮褐土>洪积褐土性土>黄土状石灰性褐土>红黄土状石灰性褐土.黄土状母质黄土层深厚,有较好的粘化层和钙积层,所发育的潮褐土土壤质地适中,水分良好,pH 适中,属于研究区最优质土壤,养分含量均显著地高于其他类型(P<0.05);而其所发育的石灰性褐土,水分较差,养分含量不及潮褐土.洪积母质具有流水作用搬运而来的沉积物,养分状况相对较好,多形成褐土性土.但是,红黄土

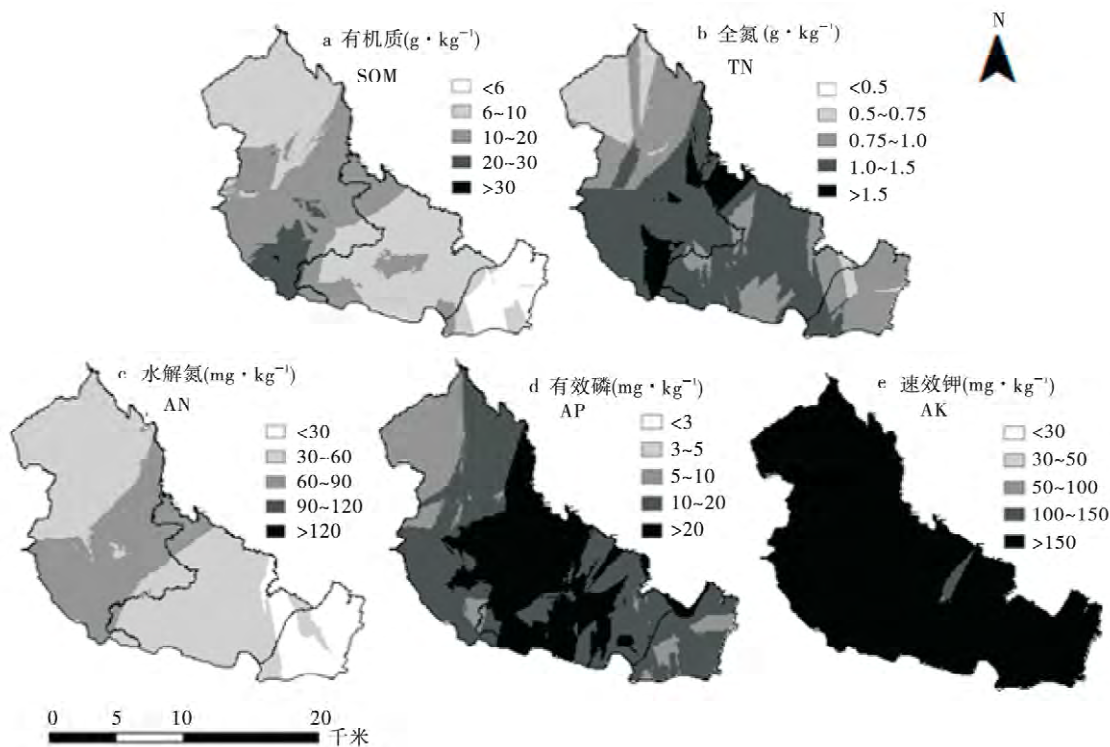


图 2 土壤养分空间分布

Figure 2 The spatial distribution of soil nutrients

表 3 不同成土母质各养分均值统计

Table 3 Mean statistics of soil nutrients of different parent materials

指标	黄土状石灰性褐土	红黄土状石灰性褐土	洪积褐土性土	黄土状潮褐土
有机质 SOM/(g · kg ⁻¹)	12.14 ± 0.5 ^{ab}	10.54 ± 0.76 ^b	14.28 ± 0.84 ^a	14.45 ± 0.89 ^a
全氮 TN/(g · kg ⁻¹)	1.12 ± 0.03 ^b	1.08 ± 0.05 ^b	1.2 ± 0.05 ^b	1.47 ± 0.09 ^a
水解氮 AN/(mg · kg ⁻¹)	51.56 ± 1.57 ^{bc}	48.03 ± 1.68 ^c	57.15 ± 2.88 ^b	74.93 ± 3.27 ^a
有效磷 AP/(mg · kg ⁻¹)	20.97 ± 1.18 ^b	22.81 ± 1.66 ^b	27.27 ± 2.57 ^{ab}	32.3 ± 3.92 ^a
速效钾 AK/(mg · kg ⁻¹)	228.52 ± 6.41 ^b	197.99 ± 6.53 ^c	239.44 ± 10.29 ^b	314.39 ± 19.46 ^a

用 LSD 法进行显著性分析,不同小写字母表示各养分指标在不同土壤质地类型间差异显著(P<0.05).

状石灰性褐土的水解氮与速效钾含量最低,与其他土壤类型差异较显著(P<0.05).红黄土状母质所经受的淋溶作用较强,养分流失较多,所以含量不及黄土状母质.

2.4.2 土壤质地 在研究区,土壤质地主要为中壤和轻壤,其中重壤所占比例较小.但是,重壤的土壤养分含量却最大,其次为中壤和轻壤(表 4),表明土壤质地越粘重,养分含量越高.在 3 种质地的土壤类

表 4 不同土壤质地各养分均值统计

Table 4 Mean statistics of soil nutrients of different soil textures

指标	轻壤	中壤	重壤
有机质 SOM/(g · kg ⁻¹)	9.61 ± 0.36 ^b	12.57 ± 0.51 ^b	15.89 ± 1.03 ^a
全氮 TN/(g · kg ⁻¹)	1.00 ± 0.03 ^b	1.19 ± 0.03 ^{ab}	1.30 ± 0.07 ^a
水解氮 AN/(mg · kg ⁻¹)	46.25 ± 1.88 ^b	54.29 ± 1.42 ^b	65.87 ± 3.73 ^a
有效磷 AP/(mg · kg ⁻¹)	19.82 ± 1.67 ^b	23.84 ± 1.11 ^{ab}	29.52 ± 3.95 ^a
速效钾 AK/(mg · kg ⁻¹)	228.40 ± 9.15 ^a	224.65 ± 5.61 ^a	246.99 ± 14.11 ^a

应用 LSD 法进行显著性分析,不同小写字母表示各养分指标在不同土壤质地类型间差异显著(P<0.05).

型中,速效钾不存在显著性差异.除速效钾外,在轻壤和中壤之间,其他 4 种养分差异性均不显著.但是,在重壤与轻壤、中壤之间,有机质、全氮、水解氮和有效磷含量均存在显著性差异($P < 0.05$).

2.4.3 地形地貌 研究区地形可归纳为平原和丘陵两种类型,其中大部分区域属于平原.从表 5 可

见,4 种地貌的土壤养分状况依次为:一级阶地>洪积扇>二级阶地>坡地,并且 4 种地貌的土壤养分均存在显著的差异性($P < 0.05$).在研究区,地貌呈现出由中间区域向西北东南两侧逐渐升高的趋势,这与各养分分布格局基本一致.可见,地形地貌是影响土壤养分格局的一个主要因素.

表 5 不同地貌各养分均值统计

Table 5 Mean statistics of soil nutrients of different landforms

指标	一级阶地	二级阶地	洪积扇	坡地
有机质 SOM/(g · kg ⁻¹)	17.21 ± 1.07 ^a	10.60 ± 0.32 ^b	15.18 ± 0.70 ^a	8.55 ± 1.47 ^b
全氮 TN/(g · kg ⁻¹)	1.44 ± 0.06 ^a	1.11 ± 0.03 ^b	1.20 ± 0.04 ^{bc}	0.90 ± 0.07 ^c
水解氮 AN/(mg · kg ⁻¹)	74.30 ± 2.23 ^a	47.28 ± 1.30 ^c	63.52 ± 2.27 ^b	36.62 ± 2.55 ^d
有效磷 AP/(mg · kg ⁻¹)	30.96 ± 3.33 ^a	22.58 ± 1.01 ^b	25.53 ± 2.43 ^{ab}	10.08 ± 11.52 ^c
速效钾 AK/(mg · kg ⁻¹)	285.99 ± 17.50 ^a	209.55 ± 4.84 ^c	244.11 ± 9.55 ^b	218.63 ± 10.00 ^{bc}

应用 LSD 法进行显著性分析,不同小写字母表示各养分指标在不同土壤质地类型间差异显著($P < 0.05$).

2.4.4 灌溉水源 研究区灌溉水源主要有河水、井水和水库 3 种类型.灌溉水源的养分状况依次为:多种灌溉水源(河水/井水、井水/水库)>单一灌溉水源(河水、井水、水库)>无灌溉水源,且三者之间存

在显著性差异($P < 0.05$) (表 6),表明灌溉水源充足的区域养分含量较高.在研究区,丘陵地区耕地无灌溉水源,其土壤养分最差,特别是有机质和水解氮.

表 6 不同灌溉水源各养分均值统计

Table 6 Mean statistics of soil nutrients of different source of irrigation water

指标	河水	井水	水库	河水/井水	井水/水库	无灌溉
有机质 SOM/(g · kg ⁻¹)	13.65 ± 0.77 ^b	13.06 ± 0.59 ^b	9.45 ± 0.30 ^c	22.19 ± 1.25 ^a	13.76 ± 0.75 ^b	5.84 ± 0.20 ^d
全氮 TN/(g · kg ⁻¹)	1.13 ± 0.05 ^b	1.17 ± 0.03 ^b	1.12 ± 0.06 ^{bc}	1.47 ± 0.10 ^a	1.43 ± 0.07 ^a	0.79 ± 0.07 ^c
水解氮 AN/(mg · kg ⁻¹)	58.08 ± 3.03 ^b	53.14 ± 1.42 ^{bc}	45.19 ± 1.57 ^c	78.62 ± 5.62 ^a	74.20 ± 2.64 ^a	30.37 ± 2.20 ^d
有效磷 AP/(mg · kg ⁻¹)	19.09 ± 1.83 ^{cd}	22.75 ± 1.21 ^{bc}	28.84 ± 3.04 ^b	25.94 ± 4.54 ^{bc}	39.02 ± 4.18 ^a	12.54 ± 1.43 ^d
速效钾 AK/(mg · kg ⁻¹)	235.52 ± 9.50 ^{bc}	218.27 ± 5.73 ^c	210.69 ± 10.97 ^c	264.96 ± 19.72 ^b	308.05 ± 22.95 ^a	205.19 ± 9.73 ^c

应用 LSD 法进行显著性分析,不同小写字母表示各养分指标在不同土壤质地类型间差异显著($P < 0.05$).

2.4.5 各地理因素对土壤养分空间格局的决定力分析 从表 7 可以看出,成土母质和灌溉水源条件是影响有机质和全氮分布的主要自然因素,且二者对有机质的影响更大一些.在 4 种影响因素之间,有机质和全氮均不存在显著性差异($P > 0.05$),可得出 4 种自然因素对这 2 种养分分布格局的影响程度差异不明显.除土壤质地外,其他各因素之间水解氮均不存在显著性差异,表明其主要受到成土母质($P_{D,H} = 0.35$)、地貌($P_{D,H} = 0.28$)和水源条件($P_{D,H} = 0.28$)的影响,而受土壤地质的影响较小($P_{D,H} = 0.07$).各地理因素对有效磷与速效钾空间分布的影响均较小.研究表明,在 4 种地理因素中,土壤质地

对各养分的影响程度均最小,相反,灌溉水源的影响力均较大.

表 7 各地理因素对土壤养分空间分布的决定力地理探测 $P_{D,H}$ 值结果

Table 7 Geographic detected power of geographical factors for spatial distribution of soil nutrients

养分指标	成土母质	土壤质地	地貌	灌溉水源
有机质 SOM	0.29	0.12	0.17	0.20
全氮 TN	0.08	0.06	0.10	0.12
水解氮 AN	0.35	0.07	0.28	0.28
有效磷 AP	0.04	0.03	0.06	0.13
速效钾 AK	0.11	0.01	0.09	0.12

3 讨论

自然和人为因素的综合影响,如地形、植被、气候、土地利用和管理措施等共同决定着土壤养分的空间分布格局和变化^[18],导致研究区土壤养分的空间分布格局呈现明显区域差异性.有机质、全氮、水解氮和有效磷均整体呈现出从东西两侧向中间区域逐渐增加的趋势.在中间平原区,以冬小麦-夏玉米或冬小麦-夏大豆等种植模式为主,需充足的灌溉水源与投入较多肥料,使其具有较高的土壤养分.但是,在丘陵区,以种植冬小麦为主,需较少肥料,导致该区土壤养分相对较低.所以,耕作方式、施肥等人为活动是影响养分分布格局的主要因素之一,导致研究区土壤速效养分呈现很强的空间变异性.

同时,土壤养分的空间异质性与成土母质、地形地貌、土壤质地和灌溉水源均存在密切的关系.成土母质影响着土壤的物理组成、化学性质和土壤成土过程,从而作用于土壤养分的累积和淋失过程^[10].地形地貌影响径流、土壤温度、土壤侵蚀和土壤形成,并影响着局部生境的土壤养分的空间差异^[19].在半干旱地区,水分是植被生长的最主要限制因素,充足的水分能促进植被的生长并能提高有机质与氮素的含量^[20].反之,较低的土壤含水量有利于有机质的分解,使水解氮含量也相应减少.在研究区,灌溉水源充足的区域或者长期灌溉的耕地,土壤养分含量较高,特别是有机质和水解氮,甚至土壤养分高值主要出现在河流两岸的耕地,并沿河流呈带状分布^[21-22].研究区成土母质、地形地貌对土壤养分的空间变异的影响主要表现为,黄土状物质长期由两边丘陵区洪水冲积到中间平原区域,形成从东西两侧到中间地区各养分含量逐渐增加的分布格局.此外,土壤质地对各养分影响主要表现为土壤质地越重,其养分含量越高,这与黄绍文等^[23]研究的结论基本一致.这是因为重壤含量较高,保水性好,有利于有机质的积累;反之透气性越好,有机质、全氮易流失.

尽管土壤养分的空间异质性受到很多因素的影响,但不同区域土壤养分的主要影响因素也不尽相同.如赵莉敏等^[24]针对太湖地区研究结果表明,地形是影响速效磷的主导因素.宋轩等^[25]研究表明海拔是黄水河小流域土壤养分分布的主要影响因素.

然而,王宗明等^[26]通过对吉林省德惠市的土壤养分研究表明,海拔并不是影响土壤养分空间分布差异的主要因素.

近年来,地理探测器作为一种探测某种要素空间格局成因和机理的重要方法被广泛应用,它能有效计算出空间分布格局的影响因素的决策力大小^[17,27].本研究中,地理探测器模型对土壤养分空间格局形成中影响因素的贡献力结果表明,成土母质和灌溉水源条件是影响有机质和全氮分布的主要自然因素.水解氮主要受到成土母质、地貌和水源条件的影响,而受土壤质地的影响较小.但是,成土母质、土壤质地、地形地貌和灌溉水源对有效磷与速效钾空间分布的影响均较小.在4种地理因素中,土壤质地对各养分的影响程度均最小,灌溉水源的影响力均较大.

4 结论

1) 尧都区西南部褐土耕层主要养分空间分布差异明显,速效钾表现为单一斑块,有机质、全氮、水解氮和有效磷均呈现从西北、东南两侧向中间区域逐渐增加的趋势.

2) 人为管理措施是形成尧都区西南部褐土耕层土壤速效养分空间分布格局的主要影响因素;灌溉水源条件对各养分影响均较大,表明了水分对半干旱地区土壤养分含量的严重制约性;成土母质和地形地貌对各养分影响较大;土壤质地对各养分影响均相对较小.

3) 不同养分空间分布格局具有差异,应根据养分等级分布状况进行指导性施肥,尤其是有机质与水解氮较为缺乏,应增加氮肥的施用量,提高肥料利用率,实现精准农业的可持续发展.

参考文献

- [1] 胡艳霞,周连第,魏长山,等.水源保护地土壤养分空间变异特征及其影响因素分析[J].土壤通报,2013,44(5):1084-1191.
- [2] 雷俊山,尹炜.丹江口库区入库河口土壤养分空间变异研究——以青塘河河口为例[J].水生生态学杂志,2016,37(3):13-18.
- [3] 王雪梅,柴仲平,武红旗.典型干旱荒漠绿洲区耕层土壤养分空间变异[J].水土保持通报,2016,36(1):51-

- 56.
- [4] 李启权,王昌全,张文江,等.基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测[J].应用生态学报,2013,24(2):459-466.
- [5] 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.
- [6] LIU D,WANG Z,ZHANG B,et al. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region,northeast China[J]. Agric Ecosyst Environ,2006,113:73-81.
- [7] PARK S J,VLEK P L G. Environmental correlation of three dimensional spatial soil variability;a comparison of three adaptive techniques[J]. Geoderma,2002,109:117-140.
- [8] FACHINELLI A,SACCHI E,MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soil [J]. Environmental Pollution,2001,114(3):313-324.
- [9] KUMAR S,SINGH R P. Spatial distribution of soil nutrients in a watershed of Himalayan landscape using terrain attributes and geostatistical methods[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(6):143-153.
- [10] 张建杰,张强,杨治平,等.山西临汾盆地土壤有机质和全氮的空间变异特征及其影响因素[J].土壤通报,2010,41(4):839-844.
- [11] 朱菊兰,刘淼,张阳,等.浑河太子河流域地形和土地利用对表层土壤养分空间变异的影响[J].生态学杂志,2016,35(3):621-629.
- [12] 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 [J]. International Journal of Geographical Information Science,2010,24(1):107-127.
- [13] 于婧文.褐土区乡镇级土壤养分的时空变异研究[D].太原:山西大学,2010.
- [14] 韩志卿,张电学,王秋兵,等.不同施肥制度下冀东褐土肥力演化的主成分分析[J].土壤通报,2008,39(2):254-259.
- [15] 韩志卿,韩志才,张电学,等.冀东地区褐土养分资源评价与管理对策[J].中国农学通报,2011,27(32):236-241.
- [16] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:65-152.
- [17] 朱鹤,刘家明,陶慧,等.北京城市休闲商务区的时空分布特征与成因[J].地理学报,2015,70(8):1215-1228.
- [18] LIU Y,GAO P,ZHANG L Y,et al. Spatial heterogeneity distribution of soil total nitrogen and total phosphorus in the Yaoxiang watershed in a hilly area of northern China based on geographic information system and geostatistics [J]. Ecology and Evolution,2016,6:6807-6816.
- [19] XU G C,LI Z B,LI P,et al. Spatial variability of soil available phosphorus in a typical watershed in the source area of the middle Dan River,China [J]. Environ Earth Sci,2014,71:3953-3962.
- [20] 刘志鹏.黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [21] 李润林,姚艳敏.潜江市土壤养分空间分布及其水系对它的影响[J].土壤通报,2015,46(2):368-374.
- [22] 曹宏杰,王立民,罗春雨,等.三江平原地区土壤养分空间分布特征[J].安徽农业科学,2013,41(29):11670-11675,11679.
- [23] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等.粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系[J].中国农业科学,2002,35(3):297-302.
- [24] 赵莉敏,史学正,黄耀,等.太湖地区表层土壤养分空间变异的影响因素研究[J].土壤,2008,40(6):1008-1012.
- [25] 宋轩,李立东,寇长林,等.黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系[J].应用生态学报,2011,22(12):3163-3168.
- [26] 王宗明,张柏,宋开山,等.东北平原典型农业县农田土壤养分空间分布影响因素分析[J].水土保持学报,2007,21(2):73-77.
- [27] 胡丹,舒晓波,尧波,等.江西省县域人均粮食占有量的时空格局演变[J].地域研究与开发,2014,33(4):157-162.
- [28] 王慧峰,高静,王瑞苗,等.神刘村汾河灌区耕层土壤养分空间变异性研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2013,3(6):71-76
- [29] 王祎,蔡立群,张兴嘉,等.清水县耕层土壤主要养分空间分布与变异研究[J].甘肃农业大学学报,2012,47(5):121-128.

(责任编辑 胡文忠)