

# 植被恢复对毛乌素沙地土壤 pH 和养分含量的影响

袁媛<sup>1</sup>, 张鹤<sup>1</sup>, 武杼华<sup>1</sup>, 王钰<sup>1</sup>, 毕博远<sup>1</sup>, 韩凤朋<sup>1,2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中科院水利部水土保持研究所, 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为明确陕北毛乌素沙地不同植被恢复后土壤 pH 和养分含量差异及其空间分布情况, 本研究使用经典统计和地统计方法, 定量研究了该研究区域内不同植被恢复后土壤的 pH、有机碳 (SOC)、全磷 (TP)、全氮 (TN) 和铵态氮 (AN) 差异及其空间变异特征。结果表明, 不同植被恢复后, 除有机碳外, 其它各个指标呈现出大致相似的变化规律, 4 种植被的恢复效果为农地 > 林地 > 草地 > 灌木; pH 的变异系数是 8.34%, 属于弱变异, 块金系数是 9.98%, 具有强空间相关性; SOC、TP、TN 和 AN 变异系数分别是 86.44%、31.92%、87.76% 和 58.58%, 属于中等变异, 块金系数分别是 40.62%、49.82%、49.94% 和 40.55%, 具有中等空间相关性; 半方差函数最佳拟合模型除 AN 是球面模型外, 其它指标都是指数模型; 各种养分含量总体上均表现出从东北往西南方向递减的趋势。

**关键词:** 毛乌素沙地; 不同植被; 土壤养分; 空间变异

**中图分类号:** S153    **文献标识码:** A    **文章编号:** 0564-3945(2021)01-0148-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2020040301

袁媛, 张鹤, 武杼华, 王钰, 毕博远, 韩凤朋. 植被恢复对毛乌素沙地土壤 pH 和养分含量的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 148 - 156

YUAN Yuan, ZHANG He, WU Zhu-hua, WANG Yu, BI Bo-yuan, HAN Feng-peng. Effects of Vegetation Restoration on Soil pH and Nutrient contents in the Mu Us Sandland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 148 - 156

毛乌素沙地是中国的四大沙地之一, 地处半干旱区的多种生态过渡带, 具有独特的生态地理景观。土地沙化导致了土地生产力的严重衰退, 加剧了整个生态环境的恶化, 是经济和社会可持续发展的障碍。植被作为生态系统的主体和初级生产者, 可以为沙漠提供必需的物质和能量, 同时又能改善生态环境, 从而服务于沙漠生态系统<sup>[1]</sup>。在脆弱的生态环境中, 土壤与植被之间相互作用、相互制约、相互影响。土壤可以为植被的生长提供必要的物质基础, 同时植被影响着土壤的养分积累、分布和循环。植被对土壤的影响主要表现在植物的枯枝落叶和死亡根系产生的有机质及其根系分泌物对土壤理化性质的影响, 植被的种植可以涵养沙漠水源、减少水土流失从而使养分固存。植被还有对土壤营养元素富集和再分配的作用<sup>[2]</sup>。在土壤养分的循环过程中, 碳、氮、磷元素作为生命元素, 从而驱动着其它养分元素的循环与转化, 是养分元素循环的核心<sup>[3-4]</sup>。

为了改善我国的沙漠化环境, 我国已经大面积在沙漠区进行了人工林种植, 且已有研究表明<sup>[5-8]</sup>, 植被恢复对沙漠化土壤有一定的改善作用, 可以一定程度上改善土壤理化性质。苏静等<sup>[9]</sup>研究发现植被恢复改善了黄土高原侵蚀区的土壤环境, 其中土壤有机碳和全氮含量显著增加。何群等<sup>[10]</sup>研究了不同的植被恢复模式对土壤养分的影响, 得出不同的人工植被恢复模式在不同程度上提高了土壤有机质、全氮、速氮和速磷等的含量。为了更直观的描述研究区内不同的植被恢复模式对土壤化学性质的影响分布情况, 本文借助地统计学方法来进行分析研究。

随着 20 世纪 70 年代地统计学的发展, 地统计学首先被广泛应用于研究土壤物理性质在空间上的变异, 后来逐渐被用于土壤化学性质的空间变异情况。地统计学已经被证明是分析土壤特性空间分布特征及其变异规律的最为有效的方法之一, 它能够

**收稿日期:** 2020-04-03; **修订日期:** 2020-09-26

**基金项目:** 国家重点研发计划 (2017YFC0504504, 2016YFA0600801)、国家自然科学基金项目 (41471437) 以及中国科学院“西部青年学者”项目 (XAB2016A04) 共同资助

**作者简介:** 袁媛 (1995-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境科学研究。E-mail: 2585281352@qq.com

\***通讯作者:** E-mail: hanxiangzi007@163.com

揭示随机变量在空间上的分布特征, 解释自然过程和人为过程对变量空间变异的影响, 从而弥补了传统统计学不能量化, 具体化, 且费时耗力的不足<sup>[11-13]</sup>。将地统计学与 GIS 技术结合, 将采集的有限的土壤样本, 利用空间内插的方法, 掌握区域土壤的养分状况, 节省人力物力财力, 从而更好地推动沙漠化恢复的工作进程<sup>[14]</sup>。

目前国内将地统计学方法应用于土壤学研究的越来越多, 但大多数研究都是在大范围、如黄土高原地区或县域进行<sup>[15-17]</sup>。因此, 本文应用经典统计和地统计方法, 研究陕西省神木市生态协会毛乌素治沙造林基地不同植被恢复后表层土壤 pH、碳、氮和磷含量差异及其空间变异情况, 以更加精细、直观地表达植被恢复区域内土壤养分空间分布差异, 评价不同植被恢复改良沙地土壤的效果。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究于 2019 年 8 月在陕西省神木市生态协会毛乌素治沙造林基地进行, 该地处于毛乌素沙地南缘属于典型的农牧交错带。平均海拔为 1274 m, 年平均气温 6.8 °C。最低和最高温分别在 1 月和 7 月, 年降雨量 250 ~ 400 mm, 主要集中在 7 ~ 9 月, 占全年降水量的 60% ~ 65%; 最大日降水量是 141.7 mm, 占年降水量的 34.1%, 年实际蒸发量大约是年降水量的 5 倍。土壤类型主要是风沙土, 土地利用类型主要包括农田、林地 (15 年)、灌木 (15 年) 和草地 (15 年), 各土地利用类型地形变化及植被分类如图 1 所示; 其中, 农地的表层土壤经过砒砂岩与沙土混合的改良。

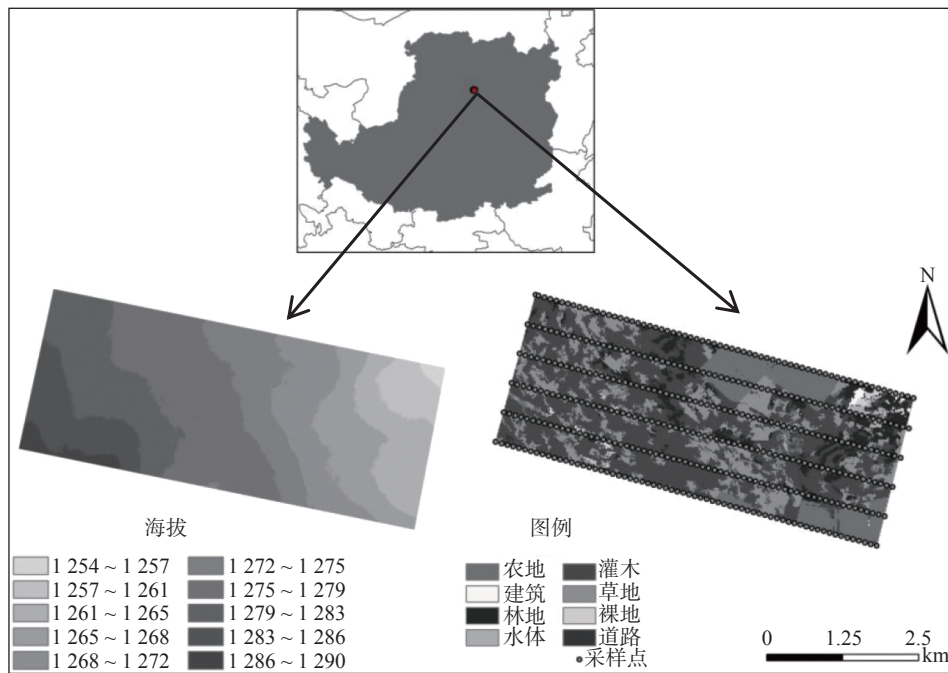


图 1 研究区海拔、采样点和土地利用类型

Fig.1 Altitude, sampling points and land use types in the study area

### 1.2 样点布设与采样

研究区范围为  $6.5 \times 3 \text{ km}^2$ 。将研究区域划分为  $100 \text{ m} \times 500 \text{ m}$  网格, 在每一网格节点布置 1 个采样点, 共 396 个采样点。遇有不能采样的点位借助手持 GPS, 用最近的相邻区域代替。采样时每个采样点以网格节点为圆心、在半径 10 m 的范围内选 5 个点位, 除去地表枯落物后用直径为 4 cm 的土钻取样, 采样深度为 0 ~ 20 cm; 5 个点位采集的土样均匀混合为该节点土样。一共采集 396 份土样, 其中草地

土样 100 个、灌木土样 190 个、农地土样 61 个以及林地土样 42 个, 裸地和建筑用地土样一共 3 个。采集的土样带回实验室自然风干, 过 1 mm 筛备用。

### 1.3 室内分析

土壤容重采用环刀法<sup>[18]</sup>, 土壤 pH 采用 pH 计法, 土壤有机碳 (OC) 含量采用 Walkley-Black 法<sup>[19]</sup>, 总氮 (TN) 采用凯氏定氮法<sup>[20]</sup>, 总磷 (TP) 采用钼锑钒比色法<sup>[21]</sup>测定; 铵态氮 ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 经  $1 \text{ mol L}^{-1}$  KCl 提取、在流动分析仪上进行比色分析<sup>[22]</sup>。

## 1.4 研究方法

**1.4.1 经典统计分析方法** 采用经典统计学参数如最大值、最小值、平均值、标准差和变异系数等描述研究区土壤养分数据的统计特征；数据进行空间分析前应先进行特异值处理和正态分布检验<sup>[23]</sup>。特异值是指在土壤采样和样品测定的过程中因操作不当导致的明显偏离于其它所属样本大小的数值<sup>[24]</sup>。用 3Q 阈值法检验数据特异值，即平均值加减 3 倍标准差分别代替异常值的最大值和最小值<sup>[25]</sup>。采用偏度和峰度判断数据是否符合或近似符合正态分布，当它们都接近于 0 时，认为数据服从或基本服从正态分布。

**1.4.2 空间结构特征分析方法** 半变异函数：为土壤变量的空间分析提供了一个定量的工具，可以将土壤某一性质的变异与成土因子和成土过程联系起来，是进行土壤过程的预测和模拟的有效途径<sup>[26]</sup>。它是描述空间变量的关键函数，能描述变量的空间变异结构，反映不同距离观测值之间的变化<sup>[27-28]</sup> 即：

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

式中， $r(h)$  是间距为  $h$  的半变异函数值，在一定范围内随  $h$  的增加而增大。通过变异函数及曲线图可以得到 5 个重要参数，即变程 ( $R$ )、基台值 ( $C_0 + C$ )、块金值 ( $C_0$ )、决定系数 ( $R^2$ ) 和残差 ( $RSS$ )。

克里金插值法：克里金 (Kriging) 插值实质上

是利用区域化变量的测定数据和变异函数的结构特点，对未知点进行线性无偏最优估计，是目前地统计学应用最广泛的最优内插法：

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n a_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中， $Z(x_0)$  是  $x_0$  点上的最优内插估计值， $Z(x_i)$  是在点  $x_0$  附近的  $n$  个观测点的实测值，其中  $a_i$  表示与  $Z(x_i)$  位置有关的权重系数，它由克里金方程组求得。

## 1.5 数据处理

Excel 2010 进行基本数理特征统计和制作柱状图；SPSS 22 进行最小显著性检验 (LSD)；Minitab 19 进行数据 BOX-COX 转换使数据服从或基本服从正态分布；GS+ 9.0 构建最优半变异函数理论模型及参数，获取半变异函数图；ArcGIS 10.2 地统计分析模块对土壤 pH 和养分进行普通克里金插值，绘制空间分布图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被土壤理化性质差异

改变土地利用方式是人为对土壤最直接的干预<sup>[29]</sup>，从表 1 中可以看出不同的土地利用方式下各指标存在显著差异。土地利用方式由于建筑和裸地样点占比太小不具代表性故不予分析，本文分析 4 种 (农地、林地、草地、灌木) 植被恢复后土壤 pH、容重和养分含量差异。

表 1 不同植被下土壤的理化性质差异

Table 1 The physical and chemical properties of soil under different vegetation

土地利用 Land use	样本数 Sample number	pH	容重 Bulk density (g cm <sup>-3</sup> )	有机碳 Soil organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg kg <sup>-1</sup> )
草地	100	7.18 ± 0.21 b	1.54 ± 0.06 a	1.88 ± 1.49 a b	0.22 ± 0.08 b	0.15 ± 0.13 a	1.34 ± 0.52 c
灌木	190	7.07 ± 0.13 c	1.55 ± 0.08 a	1.55 ± 1.38 b c	0.22 ± 0.06 b	0.12 ± 0.01 a	1.28 ± 0.56 c
农地	61	8.26 ± 0.31 a	1.43 ± 0.11 b	1.24 ± 0.55 c	0.25 ± 0.07 a	0.14 ± 0.06 a	2.58 ± 1.28 a
林地	42	7.27 ± 0.22 b	1.54 ± 0.06 a	2.15 ± 1.97 a	0.25 ± 0.10 a	0.14 ± 0.10 a	1.77 ± 1.16 b

注：不同字母表示同一指标不同植被恢复下差异显著性 ( $P < 0.05$ )。

pH 和容重是土壤的基本性状，pH 对土壤养分影响明显<sup>[30]</sup>。不同土地利用类型土壤 pH、容重测定结果如表 1 所示。由表 1 可知，在 4 种土地利用类型中，农地土壤的 pH 值显著高于林地、草地和灌木丛地，林地和草地间 pH 没有显著差异。同样，农地土壤容重明显低于林地、草地和灌木丛地，这与李少华<sup>[31]</sup>的研究结果一致；且在林地、草地和灌木丛地之间没有表现出明显的差异，这可能是由于这 3 种土地利用类型受人为干扰较小。总之，农地土壤

的酸碱度、容重和林地、草地和灌木丛地差异较为明显，而林地、草地和灌木丛地之间差异不明显。

从表 1 可以看出 4 种植物恢复后各土壤养分含量值均较低。4 种植物恢复后 TN 含量有波动变化，其中草地含量最高、灌木恢复下含量最低但是所有植被间并无显著差异；SOC、TP 和 AN 在 4 种植物恢复后都存在显著差异 ( $P < 0.05$ )，其中 AN 含量表现出农地显著高于林地、草地和灌木 ( $P < 0.05$ )，灌木地呈现出最低值；SOC 含量则表现出相反的趋

势, 林地显著高于灌木和农地 ( $P < 0.05$ ), 农地呈现出最低值; 4 种植被恢复后 TP 含量呈现出农地和林地显著高于草地和灌木的趋势。由表 1 中平均值  $\pm$  标准差可以看出, SOC、TP、TN 和 AN 的含量都呈现出含量越高, 标准差越大的现象。不同植被恢复模式下除 SOC 外, 其它各个指标呈现出大致相似的规律, 总体来看 4 种植被的恢复效果呈现出农地 > 林地 > 草地 > 灌木丛地的趋势。分析不同植被恢复后毛乌素沙地的土壤养分含量变化, 并参照全国第二次土壤普查的土壤养分分级标准<sup>[32]</sup> 可知, 4 种植被类型下, 除 TP 处于五级水平外, SOC、TN 和 AN 都处于六级水平, 表明不同植被类型恢复虽对土壤养分含量有一定程度的提高, 但是毛乌素沙地土壤养分含量仍处于低或极低水平。

## 2.2 区域土壤养分典型统计分析

利用经典统计学研究土壤养分数据的统计特征, 主要包括最大值、最小值、平均值、标准差、变异系数以及偏度和峰度。其中 pH 基本服从正态分布, SOC 和 TP 经对数转换后服从正态分布, TN 和 AN 经 BOX-COX 转换后近似服从正态分布。

植被恢复后土壤养分含量描述性变化如表 2 所示, pH 的变化范围在 6.13 ~ 8.85, 平均 7.308, 略偏碱性; SOC 的含量范围在 0.192 ~ 9.198 g kg<sup>-1</sup>, 平均 1.667 g kg<sup>-1</sup>, 可以得出低含量的样点占大多数; TP 含量变化范围在 0.090 ~ 0.653 g kg<sup>-1</sup>, 平均 0.231 g kg<sup>-1</sup>; TN 含量变化范围在 0.011 ~ 0.678 g kg<sup>-1</sup>, 平均 0.135 g kg<sup>-1</sup>; AN 含量变化范围在 0.349 ~ 5.850 mg kg<sup>-1</sup>, 平均 1.559 mg kg<sup>-1</sup>。

表 2 土壤养分的描述性统计  
Table 2 Descriptive statistic of soil nutrients

项目 Item	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变换类型 Type
pH	8.85	6.13	7.31	0.61	8.34	0.66	-0.49	None
有机碳 (g kg <sup>-1</sup> )	9.198	0.192	1.667	1.441	86.44	0.475	0.615	Log10
全磷 (g kg <sup>-1</sup> )	0.653	0.090	0.231	0.074	31.92	-0.043	0.071	Log10
全氮 (g kg <sup>-1</sup> )	0.678	0.011	0.135	0.119	87.76	0.093	0.881	BOX-COX(-0.23)
铵态氮 (mg kg <sup>-1</sup> )	5.850	0.349	1.559	0.913	58.58	0.077	0.5	BOX-COX(-0.4)

变异系数  $CV(\%)$  可从整体上反应测定值的变异程度<sup>[33]</sup>。根据变异系数将变异程度划分为三级:  $CV(\%)$  小于 10% 为弱变异;  $CV(\%)$  在 10% ~ 100% 之间是中等变异;  $CV(\%)$  大于 100% 为强变异<sup>[34-35]</sup>。由表 2 可以看出, 各指标变异系数由大到小依次为: TN > SOC > AN > TP > pH。其中 pH 的变异系数为 8.34%, 属于弱变异, SOC、TP、TN 和 AN 的变异系数分别是 86.44%、31.92%、87.76% 和 58.58%, 都属于中等变异。

## 2.3 区域土壤养分空间分布特征

半变异函数可以描述土壤理化性质的空间结构, 是地统计学特有的工具, 也是进行地统计学分析的基础。常用的半变异函数的理论模型有球面、高斯、指数和线性等模型。利用 GS+ 软件绘制实际半变异函数曲线图 (图 2), 根据决定系数 ( $R^2$ ) 越接近 1、残差 ( $RSS$ ) 越接近 0 为原则<sup>[36]</sup>, 得土壤的 pH、SOC、TP 和 TN 的最佳半变异函数模型为指数模型, AN 最佳模型为球面模型。表 3 中可以看出, pH、SOC、TP、TN 和 AN 各个指标拟合模型的决定系数分别是 0.983、0.878、0.904、0.893 和 0.843, 都接近 1; 所有残差基本接近于 0。

由表 3 知, pH、SOC、TP、TN 和 AN 的块金值 ( $C_0$ ) 分别为 0.046、0.034、0.01385、0.0435 和 0.01116, 基台值 ( $C_0 + C$ ) 分别为 0.461、0.0837、0.0278、0.0871 和 0.02752。其中块金值 ( $C_0$ ) 是由随机因素包括实验误差和小于实验取样尺度上施肥、作物、管理水平等引起的变异; 结构方差 ( $C$ ) 是由非人为因素 (空间自相关部分) 包括成土母质、地形、气候等引起的变异; 基台值 ( $C_0 + C$ ) 是 (半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值), 表示系统内总的变异<sup>[37]</sup> (具体以图 2 中 AN 半变异函数图为例)。各指标的基台值都为正值, 说明存在着由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应。

块金系数 ( $C_0 / C_0 + C$ ) 表示系统变量的空间相关性程度, 若比值小于 25%, 则说明变量变异程度小, 具有强烈的空间相关性, 主要由结构因素引起的变异; 若比值在 25% ~ 75% 之间时, 则说明变量具有中等变异, 具有中等的空间相关性, 变异受结构因素和随机因素共同影响; 若变异大于 75%, 则说明变量变异程度强, 变量空间相关性弱, 变量的变异受随机因素影响大<sup>[38-40]</sup>。从表 3 可知, pH、

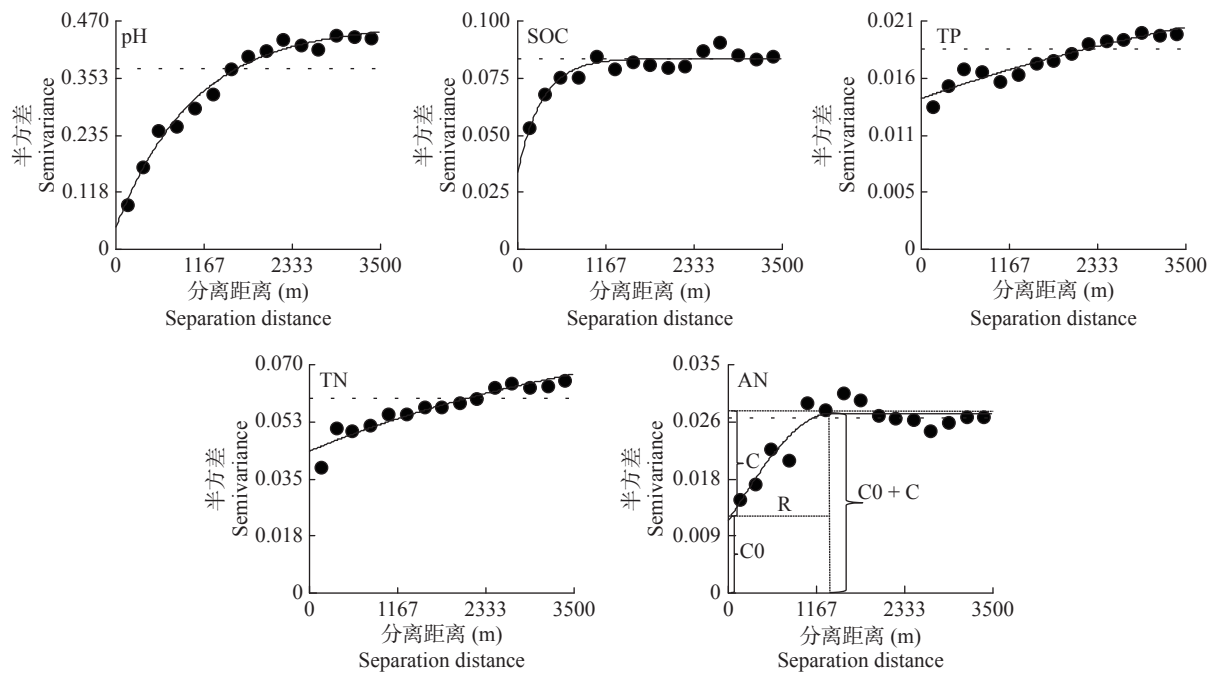


图 2 土壤养分半变异函数图  
Fig.2 Semi-variogram of soil nutrients

表 3 土壤养分的半变异模型类型及其参数值  
Table 3 Semi-variation model types and parameters of soil nutrients

项目 Item	理论模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金系数 Nugget/Sill	变程 (m) Range	决定系数 $R^2$	残差 RSS
pH	指数	0.0460	0.4610	9.98%	3114	0.983	2.790E-03
有机碳	指数	0.0340	0.0837	40.62%	975	0.878	1.408E-04
全磷	指数	0.0139	0.0278	49.82%	5481	0.904	5.574E-06
全氮	指数	0.0435	0.0871	49.94%	4487	0.893	7.655E-05
铵态氮	球面	0.01116	0.02752	40.55%	1350	0.843	4.892E-05

SOC、TP、TN 和 AN 的块金系数 ( $C_0 / C_0 + C$ ) 分别是 9.98%、40.62%、49.82%、49.94% 和 40.55%。pH 的变异值小于 25%，故主要是由结构因素引起的，变异程度小，具有强烈空间自相关性；而 SOC、TP、TN 和 AN 的块金系数都在 25%~75% 之间，表明两种因素对变异有共同影响，具有中等空间相关性。

变程 ( $R$ ) 为土壤属性空间自相关范围的大小，它与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤养分的各种生态过程作用有关，在变程范围之内，即大于采样间隔，变量具有空间自相关特性，反之则不存在<sup>[41]</sup>。从表 3 可以看出，TP 和 TN 的变程最大，分别是 5481 和 4487 m；其次是 pH、AN 和 SOC 分别为 3114、1350 和 975 m。所有指标的采样距离都在变程范围内，说明各个指标都具有空间自相关特性。

由 ArcGIS 地统计分析模块中克里金插值，绘制土壤养分空间分布图 (图 3)。从图中可以看出 pH 值明显呈现出在农地区域偏碱性，pH 值基本在 8~9 之间，而林地、草地和灌木丛地区域 pH 值基本都

在 6~8 的范围内，但是林地、草地和灌木丛地三种土地利用类型由于错综复杂分布，故并不能在图中进行明显区分，这一插值结果与上述不同植被类型下 pH 值的分析结果相吻合，从插值图中可以更直观的看出 pH 值的空间区域性分布特征以及不同植被区域间 pH 的情况。土壤 SOC、TP、TN 和 AN 含量整体偏低，图中 SOC 含量较高的区域主要分布在东北方向的林地和中间的草地及灌木区域，农地和西南方向的灌木和草地处于低值。全磷含量分布较为均匀，较高的区域分布在部分农地、林地和草地；从图中基本可以看出全氮含量基本整体偏低，没有较为明显的高值区域；由表 1 中数据与全国第二次土壤普查土壤养分数据<sup>[32]</sup> 对比得铵态氮含量整体呈现出严重偏低的水平，根据插值区域和表 1 中不同植被恢复后 AN 含量的最小差异显著性 (LSD) 分析得出，AN 含量呈现出在农地和部分林地区域高于其它植被恢复区。从图 3 的 5 个插值图中可以更加直观的理解不同植被下各个指标的差异及分布情况，

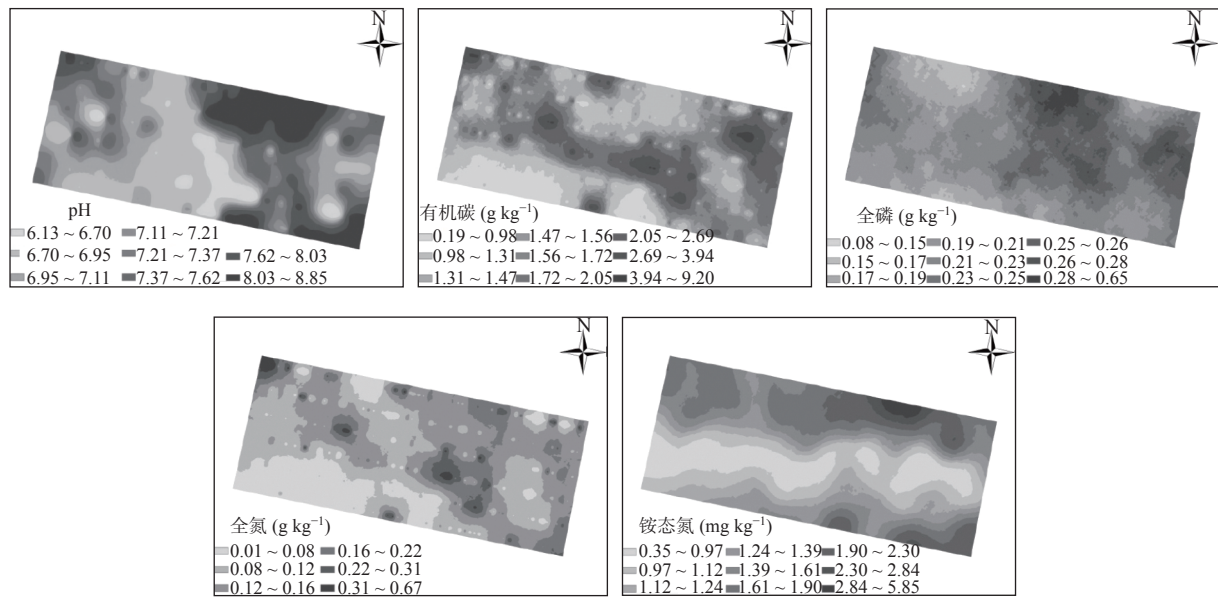


图 3 土壤养分空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil nutrients

将插值图和表 1 中的差异显著性分析相结合, 更清晰的表达不同植被间化学性质的差异, 可以更直观的描述不同的植被类型对土壤化学性质的影响。

从 5 个插值图中可以看出, 研究区的西南方向, 养分含量都是严重偏低的, 各个指标的分布模式基本都呈现出从东北方向往西南方向递减的趋势。综合分析, 植被恢复一定程度上提高了沙地养分含量, 目前看来本地区的沙漠化恢复农地和林地效果较优、草地和灌木略差。

### 3 讨论

由最小显著差异法 (LSD) 分析得, 4 种植被类型下的 pH 和容重存在一定的差异, 其中表现为农地的 pH 显著高于林地、草地和灌木, 这与图 3 空间分布图得出 pH 值呈现出在农田区域偏碱性, 平均 pH 值大于 8, 显著高于其它三种植被类型相吻合, 出现这种现象主要是因为农田区域的表层土经砒砂岩改良, 而砒砂岩呈碱性<sup>[42]</sup>, 所以改变了农田的酸碱度, 使农田偏碱性, 且由于耕作翻耕减少了表层枯落物的积累所致; 而其它植被类型几乎不受人干扰、掉落的枯枝落叶积累在表层并分解产生腐殖酸、从而使土壤呈现中性或偏酸性<sup>[43-44]</sup>; 从图 3 中可以看出在部分的灌木和草地区域出现了 pH 的低值区, 分析发现 pH 值偏低的区域表层枯落物层较厚且植被覆盖度较高。苏爱玲的研究得高温高湿的条件有利于微生物对枯落物的分解, 而枯落物分解会产生酸性物

质影响表层土壤的酸性<sup>[45-46]</sup>, 同时由于植被覆盖度高, 根系较发达, 根系有机酸的分泌也影响了表层土壤的酸性<sup>[47]</sup>。而容重则表现出相反的特点, 农地的容重在 4 种土地利用类型中表现出最低值, 明显的低于其它三种植被类型, 这主要是因为农地表层土经常种植翻耕, 致使表层土疏松, 而其它三种植被类型区域几乎不受人干扰。

根据土壤 SOC、TP、TN 和 AN 的差异性分析和图 3 空间分布图得, 农地的 SOC 含量显著低于林地和草地, 这一结果与 pH 值相吻合, 由于农地受人干扰较大长期耕作、过度利用, 减少了表层枯落物的累积, 从而减少了表层的碳累积导致 SOC 值低于其它植被类型<sup>[48]</sup>。而林地和草地值较高这可能是由于自然环境下, 很少受人干扰, 枯落物掉落累积所致以及草地根系分解而在地下积累<sup>[49-51]</sup>。这一结果与 Wang 等<sup>[52]</sup>的研究结果相似, 农地转化为草地和灌木丛后 SOC 含量增加。由表 1 中差异显著性分析结果知, 农地和林地的 TP 含量显著高于草地和灌木丛地, 且从图 3 中可以看出两块农地的磷含量之间存在一定的差异, 这可能是由施肥水平不同引起的<sup>[53]</sup>。TN 含量在 4 种植被恢复后虽然有波动变化, 但是不同植被类型间并没有表现出显著差异; 根据差异显著性分析知 AN 含量呈现出农地显著高于林地、草地和灌木丛地的结果, 这主要是因为农地种植过程中施加氮肥所致, 但是这与全国第二次土壤养分调查结果相比仍然处于极低水平, 这是由于铵态氮是植

物生长直接吸收利用的营养元素, 现在沙漠化仍处于恢复阶段, 几乎铵态氮都供植物生长所利用<sup>[54]</sup>。

经土壤养分区域典型统计分析和空间分布特征研究知, pH 的变异系数为 8.34%, 属于弱变异, 现有很多研究表明土壤 pH 值变异性较低, 赖壮杰<sup>[55]</sup>基于福建省顺昌市毛竹经营区土壤养分空间变异的研究, pH 值为 6.49% 属于弱变异。这表明土壤 pH 值是一个较稳定的因素。SOC、TP、TN 和 AN 的变异系数都属于中等强度变异, 这与前人的研究结果相一致<sup>[56]</sup>, 表明这些指标受随机因素和人为因素的共同影响。用 4 种半变异函数模型分别对土壤 pH、SOC、TP、TN 和 AN 进行拟合得, 土壤 pH、SOC、TP 和 TN 的最佳半变异函数模型是指数模型, AN 最佳拟合球面模型。pH、SOC、TP、TN 和 AN 各个指标的最佳理论模型的决定系数分别是 0.983、0.878、0.904、0.893 和 0.843, 都接近 1、残差都趋向于 0, 表明指数模型相对于其它三种模型可以更好地反映区域空间土壤 pH、SOC、TP 和 TN 的相关性情况, 使研究结果更准确, 使在变程范围内获得更加准确的空间相关性; 而球面模型对于 AN 的空间相关更加拟合, 更能准确反映变程范围内 AN 的空间结构特征<sup>[57]</sup>。

pH 的块金系数 ( $C_0 / C_0 + C$ ) 为 9.98%, 表明变异程度小, 具有强烈的空间自相关, 主要是由结构因素包括成土母质、地形、气候等引起的变异; SOC、TP、TN 和 AN 的块金系数分别为 40.62%、49.82%、49.94% 和 40.55%, 都属于中等空间相关性, 是由随机因素包括实验误差和小于实验取样尺度上施肥、作物、管理水平等和结构因素包括成土母质、地形、气候等引起的变异<sup>[33-34]</sup>。变程的大小可以反映土壤属性空间自相关范围的大小, 如果采样点在变程范围之内, 则表明变量具有空间自相关特性<sup>[58]</sup>。本研究区域 TP 和 TN 的变程最大, 分别是 5481 和 4487 m; 其次是 pH、AN 和 SOC 分别为 3114、1350 和 975 m。表明全磷和全氮的分布较稳定, 不易在小范围内移动, 这与周稀等<sup>[59]</sup>的研究结果相一致。

## 4 结论

本文首先研究了不同植被恢复后表层土壤 pH、容重、SOC、TP、TN 和 AN 在不同植被类型下的差异显著性, 结果表明 4 种植被类型下土壤的 pH、容重、SOC、TP、TN 和 AN 含量存在显著差异。根据最小显著差异法 (LSD) 比较得农地和林地的恢复效

果优于草地和灌木丛地。其次研究了区域土壤养分空间分布特征, 结果表明土壤的 pH、SOC、TP 和 TN 的最佳半变异函数模型为指数模型, AN 最佳模型为球面模型; pH 具有强烈空间自相关, 而 SOC、TP、TN 和 AN 具有中等空间自相关, 揭示了影响区域空间范围内 pH 变异的因素主要是结构因素, 而结构因素和人为因素共同作用影响 SOC、TP、TN 和 AN 的变异。空间分布图更直观的呈现出区域内养分的分布情况。综合不同植被恢复后土壤养分差异以及区域空间分布可知, 农地土壤 pH 显著高于其它三种植被类型主要受结构因素影响, 而 SOC、TP、TN 和 AN 在 4 种植被间的差异受结构因素和人为因素的共同作用。这为不同植被类型对沙地恢复工作提供一定的理论基础。

## 参考文献:

- [1] 赵哈林. 沙漠生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.
- [3] Porazinska D L, Bardgett R D, Blaauw M B, et al. Relationships at the aboveground-belowground interface: plants, soil biota, and soil processes[J]. Ecological monographs, 2003, 73(3): 377-395.
- [4] Peri P L, Gargaglione V, Pastur G M. Above-and belowground nutrients storage and biomass accumulation in marginal *Nothofagus antarctica* forests in Southern Patagonia[J]. Forest ecology and management, 2008, 255(7): 2502-2511.
- [5] 丁越岗, 杨 劼, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 18-25.
- [6] 邓继峰, 丁国栋, 魏亚伟, 等. 毛乌素沙地南缘樟子松人工林土壤理化性质差异及其与林分生长的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 160-166.
- [7] 乔磊磊, 李袁泽, 翟珈莹, 等. 黄土丘陵区植被恢复模式对土壤碳组分的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 14-20.
- [8] 杨 越, 哈 斯, 孙保平, 等. 毛乌素沙地南缘不同植被恢复类型的土壤养分效应[J]. 中国农学通报, 2012, 28(10): 37-42.
- [9] 苏 静, 赵世伟. 植被恢复对土壤团聚体分布及有机碳、全氮含量的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 44-46.
- [10] 何 群, 席 欢, 万 婷. 不同植被恢复模式对红原沙化草地土壤理化性质的影响[J]. 四川环境, 2017, 36(1): 35-40.
- [11] 苏荣瑞, 金卫斌, 艾天成, 等. 基于GIS的湖北省江陵县土壤养分空间变异研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2007, 4(3): 13-17.
- [12] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field[M]. New York: Advances in soil science. Springer, 1985.
- [13] Burgess T M, Webster R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II block kriging[J]. Journal of Soil Science, 1980, 31(2): 333-341.
- [14] 刘晓林, 李文峰, 杨林楠, 等. 基于ArcGIS地统计分析模块的土

- 壤养分空间变异分析——以云南省建水县为例[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1432 – 1437.
- [ 15 ] 杨建虎, 常鸿莉, 魏 琪. 黄土高原小流域土壤养分空间特征及其与地形因子的相关性[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 85 – 91.
- [ 16 ] 赵倩倩, 赵庚星, 董 超, 等. 高密市农田土壤养分空间变异特征研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 643 – 650.
- [ 17 ] 刘 欣, 王红梅, 廖丽君. 黑龙江省巴彦县土壤养分空间变异规律与格局分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 86 – 90.
- [ 18 ] Klute A, Dirksen C. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods[J]. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 1986, 5: 687 – 734.
- [ 19 ] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter[J]. *Methods of soil analysis: Part 2 chemical and microbiological properties*, 1983, 9: 539 – 579.
- [ 20 ] Bremner J M. Nitrogen - total[J]. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 1996, 5: 1085 – 1121.
- [ 21 ] 鲍士旦. 土壤农化分析(3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 22 ] Zhi-xiang W, Gui-shui X, Zhong-liang T. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen in rubber plantations soil at different age stages in the western region of Hainan Island[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2010, 11(1): 147 – 153.
- [ 23 ] 陈 彦, 吕 新. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以新疆农七师125团为例[J]. 中国农学通报, 2005, 21(7): 389 – 389.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] 李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging方法在区域土壤水分估值中的应用[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 446 – 452.
- [ 26 ] 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.
- [ 27 ] Webster R, Oliver M A. *Geostatistics for environmental scientists*[M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [ 28 ] 汤国安, 杨 昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [ 29 ] 李 龙, 姚云峰, 秦富仓. 黄花甸子流域土壤全氮、速效磷、速效钾的空间变异[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 373 – 379.
- [ 30 ] 钱 洲, 俞元春, 俞小鹏, 等. 毛乌素沙地飞播造林植被恢复特征及土壤性质变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(4): 102 – 107.
- [ 31 ] 李少华. 高寒沙区植被恢复过程中土壤质量改良效果研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- [ 32 ] 程立平, 赵玉明, 刘沛松. 豫西低山丘陵区不同植被修复模式下土壤养分评价[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 423 – 426.
- [ 33 ] Reiners W A, Lang G E. Changes in litterfall along a gradient in altitude[J]. *The Journal of Ecology*, 1987, 75(3): 629 – 638.
- [ 34 ] 段文标, 陈立新, 颜永强. 莲花湖库区红松水源涵养林土壤水分物理性质的空间分布特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1227 – 1235.
- [ 35 ] 雷志栋. 土壤特性空间变异性初步研究[J]. 水利学报, 1985, 16(9): 10.
- [ 36 ] 唐启敏. 基于GIS的陕西省榆林市耕地土壤养分空间变异及其地力评价[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.
- [ 37 ] 杨 东, 刘 强. 基于GIS和地统计学的张掖市甘州区土壤全氮、有机质的空间变异特征分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 593 – 597.
- [ 38 ] 李双异, 刘慧屿, 张旭东, 等. 东北黑土地区主要土壤肥力质量指标的空间变异性[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 2220 – 2225.
- [ 39 ] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数与Kriging插值分析[J]. 地理学报, 2000, 1(5): 555 – 566.
- [ 40 ] 白由路, 金继运, 杨俐苹, 等. 基于GIS的土壤养分分区管理模型研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(1): 46 – 50.
- [ 41 ] 梁中龙, 袁中友, 林兴通, 等. 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.
- [ 42 ] 姚思思. 探析砒砂岩与沙复配成土的固沙机理及影响因素[J]. 农家参谋, 2020, 12(2): 176.
- [ 43 ] 莫德祥, 吴庆标, 林 宁, 等. 桂东南柳杉人工林碳氮储量及其分配格局[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4): 794 – 799.
- [ 44 ] Li Y, Brandle J, Awada T, et al. Accumulation of carbon and nitrogen in the plant–soil system after afforestation of active sand dunes in China's Horqin Sandy Land[J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2013, 177(8): 75 – 84.
- [ 45 ] 苏爱玲. 气候变化对高寒草甸枯落物分解特性的影响及温度敏感性研究[D]. 西宁: 中国科学院西北高原生物研究所, 2010.
- [ 46 ] 徐秋芳, 钱新标, 桂祖云. 不同林木凋落物分解对土壤性质的影响[J]. 浙江林学院学报, 1998, 15(1): 27 – 31.
- [ 47 ] 刘佳楠, 常海涛, 赵 娟, 等. 宁夏荒漠草原柠条锦鸡儿枯落物分解特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 23.
- [ 48 ] 曹祥会, 龙怀玉, 周脚根, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 937 – 948.
- [ 49 ] 王淑彬, 徐慧芳, 宋同清, 等. 广西森林土壤主要养分的空间异质性[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5292 – 5299.
- [ 50 ] 梁 斌, 齐 实. 北京山区土壤养分空间变化特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 769 – 777.
- [ 51 ] 刘国华, 傅伯杰, 吴 钢, 等. 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.
- [ 52 ] Wang Y, Fu B, Lu Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2011, 85(1): 58 – 66.
- [ 53 ] 周 敏, 王秋兵, 贾艳萍. 基于乡镇级耕层土壤养分空间变异研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009, 7(2): 11 – 16.
- [ 54 ] 王 军, 傅伯杰, 邱 扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局-Kriging插值分析[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 373 – 379.
- [ 55 ] 赖壮杰, 刘 健, 余坤勇, 等. 南方典型毛竹经营区土壤养分空间变异特征——以福建省南平市顺昌县毛竹林经营区为例[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(3): 63 – 68.



- [ 56 ] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 699 – 704.
- [ 57 ] 史文娇, 汪景宽, 魏 丹, 等. 黑龙江省南部黑土区土壤微量元素空间变异及影响因子——以双城市为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 342 – 347.
- [ 58 ] 张志坚, 刘苑秋, 吴春生, 等. 基于地统计学和GIS的江西省森林土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(1): 38 – 46.
- [ 59 ] 周 稀, 邓欧平, 潘洪旭, 等. 基于GIS的西河流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 896 – 902.

## Effects of Vegetation Restoration on Soil pH and Nutrient contents in the Mu Us Sandland

YUAN Yuan<sup>1</sup>, ZHANG He<sup>1</sup>, WU Zhu-hua<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, BI Bo-yuan<sup>1</sup>, HAN Feng-peng<sup>1, 2\*</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Soil and Water Conservation Ecological Engineering Technology Research Center, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to clarify the differences of soil pH and nutrients and their spatial distribution under different vegetation types, we quantitatively analyzed the differences and spatial variation of pH, soil organic carbon (SOC), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and ammonium nitrogen (AN) under different vegetation recovery types in the study area by combining the classical statistics and geostatistical methods. The results showed that all indicators (except for SOC) presented similar changes after different vegetation restorations. On the whole, the restoration effect decreased in the order of farmland > woodland > grassland > shrub. The variation coefficient of pH was 8.34%, which belonged to weak variation. And the nugget coefficient was 9.98%, which indicated a strong spatial correlation. The variation coefficients of SOC, TP, TN and AN were 86.44%, 31.92%, 87.76% and 58.58%, which belonged to moderate variation, respectively. And their nugget coefficients were 40.62%, 49.82%, 49.94% and 40.55%, showing medium spatial correlation, respectively. The best fitting model of AN was spherical model, and the best fitting model of the other indices was exponential model. In general, the distribution pattern of each index was gradually decreased from northeast to southwest of the study area.

**Key words:** The Mu Us Sandland; Vegetation type; Soil nutrient; Spatial variation

[ 责任编辑: 韩春兰 ]