



长江流域资源与环境
Resources and Environment in the Yangtze Basin
ISSN 1004-8227, CN 42-1320/X

《长江流域资源与环境》网络首发论文

题目: 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素
作者: 李理, 朱文博, 刘俊杰, 张俊华, 朱连奇
网络首发日期: 2020-01-04
引用格式: 李理, 朱文博, 刘俊杰, 张俊华, 朱连奇. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素. 长江流域资源与环境.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20200104.1550.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素

李理, 朱文博, 刘俊杰, 张俊华, 朱连奇*

(河南大学环境与规划学院, 河南 开封, 475004)

摘要: 自然界中, 土壤碳库对于维持生态系统碳平衡起决定性作用, 而土壤有机碳又是碳库中不可或缺的一员, 研究土壤有机碳对于全球生态系统碳平衡具有十分重大的意义。因此, 基于宝天曼土壤有机碳实测数据并运用半方差函数、克里格插值分析山地土壤有机碳垂直性特征及空间分异程度, 利用地理探测器对影响土壤有机碳分布的环境因子进行相关分析, 结果表明: ①宝天曼土壤有机碳介于 0.31~7.7 g/kg, 属于较低水平, 最高值 (7.70 g/kg) 出现在北坡 987 m 处; ②不同土层深度的半方差函数模型不同, 0~20 cm 和 40~60 cm 对高斯模型拟合效果更明显、20~40 cm 对球状模型拟合效果较好, 而线性模型对于 60~80 cm 和 80~100 cm 土层深度拟合效果较佳, 克里格插值表明 0~20 cm 和 20~40 cm 空间分异特征相似, 呈西南向东北增加的趋势, 而 40~60 cm 土壤有机碳空间分异呈现东北高、西南低; ③宝天曼不同土层深度受单个环境因子影响程度不同, 解释力介于 0.127~0.407, 其中 NDVI 对 0~20 cm 土壤有机碳解释力最显著 (0.407)、高程对 40~60 cm 土壤有机碳解释力最高 (0.373), 交互探测结果表明 NDVI 与坡度解释力最高、高程与其他因子交互探测后解释力显著增大, 表明宝天曼土壤有机碳受多种环境因子共同影响, 而非单一因素起决定性作用。

关键词: 碳库; 土壤有机碳; 克里格插值; 地理探测器; 宝天曼

中图分类号: S159.2

文献标识码 A

在全球气候变化的背景下, 土壤碳库作为陆地生态系统最大的碳库对于维护生态系统碳平衡发挥着不可替代的作用, 其碳储量介于 1200~2500 Pg (1Pg = 10^{15} g) 之间^[1-4]。而土壤有机碳是土壤碳库的重要组成部分, 区域分布上的连续性^[5]和高度的空间变异性^[6]成为土壤有机碳含量垂直及空间分布上异质性的主要因素, 其含量和变化已成为全球农业可持续发展、全球气候变化及碳循环研究的热点^[7]。自上世纪 70 年代以来, P.A.Burrough 等人^[8]利用地统计分析和克里格插值分别对土壤空间变异性的随机性和结构性进行定性描述及量化研究。此后, 国内学者^[9-11]陆续开展土壤空间异质性研究。随着 3S 技术在全国土壤调查中普遍推广, 将土壤空间变异性的单一定性研究逐步过渡到土壤有机碳影响因子研究, 相关研究发现: 地形因子通过改变局部地区的水热状况影响到土壤有机碳的累积和分解速率, 导致区域间土壤有机碳分布存在显著的差异性^[12]。此外, 有研究发现^[13-14]植被覆盖度 (NDVI) 和土壤理化性质直接影响土壤有机碳含量分布, 土壤结构和属性差异对土壤有机碳空间分异的程度具有重大影响, 而不同研究尺度上土壤有机碳空间分布特征也存在差异^[14]。

宝天曼自然保护区位于北亚热带向南暖温带过渡的伏牛山系, 区域内复杂多变的气候和典型的植被垂直地带性结构对于揭示地理单元上自然要素对气候变化的响应有重要意义。土壤是地理环境整体性的一面镜子, 其中土壤有机碳含量更是反映全球气候变化的敏感性指标, 研究地理过渡地带上土壤有机碳含量的变化对于解释气候变化有一定意义, 然而学界对土壤有机碳含量异质性及作用机理研究不足。因此, 掌握土壤有机碳的内在演变规律对于深入分析不同地理单元上自然要素对气候变化的响应关系有重要价值, 对于区域内土壤肥力的衡量及植物-土壤相互关系具有参考作用。笔者基于宝天曼自然保护区核心区域土壤有机碳的实测数据, 运用 SPSS 10.3 软件对 0~100 cm 土层深度的土壤有机碳进行描述性分析, 利用地统计分析中半方差函数对研究区土壤有机碳进行拟合分析, 进一步利用克里格插值对区内土壤有机碳含量插值, 以此分析宝天曼土壤有机碳空间分异特征。为分析土壤有机碳含量

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41671090); 科技基础资源调查专项 (2017FY100902)

作者简介: 李理 (1996-), 男, 湖南临湘人, 硕士研究生, 主要从事土地资源开发及生态系统服务研究。

Email: lili19960217@163.com

***通讯作者:** 朱连奇, E-mail: lqzhu@henu.edu.cn

空间异质性的影响因素，结合地理探测器对宝天曼土壤有机碳的环境因子（高程、坡度、气温、降雨量、降雨侵蚀力、NDVI）进行交互探测分析，旨在探索宝天曼土壤有机碳空间变异的主要驱动因素，以期为改善研究区内土壤质量、土地资源的合理利用提供重要的理论和现实建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宝天曼自然保护区（33°25′—33°33′N，111°53′—112°17′E），位于秦岭东段伏牛山南坡的河南省南阳市境内，处于北亚热带向南暖温带气候过渡区域，属于季风型大陆性气候，年平均气温为 15.1℃，年均降雨量为 855.6 mm。海拔高度为 200~1830 m，地貌类型以中山为主，低山为辅，花岗岩、石灰岩及砂岩是主要的岩石类型。研究区内土壤类型是风化后的砂质岩演化而成的不饱和始成土，植被类型属于暖温带落叶林向北亚热带常绿落叶阔叶林过渡的类型。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选取及数据处理

(1)样地选取

基于野外调查的基础上，根据海拔梯度和宝天曼自然保护区核心区典型的垂直地带性植被及土壤类型，制定野外样品采集路线，但宝天曼自然保护区核心区外受人类活动干扰明显，因此本文选取宝天曼自然保护区核心区域沿南坡和北坡从 1900 m 至 700 m 自上而下间隔 100 m 设置一个样地，样地中包含宝天曼典型森林植被和土壤类型，共 23 个样地（图 1）。2017 年 8-9 月进行野外样品采集，在野外调查土壤指标之前，运用 GPS 记录样地经纬度并详细记录坡向、坡度、植被及土壤类型等，然后在每个样地选取典型的土壤剖面，去掉凋落物后，按照土壤发生层进行取样，分别装入自封袋带回实验室以备土壤有机碳的测定。

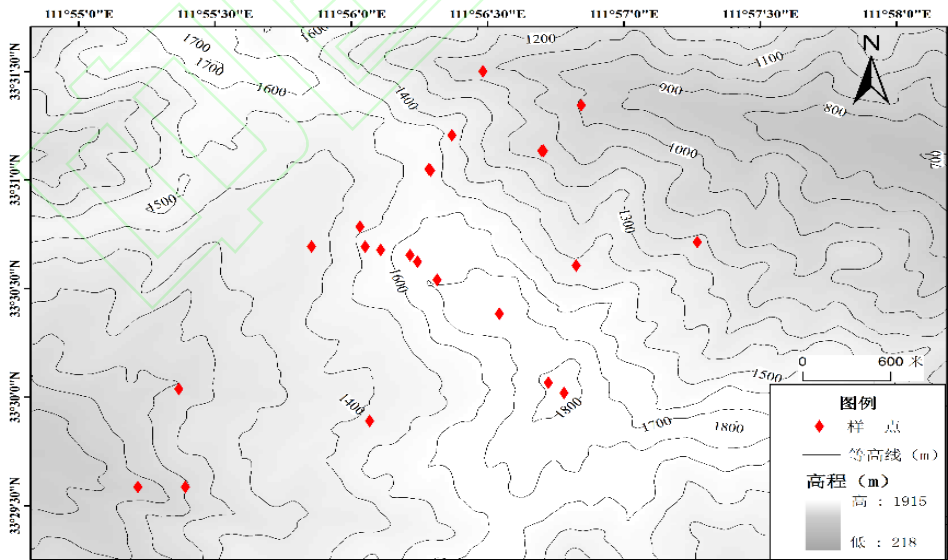


图 1 研究区采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling points in the study area

(2)土样采集与数据处理

土壤有机碳的测定采用重铬酸钾外加热法^[15]，由于野外样品采集过程中，按土壤发生层

进行取样致使每个土壤剖面划分的深度及土壤层数不尽相同，参照徐艳^[7,16-19]等人的研究对宝天曼各剖面不同土层深度土壤有机碳含量进行加权平均，统一将剖面 1m 深度以内等间距的划分为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 等五类，对剖面深度超过 1m 的部分不进行处理，计算公式如下：

$$C_{a-b} = \sum C_i \times \frac{H_i}{20} \quad (1)$$

式中： a ($0 \leq a \leq 80$)、 b ($20 \leq b \leq 100$) 分别表示加权后各土层的土层深度 (cm)； C_{a-b} 为原土层经过加权后土层深度在 $a-b$ cm 区间范围内的土壤有机碳含量 (g/kg)； C_i 为加权前剖面第 i 层土壤有机碳含量 (g/kg)， H_i 表示 i 层在等间距 20 cm，即 $a-b$ cm 范围内的深度。通过式 (1) 可将不同厚度土层的有机碳数据统一至 0~100 cm 等 5 层相同间距为 20 cm 的土壤有机碳含量。

此外，取样深度不同导致划分等间距土壤层有机碳不一致，参考《河南省土壤志》和《河南土种志》，按照土壤类型相似和相近的原则对缺失的土壤剖面土层的有机碳进行补充，对于宝天曼南坡 1500 m 处缺少 40~60 cm 土壤有机碳数据，利用南坡 12 个样点中 40~60 cm 土壤有机碳含量的平均值进行替代，从而完善各土壤剖面上土壤有机碳研究序列^[7]。

(3)环境因子处理

植被指数遥感数据主要采用美国 NASA 提供的 2000-2017 年 MODIS 植被指数产品 MOD13Q1，该数据集为 250 m 分辨率的每 16 天合成植被 NDVI 指数，利用 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对 MODIS 数据集进行拼接、剪裁等预处理，提取 NDVI 影像，为减少云、气溶胶、视角等影响，对 MODIS 数据采用最大值合成法 MVC (Maximum Value Composites) 得到月均 NDVI，本文采用的 NDVI 数据为 2000-2017 年年均 NDVI。气温和降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn/>)，DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)，降雨侵蚀力利用章文波逐日降雨侵蚀力模型^[20]进行计算。

1.2.2 半方差函数

为探讨研究区土壤有机碳空间变异的结构性和随机性，利用地统计分析中的半方差函数^[21]分析土壤有机碳的空间异质性，公式如下：

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

式中： $\gamma(h)$ -半方差函数； $N(h)$ -长为 h 的研究区观测站点的成对数目，依据 $\gamma(h)$ 对 h 作图，参考系数 R_2 和残差 RSS 对于半方差函数拟合得到理论模型。

1.2.3 克里格插值

克里格插值^[22]作为地统计分析中的核心部分，以半变异函数提供的空间结构信息为参考依据，结合特定区域内若干个已知样本数据推测未知样点数据，本文利用 ArcGIS 10.3 软件进行制图，其数学表达式为：

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \gamma_i Z(x_i) \quad (3)$$

式中： $Z(x_0)$ 为研究区未知样本点的土壤有机碳的质量分数 (g/kg)； $Z(x_i)$ 为研究区未知样点周围已知样点的土壤有机碳质量分数 (g/kg)； γ_i 为第 i 个已知样点对未知样点的权重； n 为已知样点的个数。

1.2.4 地理探测器

本文采用王劲峰^[23,24]等人研发的地理探测器对宝天曼土壤有机碳的影响因素进行交互探测分析，进而探测两因子间的交互作用及其程度、类型，其计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2 \quad (4)$$

式中： q 为探测因子 A 的探测力值， $q \in [0,1]$ ， q 值越大，表明因素 A 对于研究区土壤

有机碳影响度越高； N 和 N_h 分别为宝天曼内区域的样本数； δ_h^2 为因素 A 在样本 h 内的离散方差； L 为研究区各因素的类型。

2 结果分析

2.1 宝天曼土壤有机碳描述性统计

本文利用 SPSS 21.0 软件对 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 等不同土层深度的宝天曼土壤有机碳含量进行描述性统计分析（表 1），由表（1）发现 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm 和 80~100 cm 等不同土层深度的土壤有机碳质量分数分别介于 1.84~7.7 g/kg、0.45~4.14 g/kg、0.20~2.84 g/kg、0.16~1.82 g/kg 和 0.31~1.77 g/kg 之间，平均土壤有机碳质量分数分别为 4.2 g/kg、1.92 g/kg、1.26 g/kg、0.97 g/kg 和 0.83 g/kg，表明宝天曼土壤有机碳沿土层深度的增加呈减少态势。不同土层深度上土壤有机碳质量分数存在显著性差异，研究区土壤有机碳总体介于 0.31~7.7g/kg 之间，属于较低水平^[25]，其变异系数（Cv）在 0.1-0.7 之间，属于轻度变异^[26]。

表 1 不同土层深度土壤有机碳含量（g/kg）

土层深度	土壤有机碳质量分数			标准差	峰度	偏度	变异系数	样地数
	最小值	平均值	最大值					
0-20 cm	1.84	4.2	7.7	1.64	-0.85	0.48	0.39	23
20-40 cm	0.45	1.92	4.14	0.97	-0.28	0.37	0.50	23
40-60 cm	0.20	1.26	2.84	0.75	-0.49	0.25	0.59	21
60-80 cm	0.16	0.97	1.82	0.60	-1.65	0.18	0.61	15
80-100 cm	0.31	0.83	1.77	0.16	-1.07	0.53	0.19	7

由于样地土层数量不一致，因此笔者从南、北坡不同海拔梯度上分别对 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 等土壤有机碳含量进行分析。由图 2（a）和（b）发现宝天曼南北坡不同土层深度的土壤有机碳含量随海拔升高变化存在差异：南坡各土层的土壤有机碳含量随海拔梯度升高呈增加趋势且随土层深度的增加土壤有机碳含量表现为减少趋势，其中 0~20 cm 土壤有机碳对海拔敏感性最强，1700 m 处出现峰值（6.48 g/kg）、最低值（1.84 g/kg）出现 1200 m 处，20~40 cm 和 40~60 cm 土层深度的土壤有机碳含量随海拔升高变化趋势一致，呈增加态势，较 0~20 cm 土壤有机碳变化幅度较低，其主要原因为表层（0~20 cm）土壤有机碳含量受人类活动干扰及环境因子影响明显，故表层有机碳含量垂直及空间分布上存在显著的异质性；图 2（b）表明北坡 0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤有机碳含量随海拔的递增呈下降趋势、40~60 cm 呈增加态势：0~20 cm 土壤有机碳含量在海拔 987 m 处最高（7.70 g/kg）、1560 处最低（2.42 g/kg），而 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的土壤有机碳含量变化趋势与表层（0~20 cm）相似；北坡土壤有机碳含量随土层深度的增加呈减少趋势，与南坡土壤有机碳垂直分布特征一致。本文基于已有数据分析南北坡向上土壤有机碳含量的垂直分布差异，发现南坡土壤有机碳含量随海拔升高总体表现上升趋势，而北坡 0~20 cm 和 40~60 cm 的土壤有机碳含量呈下降趋势、20~40 cm 土壤有机碳含量呈增加态势，这可能与样点布设及个数较少有关。另外，仅从海拔上分析宝天曼土壤有机碳含量的变化解释力不够，但为宝天曼土壤有机碳含量在海拔梯度上的变化提供参考。图 2（a）和（b）都表明宝天曼土壤有机碳含量剖面垂直分布特征显著，皆表现随土层深度的增加呈减少趋势，这与牛海^[31]等人的研究一致。

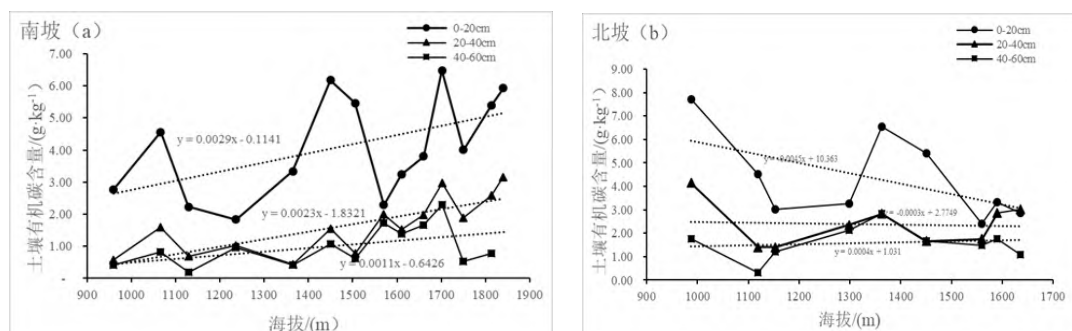


图2 宝天曼南坡 (a) 和北坡 (b) 不同土层深度土壤有机碳含量分布

Fig.2 Soil organic carbon content distribution in different soil depth on south slope (a) and north slope (b) of Baotianman

2.2 土壤有机碳含量的地统计学分析

运用 GS+ 9.0 软件对宝天曼土壤有机碳进行半方差函数拟合 (表 2), 不同土层深度土壤有机碳质量分数对于模型的拟合程度有区别: 高斯模型对 0~20 cm 和 40~60 cm 土壤有机碳质量分数拟合效果较好, 20~40 cm 土壤有机碳质量分数对球状模型拟合程度更高; 线型模型对 60~80 cm 和 80~100 cm 土壤有机碳质量分数的拟合效果更明显。模型拟合残差介于 0~0.4 范围中、决定系数在 0.01~0.8 之间, 证实所选模型能够准确反映不同土层深度土壤有机碳含量的空间结构特征。不同土层深度的块金值/基台值 (%) 介于 6.15~100 之间, 表明不同土层均处于中等强度的空间相关, 由结构性因素和随机性因素共同作用而引起的^[27], 其中 60~80 cm 和 80~100 cm 的块金值/基台值为 100, 主要原因为研究区 60 cm 以下样点较少, 对模型的块金效应有一定的误差。

表 2 宝天曼不同土层深度土壤有机碳质量分数的半方差函数模型及相关参数

Tab.2 Semi-variance function model and related parameters of soil organic carbon mass fraction at different soil depth in Baotianman

土层深度	块金值	基台值	变程	块金值/基台值 (%)	决定系数	残差	模型
0-20cm	0.114	0.230	3.462	49.56	0.22	0.014	高斯
20-40cm	0.021	0.341	0.555	6.15	0.38	0.003	球状
40-60cm	0.383	1.192	0.089	32.13	0.78	0.04	高斯
60-80cm	0.96	0.96	0.023	100	0.01	0.344	线型
80-100cm	0.417	0.417	0.023	100	0.169	0	线型

2.3 土壤有机碳的空间分异特征

文章基于不同土层深度土壤有机碳半方差函数模型拟合结果对研究区内 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 等样点数较多的土层进行克里格插值, 以此得到宝天曼不同土层深度土壤有机碳质量分数的空间分布特征 (图 3)。由图 3 发现克里格插值对于不同土层深度土壤有机碳存在空间分异, 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机碳空间变化相一致, 表现为由西南向东北递增的态势, 而 40~60 cm 土壤有机碳空间分布上呈东北高、西南低。

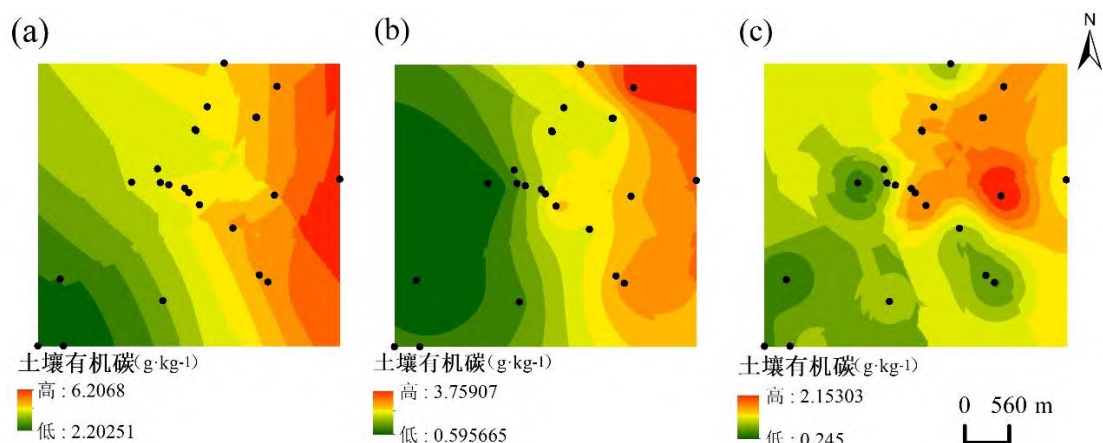


图 3 0~20 cm (a)、20~40 cm (b) 和 40~60 cm (c) 土壤有机碳空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil organic carbon at 0~20 cm (a)、20~40 cm (b) and 40~60cm (c)

2.4 土壤有机碳含量影响因素分析

利用地理探测器中交互作用探测模块分析宝天曼土壤有机碳环境因子的相互关系,由于60~80 cm和80~100 cm样点较少,运用地理探测器进行分析准确程度低,故文章对0~20 cm、20~40 cm和40~60 cm土壤有机碳进行交互探测分析(表3)。由表3发现不同环境因子间存在交互关系,其中坡度与NDVI交互探测后解释力最高;探测结果表明高程与其他因子交互后因子解释力显著增大,证实高程因子是影响土壤有机碳空间分布的关键因子;而降雨侵蚀力与其他因子交互探测后,解释力最高的是NDVI(0.859),显著大于降雨侵蚀力解释力(0.414)与降雨量解释力(0.133)之和,反映两个因素相互交互后解释力明显要强于原来因子解释力^[28],表明宝天曼土壤有机碳受到多因素的共同制约,并非单一因子对土壤有机碳空间分布起决定性作用。

表 3 宝天曼土壤有机碳影响因子交互作用探测分析

Tab.3 Interaction detection and analysis of soil organic carbon influencing factors in Baotianman

土层深度	高程	坡度	气温	降雨侵蚀力	降雨量	NDVI
0~20cm	高程	0.290				
	坡度	0.998	0.134			
	气温	0.559	0.572	0.127		
	降雨侵蚀力	0.801	0.572	0.171	0.133	
	降雨量	0.834	0.536	0.394	0.414	0.286
	NDVI	0.834	1	0.785	0.859	0.847
20~40cm	高程	0.356				
	坡度	0.998	0.265			
	气温	0.776	0.583	0.668		
	降雨侵蚀力	0.711	0.583	0.279	0.247	
	降雨量	0.791	0.633	0.530	0.639	0.337
	NDVI	0.845	1	0.693	0.762	0.700
40~60cm	高程	0.373				
	坡度	0.997	0.212			
	气温	0.566	0.568	0.172		
	降雨侵蚀力	0.711	0.568	0.258	0.224	
	降雨量	0.978	0.778	0.356	0.639	0.273
	NDVI	0.969	1	0.583	0.873	0.806

由表 4 发现，不同土层深度上土壤有机碳含量与各环境因子的空间分异程度存在差别：NDVI 和高程因子对宝天曼土壤有机碳解释力显著，其中 NDVI 对 0~20 cm 宝天曼土壤有机碳解释力最高（0.407）、高程因子对 40~60 cm 宝天曼土壤有机碳解释力最强（0.373）；其他环境因子对研究区内土壤有机碳解释力介于 0.127~0.337 之间，反映宝天曼土壤有机碳随土层深度的变化受环境因子影响力存在一定差异。

表 4 宝天曼不同土层深度土壤有机碳影响因素及探测结果

Tab.4 Influencing factors and detection results of soil organic carbon at different soil depth in Baotianman						
土层深度	高程	坡度	气温	降雨侵蚀力	降雨量	NDVI
空间分异性 q 值						
0~20cm	0.290	0.134	0.127	0.133	0.286	0.407
20~40cm	0.356	0.265	0.231	0.247	0.337	0.262
40~60cm	0.373	0.212	0.172	0.273	0.273	0.336

3 讨论

文章利用宝天曼实测数据分析南北坡土壤有机碳含量随海拔升高的变化特征，发现南北坡土壤有机碳含量随海拔的变化存在差异，南坡土壤有机碳随海拔升高呈增加态势，而北坡呈减少趋势。研究区采样点数量较少是文章的短板，因此，基于已有数据分析宝天曼南北坡向上土壤有机碳垂直分布及空间差异有所不足，下一步工作将基于本文的基础上对宝天曼样地数量进行补充。此外，仅从坡向上分析宝天曼土壤有机碳含量垂直分布特征，可以直观反映宝天曼土壤有机碳含量随海拔梯度的变化特征，但解释程度不够，需进一步利用半方差函数和克里格插值对宝天曼土壤有机碳进行空间分异研究。不同土层深度的土壤有机碳质量分数对模型拟合程度不同，高斯模型对 0~20 cm 和 40~60 cm 拟合效果较好、20~40 cm 半方差模型为球状模型，而 60 cm 土层深度以下对线性模型适用程度更高，其块金效应介于 6%~100% 之间，存在空间自相关，这与张梦薇等人的研究相一致^[29]。由于 60~80 cm 和 80~100 cm 采样点不足，空间自相关程度低，故本文对 60 cm 土层深度以下不进行克里格插值。

由于地形、气候和植被覆盖度的差异性，不同地形地貌条件下不同土层深度土壤有机碳分布存在差异性（表 5）。笔者运用地理探测器对研究区土壤有机碳的环境因子进行交互探测分析，发现植被覆盖度和地形因素对宝天曼土壤有机碳影响程度较强，这与李龙^[30]对赤峰市敖汉旗的影响因素研究相一致；牛海^[31]在对毛乌素沙地中不同水分根系与土壤有机碳含量的关系研究后，发现土壤表层受水土侵蚀影响严重，随着土层深度的增加，土壤水分与土壤有机碳关系保持稳定状态；胡莹洁^[18]对北京平原区 169 个不同土体构型的土壤样品土壤有机碳密度计算得到夹黏型土体构型土壤有机碳密度最大，结果表明诸多环境因子（地形、坡度、气候、植被、含水率、机械组成）共同作用于土壤有机碳含量的形成与空间分布，而非单一要素对区域内土壤有机碳分布起决定性作用。

表 5 不同研究区土壤有机碳影响因素研究结果

Tab.5 Results of soil organic carbon influencing factors in different research areas

研究区	研究时间	作者	影响因素研究
毛乌素沙地	2005 年	牛海 ^[31]	土壤侵蚀对土壤表层影响最为明显，发现深层次土壤有机碳与土壤水分关系更稳定
阿拉善高原和乌兰察布高原	2012 年	匡文浓 ^[33]	通过探讨土壤灌木群落土壤有机碳的垂直分布格局及其与根系之间的关系，得到群落优势种根系分布类型是影响土壤有机碳垂直分布格局的重要因素。
赤峰市敖汉旗	2014 年	李龙 ^[30]	利用广义相加模型准确分析土壤有机碳与影响因素的相关关系，发现植被覆盖度对表层含量影响因素最大、含水率对深层土壤有机碳影响程度更为明显。
后寨河喀斯特流域	2017 年	黄先飞 ^[33]	土地利用方式对土壤有机碳含量产生重大影响，其中以水田土壤有机碳含量最高，裸露岩石率也是影响土壤有机碳含量的重要因素之一。
黄土丘陵区	2011-2012 年	薛志婧 ^[34]	不同土层深度和土地利用方式下土壤有机碳密度存在明显差异，土壤有机碳含量随着土层深度的增加而逐渐减小，得到不同土地利用方式下土壤有机碳密度排序为天然草地>果园>灌丛林地>河滩、河台地>撂荒地>人工草地>耕地
祁连山	2012-2013 年	杨敏 ^[35]	以 97 个具有代表性的土壤剖面为研究对象并分析土壤有机碳垂直变化规律，进一步探测环境因素和土壤因素对土壤有机碳的影响，结果发现 NDVI 和年均降水是影响表层土体 SOC 含量的主要因子，而黏粒和砂粒是影响下层土体 SOC 含量的主要因子。
北京平原区	2010 年	胡莹洁 ^[18]	以北京平原区 40 个典型剖面 169 个土壤样品，由此发现不同土体构型的平均土壤有机碳含量大小关系为通体砂<通体壤<上壤下黏<夹黏。

4 结论

文章对宝天曼土壤有机碳实测数据进行统计分析,运用半方差函数和克里各插值进行空间分异研究,进一步利用地理探测器对影响研究区土壤有机碳分布的环境因子进行识别,得出的主要结论如下:

- (1) 随着土层深度的增加，土壤有机碳含量呈下降趋势：由 0~20 cm 土壤有机碳平均值 4.2 g/kg 下降到 80~100 cm 的 0.83 g/kg；60~80cm 变异系数最大（0.61）、80~100 cm 变异系数最小（0.19）。
- (2) 不同土层深度的半方差函数模型有差异，块金效应不同；0~20 cm 和 20~40 cm 空间分异程度相似，表现为由西南向东北增加的趋势，而 40~60 cm 土层深度空间分异呈现东

北高、西南低的分布趋势。

(3) 由地理探测器对环境因子交互探测及空间分异发现, 环境因子对不同土层深度土壤有机碳的影响存在差异性, 植被覆盖度(NDVI)和高程影响较为明显; 宝天曼土壤有机碳空间分布并非由单一因子决定, 而是由多种要素共同作用下形成。

参考文献:

- [1] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*. 1982, 298(5870): 156-159.
- [2] Bohn H L. Estimate of organic carbon in word soil[J]. *Soil science society of America Journal*, 1982, 46(5): 1118- 1119.
- [3] Schuur EAG, Bockheim J, Canadell JG, et al. Permafrost carbon vulnerability to climate change: implications for the global carbon cycle [J]. *Biological sciences*, 2008, 58(8): 701- 714.
- [4] 孙问娟,李新举.煤矿区土壤有机碳含量的高光谱预测模型[J].*水土保持学报*,2018,32(5):346-351.
- SUN W J, LI X J. Hyperspectral prediction model of soil organic carbon content in coal mining area[J]. *Journal of Soil Land Water Conservation*. 2018, 32(5): 346- 351.
- [5] 张凤荣.土壤地理学.北京:中国农业出版社,2001.
- ZHANG F R. Soil geography.Beijing: China agriculture press, 2001.
- [6] 赵明松,张甘霖,王德彩,等.徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J].*土壤学报*,2013, 50(1):1-11.
- ZHAO M S, ZHANG G L, WANG D CAI, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in XU-HUAI alluvial plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*. 2013, 50(1): 1- 11.
- [7] 徐艳,张凤荣,段增强,等.区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J].*土壤通报*,2005,36(6):836-839.
- XU Y, ZHANG F R, DUAN Z Q, et al. Discussion on calculation method of regional soil organic carbon density and carbon reserve[J], *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 836- 839.
- [8] Bur Rough P A. Soil variability: A late 20th century view[J].*Soil and Fertilizers*,1993,56:531- 562.
- [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. Resevres and spatial distribution charaeteristics of organic carbon in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1499- 1502.
- [10] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J].*土壤学报*,2004,41(1):35-43.
- XIE X L, SUN B, ZHOU H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of china and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*. 2004, 41(1): 35- 43.
- [11] 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.
- LU C W, CUI S Q, ZHAO L. Soil organic carbon storage and its spatia l distr ibution characteristics in Hainan Island:a study based on HNSOTER[J], 2006, 7(4): 1014- 1018.
- [12] 孙文义,郭胜利.黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J].*生态学报*,2011,31(6):1604-1616.
- SUN W Y, GUO S L. The spatial distribution of soil organic carbon and it's influencing factors in hilly region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1604- 1616.
- [13] Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Eldridge D J, et al. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central spain[J]. *CATENA*,2013, 104:153- 160.
- [14] 和丽萍,孟广涛,李贵祥,等.金沙江头塘小流域人工林有机碳及其剖面分布特征[J].*长江流域资源与环境*, 2016,25(3):476-485.

HE L P, MENG G T, LI G X, et al. Soil organic carbon and its distribution characteristics in the soil profile under different vegetation recovery modes in toutang small watershed of JINSHA river[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(3): 476- 485.

[15] 龚子同,张甘霖.土壤调查实验室分析方法[M].北京:科学出版社, 2012.

GONG Z T, ZHANG G L. Soil investigation laboratory analysis method [M]. Beijing: science press, 2012.

[16] 张萌萌,刘梦云,常庆瑞,等.1985-2015 年陕西黄土台塬表层土壤有机碳空间分布[J].自然资源学报, 2018,33(11):2032-2045.

ZHANG M M, LIU M Y, CHANG Q R, et al. Spatial distribution of organic carbon in topsoil of the loess tableland in shaanxi province during 1985-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(11): 2032- 2045.

[17] Hobley E, Wilson B, Wilkie A, et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia[J]. Plant and Soil, 2015, 390(1-2): 111- 127.

[18] 胡莹洁,孔祥斌,姚静韬.北京市平原区土壤有机碳垂直分布特征[J].生态学报,2019,39(2):561-570.

HU Y J, KONG X B, YAO J T. Vertical distribution of soil organic carbon in plains areas of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019(2): 561- 570.

[19] 吴健,黄沈发,肖绍骥,等.基于碳稳定同位素的滨岸草地生态系统土壤有机碳贡献研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(7):1585-1592.

WU J, HUANG S F, XIAO S G, et al. Using stable carbon isotope to Study contribution rate of soil organic carbon in A Riparian Grassland Ecosystem[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7): 1585- 1592.

[20] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.

ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y, Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. Scientia Geographica Sonica, 2002, 22(6): 705- 711.

[21] Mathe R G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1257.

[22] Rossi R E, Mulla D J, Journel G A, et al. Geostatistics tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. Ecological Monographs, 1992, 62(2): 277- 314.

[23] 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.

[24] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 33(none): 114- 115.

[25] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查数据 [M].北京:中国农业出版社,1997:311.

National soil census office. Soil census data of China [M]. Beijing:China agriculture press, 1997: 311.

[26] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. Pudoc: Wageningen, 1985: 96- 145.

[27] Albaladejo J, Ortiz R, Garcia-Franco N, et al. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(2): 265- 277.

[28] 李莹莹,尤罗利,陈永生,等.环巢湖地区多水塘景观时空格局演变特征及其驱动因素[J].生态学报,2018, 38(17):302-313.

LI Y Y, YOU L L, CHEN Y S, et al. Spatial-temporal characteristics of multi-pond landscape change and their driving factors in the Chaohu Basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(17): 302- 313.

[29] 张梦薇,吕成文.丰乐河流域表层土壤有机碳空间变异特征研究[J].长江流域资源与环境,2018(7):1576-1583.

ZHANG M W, LU C W. Spatial variabilities of topsoil organic carbon in Fenge river basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin. 2018(7): 1576- 1583.

[30] 李龙,秦富仓,姜丽娜,等.赤峰市敖汉旗土壤有机碳含量的垂直分布及其影响因素[J].生态学报,2019,39(1): 345-354.

LI L, QIN F C, JIANG L N, et al. Vertical distribution of soil organic carbon content and its influencing factors in Aaohan, Chifeng[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(1): 345- 354.

[31] 牛海, 李和平, 赵萌莉, 等. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 157-163.

NIU H, LI HP, ZHAO M M, et al. Relationship between soil water content and vertical distribution of root system under different ground water gradients in Mao Su Sandy land[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(2): 157- 163.

[32] 匡文浓, 钱建强, 马群, 等. 五种荒漠灌木群落土壤有机碳垂直分布及其与根系分布的关系[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(2): 275-281.

KUANG W Q, QIAN J Q, MA Q, et al. Vertical distribution of soil organic carbon and its relation to root distribution in five desert shrub communities[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(2): 275- 281.

[33] 黄先飞, 周超运, 张珍明. 土地利用方式下土壤有机碳特征及影响因素——以后寨河喀斯特小流域为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(6): 1056-1067.

HUANG X F, ZHOU C Y, ZHANG Z M. Characteristics and affecting factors of soil organic carbon under land uses: A case study in Houzhai River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(6): 1056- 1067.

[34] 薛志婧, 马露莎, 安韶山, 等. 黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 2917-2925.

XUE Z J, Ma L S, An S S, et al. Soil organic carbon density and stock at the catchment scale of a hilly region of the loess plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(9): 2917- 2925.

[35] 杨敏, 杨飞, 杨仁敏, 等. 祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2017(2): 386-392.

YANG M, YANG F, YANG R M, et al. Profile vertical distribution modes of SOC and influential factors in Qilian Mountains[J]. *Soils*, 2017(2): 386- 392.

Soil Organic Carbon Heterogeneity and Its Influencing Factors in Baotianman Nature Reserve

LI Li, ZHU Wen-bo, LIU Jun-jie, ZHANG Jun-hua, ZHU Lian-qi*

(College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004)

Abstract: Soil carbon pool plays a decisive role in maintaining the carbon balance of the ecosystem, and soil organic carbon is an indispensable part of the carbon pool in nature. Therefore, the study of soil organic carbon is of great significance for the carbon balance of the global ecosystem. This paper uses semi-variance function and kriging interpolation to analyze the vertical characteristics and spatial differentiation of mountain soil organic carbon, and uses geographical detector to conduct correlation analysis on the environmental factors affecting the distribution of soil organic carbon based on the measured data of soil organic carbon in Baotianman. The results showed that: ① the soil organic carbon of Baotianman is between 0.31 and 7.7 g/kg, which is a low level. The highest value (7.70 g/kg) appears at 987 m of the north slope; ② for different soil depth of semivariance function model, 0-20 cm and 40-60 cm of gaussian model fitting effect is more apparent, 20-40 cm of the spherical model fitting effect is good, and the linear model for 60-80 cm and 80-100 - cm soil depth better fitting effect. Kriging interpolation showed that the depths of 0-20 cm and 20-40 cm share similar space differentiation characteristics, increasing from the southwest to the northeast, and 40 to 60 cm around space differentiation in soil organic carbon is low in the southwest and high in the northeast; ③ different soil depths in Baotianman are influenced by a single environmental factor in a different degree. The explanatory power is between 0.127 to 0.407, in which the NDVI shows the most significant explanatory power of soil organic carbon (0.407) in soil depth between 0 ~ 20 cm and elevation in soil depth between 40-60 cm

(0.373). Interaction detection results show that the NDVI and slope explanatory power topped the list, elevation and other factors increased significantly after interaction detection, indicating that soil organic carbon in Baotianman is influenced by many environmental factors, rather than a single factor.

Key words: carbon library; soil organic carbon; kriging interpolation; geographic detector; Baotianman

