

基于地理加权回归模型的土壤有机碳密度影响因子分析

李龙¹, 姚云峰¹, 秦富仓¹, 张美丽¹, 高玉寒¹, 常伟东²

1. 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010018
2. 内蒙古敖汉旗林业局, 赤峰 024300

摘要 为深入探讨土壤碳库的空间变异特征、准确评价区域碳库的影响机制, 选择内蒙古自治区赤峰市敖汉旗黄花甸子流域为研究对象, 基于研究区的实地采样数据, 结合遥感与地理信息系统技术, 采用地理加权回归模型对土壤有机碳密度及其影响因子进行拟合, 探求不同环境因子对土壤有机碳密度影响的空间变异特性。结果表明, 研究区土壤有机碳密度在 1.91~16.63 kg/m² 范围内变化, 其平均密度为 7.42 kg/m²; 各影响因子对土壤有机碳密度的影响程度由高到低依次为海拔>坡度>归一化植被指数 (NDVI)>与道路或村庄最短距离 (DIST); 各因子对土壤有机碳的影响随空间位置的变化存在明显的差异, 其中海拔、坡度与土壤有机碳密度呈现负相关, 而 NDVI、DIST 与土壤有机碳密度呈现正相关。

关键词 土壤有机碳密度; 环境因子; 地理加权回归模型; 小流域; 空间变异

土壤碳库作为陆地生态系统中最大的碳库, 是全球碳循环中的一个主要流通途径, 在调节和稳定生态系统碳收支平衡中起到重要作用, 因此土壤碳库的微小变化都会影响整个生态系统的碳平衡, 进而影响全球气候变化^[1]。土壤有机碳储量与气候、植被、地形等环境因子密切相关, 对环境变量和土壤有机碳储量之间的关系进行统计分析对于评估未来土地利用变化和气候变化对土壤碳库的影响具有重要意义^[2]。

在不同的环境条件下控制土壤有机碳循环的因素不同, 以至于土壤中的有机碳存在较高的空间变异性, 不同变量间的相关特性在空间上也往往是非稳态的^[3]。国内外针对土壤有机碳影响因子的研究较多, 主要集中在人为因素^[4]和自然因素^[5]两方面, 但其多以大尺度的研究为主, 对中小尺度的研究更多关注于各影响因素与土壤有机碳的线性关系。然而, 土壤空间变异性是土壤的重要属性之一, 无论在大尺度上还是在小尺度上均存在空间变异, 局部非线性影响关系更有助于揭示土壤的各种属性^[6]。这种局部差异却往往被人们忽略, 常规线性回归模型拟合空间数据, 其估计参数仅能反映区域总体的平均状况, 并不能反映出局部的地区特征情况^[7]。这就会掩盖空间数据的真实特征, 从而失去实际意义^[8]。地理加权回归模型 (geographically weighted regression, GWR) 是一种用来构建空间变化关系模型的线性回归的局部形式, 且附

加了表达空间对象本身相关性和异质性的表达参数, 可以直观地探测空间关系的非平稳性^[9,10], 获得不同地理位置上各影响因子的影响程度, 可以更加准确地分析土壤有机碳密度与其各影响因子之间的内在联系。

目前地理加权回归模型在城市住宅地价评估^[11]、经济发展的空间因素^[12]等领域已成为研究热点, 而在土壤和环境科学上的应用还并不多见。为探讨土壤有机碳与各影响因子的关系, 分析空间局部不同影响因子对土壤有机碳的作用情况, 本研究以内蒙古赤峰市敖汉旗黄花甸子流域为例, 采用 GWR 模型对土壤有机碳密度的影响因素进行分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区赤峰市敖汉旗西部的黄花甸子流域, 地处 42°17'N~42°33'N, 119°36'E~119°53'E, 位于老哈河中游南岸, 科尔沁沙地南缘, 面积约为 30 km²。流域内总体属于低山丘陵区, 地势起伏不大, 海拔约在 400~800 m, 属于中温带半干旱大陆性季风气候区。年降雨量 400~470 mm, 年蒸发量 2290~2400 mm, 全年日照数 2940~3060 h, 历年平均日照数 2999.3 h, 10℃以上积温为 3189℃。春季风力大, 持续时间较长, 年平均风速 4~6 m/s。土壤类型以栗钙土

收稿日期: 2015-03-11; 修回日期: 2015-08-04

基金项目: 内蒙古应用研究与开发计划项目 (20110732)

作者简介: 李龙, 博士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治, 电子信箱: lilongdhr@126.com; 姚云峰 (通信作者), 教授, 研究方向为水土保持与荒漠化防治, 电子信箱: lilongdhr@emails.imau.edu.cn

引用格式: 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 基于地理加权回归模型的土壤有机碳密度影响因子分析[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 247-254; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.042

为主,伴随着少量的风沙土,体现了森林土壤向草原土壤过渡的特点,pH值呈弱碱性到碱性,全剖面具有石灰反应。植被类型主要有天然草地、灌丛林、乔灌混交林、针阔混交林和阔叶纯林等,以人工植被为主。地带性植被以疏林草原为主,人工植被以水土保持林和防风固沙林为主,主要造林树种为小叶杨(*Populus simonii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Prunus sibirica*)、柠条(*Caragana intermedia*)等,小面积分布有樟子松(*Pinus sylvestris*),原生植被较少,只有低矮丛生小灌木及杂草,主要为胡枝子(*Lespedeza davurica*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等一年生杂草。

1.2 数据来源

结合研究区1:5万地形图、2008年土地利用现状图,于2012年7月采集研究区土壤样品,以兼顾代表性和均匀性为原则,在每块样地内采用S法共确定4个采样点,并用手持GPS标记各采样点坐标。每两个相邻采样点间隔约为25m,确保均匀取样,充分涵盖样地自然特征;每个样点挖掘深1m、长2m、宽1.5m的土壤剖面,按0~10、10~20、20~40、40~60、60~100cm划分5个层次分土层取土,每层取3个重复,共计87个样地348个采样点。研究区土地利用现状与样地分布见图1和表1。

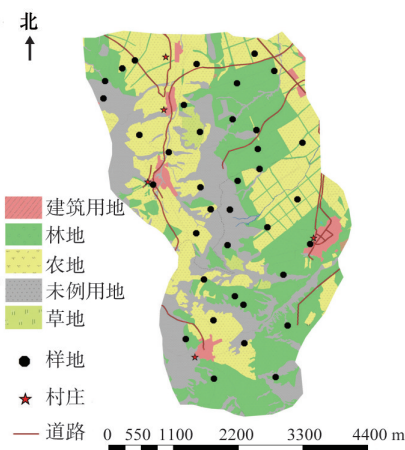


图1 研究区土地利用现状及样地分布

Fig. 1 Land use present situation and sample distribution of study area

表1 研究区样地分布数量

Table 1 Quantity of sample in study area

坡度/ (°)	样地 数量	海拔/m	样地 数量	坡向	样地 数量	土地利用 方式	样地 数量
<5	19	<550	14	阴坡	19	农地	32
5~10	15	550~600	16	半阴坡	22	林地	35
10~15	17	600~650	20	阳坡	25	草地	20
15~20	18	650~700	16	半阳坡	21		
20~25	10	700~750	15				
>25	8	>750	6				

1.3 数据处理

土壤有机碳的影响因子分为自然因素和人为因素两方面。就自然因素而言,研究区属低山丘陵区,小流域面积约为30km²,区域内土壤类型主要是栗钙土,零星分布有小面积风沙土,降雨等气候因素在流域内也呈均匀分布,在空间上都不是影响土壤有机碳变异的主导因子,而地形和植被因素在流域内发挥作用较为明显。因此,选取坡度、海拔和归一化植被指数(NDVI)作为影响土壤有机碳的自然因素。人为因素的影响主要体现在人类对土壤的干扰强度和频繁程度,因此选择距村庄、道路的距离作为人为因素。

选取的环境因素指标包括NDVI,样点距村庄、道路最近距离(DIST),土壤容重,土壤含水率,海拔高度,地形坡度。利用研究区30m分辨率的DEM数据,在ArcGIS中3D分析工具下提取研究区坡度因子。采用105℃烘干称重法测定各层土壤样品的含水率;采用环刀法测定各层土壤容重;采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机碳含量。

一般认为,生长季节NDVI>0表示有植被覆盖,其值增加表示绿色植被的增加,NDVI>0.5表明植被生长状态好,覆盖密度大。首先对分辨率为30m的TM5遥感影像(2012-07-20)进行大气校正和辐射校正,并利用30m分辨率的DEM进行地形校正,消除地形阴影、图像扭曲等误差,再进行滤波去除雾处理,以研究区1:5万地形图为标准,在ArcGIS10.0中选取15个道路交叉点、河流弯点和交汇处等同名地物点作为控制点,进行2次多项式几何精校正,输出像元大小仍为30m。最后根据公式计算得到NDVI值:

$$NDVI = (LNIR - LR) / (LNIR + LR) \quad (1)$$

式中,LR为红光波段Band3的行星反射值;LNIR为近红外波段Band4的行星反射值。

自然因素和人为因素均对土壤有机碳密度的空间变异产生着重要影响,样点距离村庄或道路最近距离反映的是人类的生产生活活动对土壤有机碳密度的影响程度。DIST由研究区村庄、道路分布图(shp格式)计算样点到其最近的欧氏距离得到。

土壤有机碳密度是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳的储量,通常是以1m深土壤深度为标准,分层计算土壤有机碳密度,再进行加和^[13]。计算公式为

$$Soc_i = \sum_{i=1}^n d_i \times p_i \times o_i \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中,i为土壤层次;Soc_i为i层的土壤碳密度,kg/m²;d_i为土层厚度,cm;p_i为土壤平均容重,g/cm³;o_i为土壤有机碳含量,g/kg。

1.4 地理加权回归GWR模型

地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)分析是对传统回归分析的扩展,允许局部而不是全局的参数估计,通过附加表达空间对象本身相关性和异质性的变化参数,反映样本对回归方程贡献在空间上的分异,使回归结果更加可信^[11]。

在GWR中,对于每个模型校准位u, GWR模型为

$$y(u) = \beta_0(u) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u) \cdot x_k(u) + \varepsilon(u) \quad (3)$$

式中, $y(u)$ 为在位置 u 的因变量值; $X_k(u)$ 为位置 u 的第 k 个协变量的值; $\beta_0(u)$ 为截距项; $\beta_k(u)$ 为第 k 个协变量的回归系数; p 为回归项的个数; $\varepsilon(u)$ 为位置 u 的随机误差项。

GWR 模型中的系数估计采用加权最小二乘法实现, 每个点的系数用矩阵形式表述为

$$\hat{\beta}(u) = [X^T W(u) X]^{-1} X^T W(u) Y \quad (4)$$

式中, $W(u)$ 为 $m \times m$ 的空间权重对角矩阵, X 为 $m \times (n+1)$ 自变量矩阵, Y 为 $m \times 1$ 因变量向量。空间权重矩阵的估算由高斯函数实现:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{h}\right)^2 & d_{ij} < h \\ 0 & d_{ij} \geq h \end{cases} \quad (5)$$

式中, W_{ij} 为用空间已知点 j 去估计待测点 i 时的权重, d_{ij} 为被插值点 i 与样点 j 间的欧氏距离, h 为带宽。该函数为距离衰减函数, 离 i 点越近时观测值的重要性越大, 反之越小。当样点至待测点的距离等于或大于带宽时, 权重都被赋予为 0。带宽采用最小 AIC 信息准则 (akaike information criterion) 进行判断^[14]

$$AIC = 2n \ln(\sigma') + n \ln(2\pi) + n(n + Tr(S)) / [(n - 2 - Tr(S))] \quad (6)$$

式中, n 为数据点的数量, σ' 为误差项 (估值标准偏差), $Tr(S)$

为帽子矩阵的迹^[15]。

GWR 可被视为局部加权最小二乘回归模型, 这个模型与普通线性回归模型最明显的区别是该模型的回归系数在每个空间数据位置都要分别被估计, 而普通线性回归模型对回归系数的估计是基于整个研究区域的。

2 结果与分析

2.1 变量与环境因子的统计描述

空间上影响土壤有机碳密度的因素很多, 然而这些不同影响因子之间也往往存在不同程度的影响, 从而产生多重共线性问题给统计结果带来较大的干扰^[16]。因此, 为更加有效地描述各影响因子对自变量影响, 筛选出典型的影响指标, 对各变量进行统计分析 with 相关性分析就显得尤为重要。

如表 2 所示, 各采样点土壤有机碳密度为 1.91 ~ 16.63 kg/m², 其均值为 7.42 kg/m²。变异系数揭示区域化变量的离散程度, 弱变异性为变异系数 < 10%; 中等变异性为 10% ≤ 变异系数 ≤ 100%; 强变异性为变异系数 > 100%^[17]。本研究中土壤有机碳密度的变异系数为 11.25%, 属于中等程度的变异; 土壤含水率的变异系数最小, 为 2.16, 表明其具有较弱的变异程度; 其他各因子均属于中等强度的变异。土壤容重和海拔高度的变异程度较其他影响因子更为明显。

表 2 土壤有机碳与环境变量的描述性统计

Table 2 Statistical summary of soil organic matters and environmental variables

变量	土壤有机碳密度 / (kg · m ⁻²)	海拔 / m	坡度 / (°)	容重 / (g · cm ⁻³)	含水率 / %	NDVI	DIST / km
最小值	1.91	510	0.24	1.36	0.06	0.05	0.71
最大值	16.63	782	18.23	1.44	0.11	0.63	2.27
平均值	7.42	618	7.88	1.39	0.08	0.25	1.86
标准差	3.35	149.03	4.66	0.03	0.009	0.07	0.86
偏度	0.71	0.54	0.57	0.78	1.02	-0.10	0.77
峰度	3.02	2.68	1.94	2.58	4.32	1.99	2.97
变异系数 / %	11.25	45.15	24.11	59.14	2.16	11.25	28

对全部变量做相关性分析, 如表 3 所示, 各影响因子与土壤有机碳密度相关程度由高到低表现为海拔 > 坡度 > NDVI > DIST > 容重 > 含水率。作为自变量的影响因子, 海拔、坡度、NDVI 以及 DIST 与土壤有机碳密度均具有显著的相关性, 其中海拔、坡度和土壤容重与土壤有机碳密度呈负相关, 含水率、NDVI、DIST 与土壤有机碳密度呈正相关。除去容重和含水率外各驱动因子间相关程度较低并且其相关系数远小于与自变量的相关系数, 说明所选影响因子之间不会产生较为强烈的相互干扰, 所以在回归过程中可以避免多重共线性问题的出现; 同时影响因子与自变量具有较高的显著相关性,

所选影响因子能够解释自变量的变化情况。

2.2 地理加权回归分析

GWR 回归分析为研究区每个样点创建了各自局部的回归方程, 模型对待特定的核函数的带宽十分敏感, 带宽的确定是地理加权回归分析的关键^[18]。可以把带宽看作一个光滑参数, 带宽越大越光滑。一个过于光滑的模型可能使整个研究区域内的参数趋于类似, 而一个过于不光滑的模型也可以使局部之间不存在影响^[19]。最好的带宽则在这两种情形之间, 一般学术上使用最小 CV (cross-validation) 方法和最小 AIC 方法确定带宽^[20,21]。因此, 本研究带宽选择分别采用 AIC

表3 各环境因子与土壤有机碳密度的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of each environmental factor and soil organic carbon density

土壤有机碳密度	海拔	坡度	容重	含水率	NDVI	DIST
土壤有机碳密度	1	-	-	-	-	-
海拔	0.436*	1	0.011	0.234*	-	0.002
坡度	0.223*	0.011	1	0.157	0.129	-0.135
容重			0.157	1	-	0.013
含水率			0.321*	0.321*	1	-0.041
NDVI			0.124	0.124	0.198	1
DIST			0.183*	0.183*	0.108	0.167*

和CV方法进行比较实证。由表4得到模型拟合的各参数。

如表4所示,固定型的空间核中,AIC和CV方法所得到的模型评价参数基本相同,与调整型的空间核相比其模型拟合的残差较大,且模型拟合度较低;同时,AIC方法得到的模型拟合度高于CV方法,且残差较小,且校正模型拟合度(R^2 adjusted)为0.71,表明经过校正后模型因变量的解释程度可达71%,模型可以很好地描述土壤有机碳密度与各驱动因子的空间关系。因此,综合考虑选择调整型的AIC方法将更好地拟合观测数据。

2.3 土壤有机碳影响因子分析

土壤中有机的碳密度受外界环境的影响极为明显,在自然因素和人为因素的共同作用下,土壤在整个陆地生态系统中通过不断的物质循环和能力流动逐渐与各环境因子相适应以达到动态平衡,同时各环境因子作用于土壤时,它们的变化会直接引起土壤性质的改变,而不同环境因子对土壤的作用机理也各不相同。对有机碳而言,各环境因素的变化不仅可以直接影响土壤中有机的碳密度的大小,对有机碳的空间上分布格局也发挥着重要作用。那么,揭示不同环境因子对土壤有机碳的作用机制在研究陆地生态系统碳循环中就更为重要。

表4 不同方法下GWR模型拟合参数统计

Table 4 Model fitting parameters of GWR under different methods

方法	空间核	带宽	残差平方和	残差的估计标准差	R^2	校正模型拟合度
AIC	固定型	3112.13	52.01	1.12	0.69	0.62
	调整型		51.43	1.07	0.74	0.71
CV	固定型	3112.13	52.02	1.13	0.69	0.62
	调整型		51.60	1.09	0.72	0.68

2.3.1 海拔对土壤有机碳密度的影响分析

流域属于低山丘陵区,地势起伏不大,海拔约在400~800 m,海拔是影响土壤有机碳密度的首要因素。如图2(a)所示,海拔对土壤有机碳密度的回归系数在-4.93~0.24;流域东北方向蓝色区域的海拔高度与土壤有机碳密度呈正相关关系,相关系数在0.19~0.24,并呈带状分布,并由北向南延伸到流域中部;流域其他区域海拔的回归系数均为负值,在-1.01~-4.93,颜色由浅到深海拔回归系数的绝对值逐级增加,表明海拔对土壤有机碳积累的减弱程度也逐级升高。

从局部看,流域内西北—东南—一线上出现3处呈岛状分布的海拔回归系数低值区,结合研究区地形图,回归系数低值区的产生与流域内3座山峰分布位置有明显关系。流域西北—东南—一线上分布着黄花甸子后山(海拔746 m)、萨力巴西山(海拔759 m)、嘎拉登山(海拔782 m)3座低山,随着海拔高度的增加,太阳辐射增强,促进植被蒸腾作用,影响土壤

水分的固持,不利于作物生长,从而降低了土壤有机碳的积累^[2]。3座低山在流域内成为制约土壤有机碳积累的重要因素,3座低山自然形成流域内海拔回归系数的负值中心,且距低山距离越远,高海拔对土壤有机碳形成的抑制作用越弱,直到流域东北及其南部地区,地势平坦,受高海拔强光照影响较低,以致这一地区海拔因子的回归系数变为正值,这可能是由于适当的光照对植物光合作用产生积极影响,加之低海拔地区是大面积农业耕作的重点地区,人为增施有机肥也可能是低海拔地区海拔系数由负变正的因素之一。

2.3.2 坡度对土壤有机碳密度的影响分析

流域内坡度是影响土壤有机碳密度的第二大驱动因子。如图2(b)所示,坡度对土壤有机碳密度的回归系数在-0.39~0.18,并呈条带状分布。流域西北部与流域南部的坡度回归系数为正值,为0.03~0.18;流域内其余大部分地区的坡度回归系数在-0.08~-0.39,即表明土壤有机碳密度随着

坡度的增加而降低。整体上,流域坡度回归系数是由西北、南部向流域东北方向过渡逐渐降低,而坡度对土壤有机碳积累的抑制作用则逐渐增强。坡度大小影响坡上水分和可溶性盐分以及土壤颗粒向坡下运移的速度和数量,影响土壤生物过程和化学过程,改变相应土壤性质^[22];从土壤侵蚀的角度上很好理解这一现象,随着坡度的增大,土壤颗粒固有重力将更有利于溅散土粒向下坡运动,同时坡度的增大,降低了土壤的稳定性,土壤抗蚀能力减弱^[23],伴随土壤侵蚀的发生,土壤中大量有机碳也随之发生迁移和破坏,导致地区坡度与土壤有机碳的积累普遍呈现负相关性。

越靠近流域东北部坡度回归系数绝对值就越大,表明越靠近流域东北部,坡度对土壤有机碳密度影响的程度越大;从局部分析,流域坡度回归系数的条带分布较为均匀,坡度对土壤有机碳密度的影响并不存在极端敏感区域。这可能是由于流域整体属于低山丘陵区,坡度起伏不大,在 $0.24\sim 18.23^\circ$,平均坡度为 7.88° ,对流域土壤有机碳的影响呈现出相对均匀的变化趋势。

2.3.3 NDVI对土壤有机碳密度的影响分析

流域内NDVI是影响土壤有机碳密度的第3大驱动因子,地上植物对土壤养分的补充和供应是陆地生态系统能量循环和物质流动的重要环节之一,NDVI的大小直接反映地区植被的生长状况的好坏,而植被对土壤有机质的直接补充和供给是土壤有机碳的重要来源之一。如图2(c)所示,NDVI对土壤有机碳密度的影响呈正相关,回归系数在 $1.37\sim 1.45$,土壤有机碳密度随着NDVI的增加而增加。

流域中心与流域西北部呈岛状分布NDVI回归系数的低值区,流域南部与东北部NDVI的回归系数呈现较高分布。NDVI回归系数的分布与流域植被和耕作区的分布情况有明显关系,流域中心位置由于受萨力巴西山影响,植被以天然次生林为主,植被盖度较低,地表多以大块砾石覆盖,土壤养分含量较低,NDVI值在这一区域极低,以致这一区域范围的NDVI回归系数出现低值的岛状分布现象。而流域南部和东北部则主要分布着大面积高产玉米田和山杏、油松等乔灌混交林,具有良好的保持水土,固碳释氧能力。

2.3.4 DIST对土壤有机碳密度的影响分析

流域内DIST是影响土壤有机碳密度的最小因子。如图2(d)所示,DIST对土壤有机碳密度的影响呈正相关,回归系数在 $0.15\sim 0.47$,呈斑块状分布,土壤有机碳密度随着DIST的增加而增加,即越远离道路和村庄DIST回归系数越大。流域内DIST回归系数的分布并无明显规律,这是由于流域内道路交错网状分布,村庄点状零散分布,其分布并无过渡的层次特点,DIST的回归系数分布也呈分散的斑块状分布。

道路和村庄由于长期受人类活动影响,对土壤和植被破坏严重,人为改变原有土壤有机碳的分布规律,而产生以人类活动区为中心向外逐级增大的DIST回归系数斑块状分布。村庄作为人类生产生活活动的活跃区域,呈不规则斑块分布在流域内,越远离村庄,流域受人为干扰程度越弱,而道路是形成流域内DIST回归系数的斑块切割的主因,远离道路,土壤遭受人畜,车辆踩踏程度越轻,而不影响土壤团粒结构,保持土壤有机碳的固持能力。

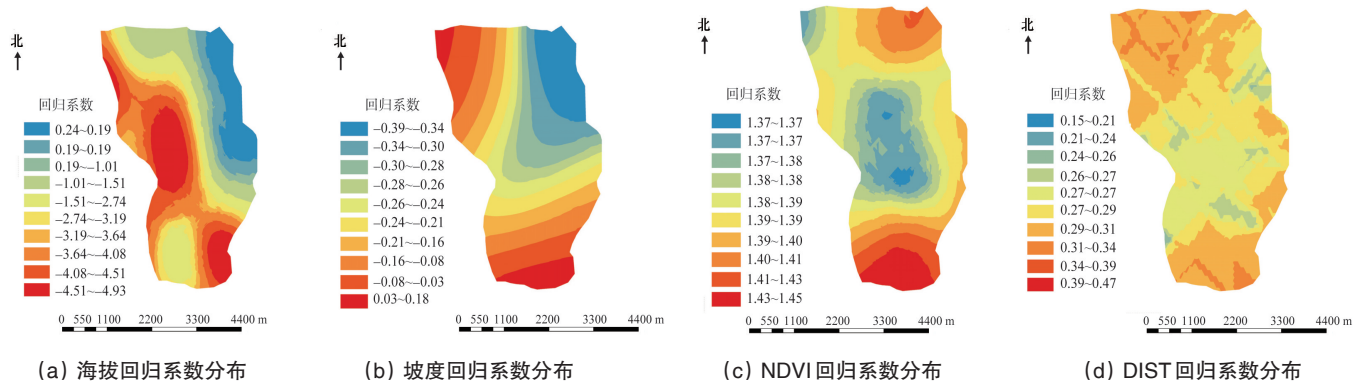


图2 研究区各环境因子与土壤有机碳密度的回归系数分布

Fig. 2 Regression coefficient distribution of the environmental factors and soil organic carbon density of study area

3 讨论

3.1 环境因子影响

采用地理加权回归模型对土壤有机碳的影响因子进行拟合,各因子对土壤有机碳的影响局部差异较大。其中海拔与坡度因子对有机碳的影响在研究区不同位置呈现出不同的正、负相关性。唐国勇等^[24]对红壤丘陵景观的表层土壤有机碳研究中提出,土壤有机碳随着海拔的增高而降低,其分

析原因可能是土壤侵蚀和耕作制度的不同导致水分差异而引起的。这与本研究得出的结论基本相同,从宏观上看,研究区内海拔与土壤有机碳的线性关系为显著负相关;相关性分析表明,海拔与坡度对土壤有机碳密度均呈显著相关,相关系数分别为 -0.436 、 -0.223 。但是也有分析提出相反意见,杜有新等^[25]对庐山不同海拔森林土壤有机碳密度的研究中发现,土壤有机碳密度随着海拔高度的增加而增加,认为海拔

升高后温度降低,分解降低,有助于有机质的累积。对比发现,由于庐山海拔1474 m,海拔跨度从270~1070 m,研究以200 m为一个海拔梯度进行分析,因此1000余米的海拔差导致了山顶与山脚明显的温度差异和植被的垂直地带性分布。而本研究区的实际情况并非如此,在400~800 m这一海拔范围内,山上山下温差并不明显,山顶以天然次生灌木为主,山脚多分布农田和人工林,加之人为管护施肥等因素,山脚下植被茂盛,生物量丰富,而山顶土壤极为贫瘠,以大块岩石为主,地表大面积裸露,植被盖度极低,且位于半干旱区,光照强度大,因此分析认为是光照强度影响土壤有机碳的积累,导致了海拔与土壤有机碳在大部分地区呈现负相关性。

而GWR模型分析结果表明,海拔与坡度对土壤有机碳密度的影响在不同区域回归系数也存在正负差异,这是由于相关分析是从整个流域分析,整体上,海拔和坡度与土壤有机碳密度负相关,反映宏观上影响因子对土壤有机碳影响的总趋势,而小范围存在的正相关关系并不能左右整体相关分析的结果。GWR分析是针对不同区域单独建立加权回归方程,流域内任何点位上各影响因子与土壤有机碳密度的相关关系都有单独回归系数与之一一对应,流域内局部小范围区域海拔与土壤有机碳呈正相关,从其分布位置看,正相关区域分布在流域东北部,且这一地区海拔较低、变化平缓,局部地势低洼,由于人为不合理的灌溉措施,导致灌溉淤积,在这一地区形成局部盐碱化,使得土地生产力下降,地势低洼地区对土壤有机碳的积累产生负面影响。GWR分析将普通的相关分析所忽略的细节重新呈现,而使得小范围的正相关关系得以体现,这也体现了GWR在局部特征描述上具有明显优势。

本研究认为,除极端区域外,海拔、坡度对土壤有机碳密度的回归系数均为负值,这与笔者对该流域土壤有机碳密度空间变异特征的研究中得出的结论基本一致^[22]。陈海滨等^[26]的研究同样认为中海拔地区较低海拔和高海拔地区的土壤有机碳密度大,呈单峰型曲线。然而,在对坡度的分析中,与笔者之前的研究略有不同。本研究从局部分析,发现坡度对土壤有机碳密度的影响在流域西北和南部存在正相关区域,这一研究结果与贾松伟^[27]的研究较为相似,从土壤侵蚀的角度较好地解释了这一现象。而之前笔者对该流域空间变异的研究中,采用地统计学结合普通回归分析模型并未体现局部坡度的正回归系数,表明整体分析流域影响因子与有机碳的作用关系常常忽略局部细节,本研究的发现是对以往的补充,将更好地说明土壤有机碳密度的变异特征。

NEVI和DIST对土壤有机碳密度的影响较小,二者的回归系数均较小且波动范围较窄,这也说明植被生长与人为活动在对土壤有机碳的作用过程中起辅助作用,这可能是由于植被与土壤的物质交换是一个长期而缓慢的过程,对土壤有机碳的影响存在一定滞后性。而人为因素对土壤的干扰随机性较强,稳定性差,相对自然因素二者对土壤有机碳的影响较弱。

综上所述,土壤有机碳密度受自然因素和人为因素综合作用的影响,而从其影响的剧烈程度而言,以海拔和坡度为主的自然因素对土壤有机碳密度的影响起着主导作用,植被生长状况次之,人畜活动践踏土地对有机碳的影响最弱。从各环境因子与土壤有机碳的相关系数也表明,海拔与坡度对土壤有机碳密度影响更为明显。这也说明研究区土壤有机碳的空间变异主要是由结构性因素引起的,以人为活动为主的随机性因素对土壤有机碳的影响相对较弱,研究区地形地貌在长期稳定的条件下与土壤建立起相对稳定的平衡关系,海拔与坡度的变化直接影响局部土壤的水热平衡,形成区域差异,是导致土壤有机碳变化的直接诱因。相比之下,人为活动对土壤的影响随机性较大,难以形成长期稳定的干预,因此在研究区尚不能作为土壤有机碳的主导影响因素。

3.2 环境因子的筛选

在进行GWR模型拟合时,最终确定海拔、坡度2种典型的地形因子和NDVI植被因素、DIST人为因素共计4项驱动因子进行分析。然而在模拟初期设想引入土壤容重、含水率、土壤pH值等指标一同拟合方程,实际操作中发现各驱动因子多重共线性问题严重,引入新的指标非但不能提高模型拟合精度,反而使其模型的决定系数大幅度下降。不合宜的指标选用可能会带来预测结果异常,甚至会造成预测错误^[23]。因此,本文经过细致筛选最终确定4项环境因素作为驱动因子拟合模型,并得出驱动因子对土壤有机碳密度的影响程度由高到低为海拔>坡度>NDVI>DIST。目前GWR模型在环境科学领域的应该并不多见,其主要在经济地理学中发挥较为突出的作用,而经济地理在指标的选择上往往位置性突出,影响关系单一,通常是以与驱动因子的距离远近而定,这样就大大避免了自变量的多重共线性问题^[28]。在驱动因子选择中,笔者也试图选择一些与土壤有机碳密度关系更为密切的因素,如土壤母质、土地利用类型等等,然而目前还无法找到一个合适的方法将这些定性的指标进行定量化描述,因而本文为选用定性化指标进行分析,这一问题也有待日后的进一步讨论。

4 结论

采用GWR模型分析黄花甸子小流域主要环境因素对土壤有机碳密度影响的空间差异。所选驱动因子对模型拟合的能够满足精度要求,影响因子对土壤有机碳密度的影响程度由高到低表现为海拔>坡度>NDVI>DIST。除少数地区海拔、坡度与土壤有机碳密度呈现正相关,流域多数地区的海拔、坡度对土壤有机碳密度的回归系数为负值,土壤有机碳密度随着海拔的增高、坡度的加大而降低;NDVI、与土壤有机碳密度呈现正相关,土壤有机碳密度随着NDVI值的增高、DIST值的加大而降低。

影响土壤有机碳密度的因素复杂多样,空间变异性较强,GWR的局部分析更能深入挖掘其内在变化特征,同时一些定性因素同样发挥着十分重要的作用,在下一阶段的工作

中还需对模型逐步修正。准确了解土壤有机质的空间分布是合理施肥的重要前提,进一步量化环境指标对土壤有机碳密度正负向影响的实际阈值,最终为因地制宜地开展精准化农业提供理论依据。

参考文献 (References)

- [1] 陈泮勤. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
Chen Panqin. Carbon cycle of the earth's system[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因素[J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 687-699.
Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(5): 687-699.
- [3] Tu J, Xia Z G. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: Model design and evaluation[J]. Science of the Total Environment, 2008, 407: 358-378
- [4] 吴建国, 张小全, 徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳贮量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(4): 593-599
Wu Jianguo, Zhang Xiaoquan, Xu Deying. Impact of land-use change on soil carbon storage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (4): 593-599.
- [5] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. 地理研究, 2007, 26(6): 1078-1086.
Xu Xinwang, Pan Genxing, Cao Zhihong, et al. A study on the influence of soil organic carbon density and its spatial distribution in Anhui Province of China[J]. Geographical research, 2007, 26(6): 1078-1086.
- [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 Mingsong, Zhang Ganlin, Wang Decai, 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] 覃文忠, 王建梅, 刘妙龙. 地理加权回归分析空间数据的空间非平稳性[J]. 辽宁师范大学学报:自然科学版, 2005, 28(4): 476-479.
Qin Wenzhong, Wang Jianmei, Liu Miaolong. Spatial nonstationarity of geographically weighted regression analysis of spatial data[J]. Journal of Liaoning Normal University: Natural Science Edition, 2005, 28(4): 476-479.
- [8] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [9] 邵一希, 李满春, 陈振杰, 等. 地理加权回归在区域土地利用格局模拟中的应用——以常州市孟河镇为例[J]. 地理科学, 2010, 30(1): 92-97.
Shao Yixi, Li Manchun, Chen Zhenjie, et al. Simulation on regional spatial land use patterns using geographically weighted regression: a case study of Menghe town, Changzhou[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(1): 92-97.
- [10] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海: 同济大学图书馆, 2007.
Qin Wenzhong. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [11] 曹天邦, 黄克龙, 李剑波, 等. 基于GWR的南京市住宅地价空间分异及演变[J]. 地理研究, 2013, 32(12): 2324-2333.
Cao Tianbang, Huang Kelong, Li Jianbo, et al. Research on spatial variation and evolution of residential land price in Nanjing based on GWR model[J]. Geographical Research, 2013, 32(12): 2324-2333.
- [12] 颜峻. 经济发展对工伤事故水平影响的空间异质性研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(5): 145-150.
Yan Jun. Study on Spatial heterogeneity of economic development's impact on work-related accidents level[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(5): 145-150.
- [13] 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 Wenyi, Guo Shengli. 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.
- [14] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M, et al. Geographically weighted regression- modelling spatial non- stationarity[J]. Society, 2010, 47(3): 431-443.
- [15] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Spatial nonstationarity and autoregressive models[J]. Environment and Planning A, 1998, 30 (6): 957-973.
- [16] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression[M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [17] 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.
Zhang Yuming, Mao Renzhao, Hu Chunsheng, et al. Spatial variability of farmland soil nutrients at Taihang piedmont[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2049-2054.
- [18] 杨扬, 杨建宇, 李绍明, 等. 玉米倒伏胁迫影响因子的空间回归分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 244-249.
Yang Yang, Yang Jianyu, Li Shaoming, et al. Spatial regression analysis on influence factors of maize lodging stress[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 244-249.
- [19] 牟娟. 基于GWR模型的经济空间分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010.
Mu Juan. Spatial analysis of the economic based on GWR mode[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2010.
- [20] 马瑛. 基于地理加权回归模型的农用地地价格空间结构研究[M]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
Ma Ying. The spatial structure of agricultural land price based on GWR model[M]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [21] 王库. 地理权重回归在土壤pH空间预测中的应用[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(1): 73-79.
Wang Ku. Application of geographically weighted regression on the spatial prediction of soil pH[J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences Edition, 2013, 39(1): 73-79.
- [22] 李龙, 吴丽芝, 姚云峰, 等. 小流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究——以内蒙古赤峰市黄花甸子流域为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 18-23.
Li Long, Wu Lizhi, Yao Yunfeng, et al. Spatial variations of organic carbon in small watershed- Taking Huanghuadianzi watershed as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 18-23.
- [23] 王库. 基于地理权重回归模型的土壤有机质空间预测[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 21-28.
Wang Ku. Spatial estimation of soil organic matter by using geographically weighted regression mode[J]. Chinese Journal of Soil

- Science, 2013, 44(1): 21-28.
- [24] 唐国勇, 黄道友, 黄敏, 等. 红壤丘陵景观表层土壤有机碳空间变异特点及其影响因子[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 753-759.
Tang Guoyong, Huang Daoyou, Huang Min, et al. Spatial variations of organic carbon in surface soils in a hilly landscape of the red-earth region and their affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 753-759.
- [25] 杜有新, 吴从建, 周赛霞, 等. 庐山不同海拔森林土壤有机碳密度及分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1675-1681.
Du Youxin, Wu Congjian, Zhou Saixia, et al. Forest soil organic carbon density and its distribution characteristics along an altitudinal gradient in Lushan Mountains of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1675-1681.
- [26] 陈海滨, 陈志彪, 陈志强. 南方红壤侵蚀区地形对土壤有机质空间分布的影响——以长汀县河田地区为例[J]. 福建农业学报, 2010, 25(3): 369-373.
Chen Haibin, Chen Zhibiao, Chen Zhiqiang. Impact of topography on spatial distribution of organic matters in red eroded soil in south China: A case study at hetian in Changting county[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2010, 25(3): 369-373.
- [27] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. 水土保持研究 2009, 16(2): 30-33.
Jia Songwei. Soil organic carbon loss under different slope gradients in loess hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(2): 30-33.
- [28] 吕萍, 甄辉. 基于 GWR 模型的北京市住宅用地价格影响因素及其空间规律研究[J]. 经济地理, 2010, 30(3): 472-478.
Lü Ping, Zhen Hui. Affecting factors research of Beijing residential land price based on GWR model[J]. Economic Geography, 2010, 30(3): 472-478.

Analysis on influence factors of soil organic carbon density using a geographically weighted regression model

LI Long¹, YAO Yunfeng¹, QIN Fucang¹, ZHANG Meili¹, GAO Yuhan¹, CHANG Weidong²

1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China
2. Forest Bureau in Aohan Banner, Chifeng 024300, China

Abstract This research was conducted in Huanghuadianzi watershed in Aohan Chifeng, Inner Mongolia. The influence factors of soil organic carbon density were mainly divided into human factors and natural factors; altitude, slop, normalized differential vegetation index (NDVI) and the shortest distance from path or the village (DIST) were selected as the influence factors. Based on field data samples of the study area, both remote sensing and geographic information system were applied. A geographically weighted regression model was used to study the spatial variations of soil organic carbon density and the different environmental factors. The results showed that the soil organic carbon density changed in the study area from 1.91 to 16.63 kg/m², with an average density 7.42 kg/m². The influence degrees of soil organic carbon density in different driving factors ranked as altitude > slop > NDVI > DIST. The influence of each factor on the soil organic carbon changed with spatial difference. Altitude and slope respectively showed a positive and negative correlation with soil organic carbon density. In general soil organic carbon density decreased with the increasing of altitude and slope in most of the study area and the correlation coefficients were -0.436 and -0.223, while positive effect were only in a few areas. On the other hand, the NDVI and DIST showed a positive correlation with soil organic carbon density, with the correlation coefficients of NDVI being from 1.37 to 1.45 and DIST being from 0.15 to 0.47. In order to analyze the spatial variation of each influence factor, a map of the regression coefficient distribution of the environmental factors and soil organic carbon density in the study area was provided, which provided a scientific basis for the efficient utilization of soil and the development of precision agriculture according to the local conditions.

Keywords soil organic carbon content; environmental factors; geographically weighted regression model; samll watershed; spatial variation
(责任编辑 吴晓丽)