

鄂西鄂河流域表层土壤有机碳时空变化及其影响因素

符雅盛, 张利华, 郑芸菁, 朱志儒, 马永明, 崔越

〔中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院地理系, 湖北 武汉 430074〕

摘要: [目的] 研究土壤有机碳(SOC)在小型丘陵山地集水区的分异规律及其影响因素,为土壤资源的可持续利用以及保护南水北调水源地提供科学依据。[方法] 基于数字高程、Landsat 8 OLI 影像和 2016—2018 年实测土壤有机碳等数据,运用相关分析、主成分分析法等研究湖北省十堰市鄂河流域表层土壤有机碳含量的时空变化,厘清其影响因子和主导因素。[结果] 鄂河流域 SOC 含量整体呈条带状分布的格局,由东北向西南逐渐增加,呈中等强度变异。夏秋两季 SOC 处于流失状态,而冬季 SOC 含量明显增加。不同质地 SOC 的平均含量:石灰性冲积土>筒育高活性淋溶土>不飽和锥形土。不同覆盖下 SOC 平均含量:农田>园地>混交林>针叶林>灌木。土壤 SOC 含量呈现随地表曲率绝对值增大而增大,随比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)增加而增加的趋势。[结论] 地形因子(地表曲率)是影响鄂河流域土壤有机碳的主导因子,植被因子(NDVI 和 RVI)是次要因子。改变局部小地貌、增加林种、改善水肥管理等措施均可以提高流域土壤有机碳含量。

关键词: 小流域; 鄂西地区; 土壤有机碳; 空间分布; 时空变化; 植被因子; 主成分分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0189-07

中图分类号: S153.6

文献参数: 符雅盛, 张利华, 郑芸菁, 等. 鄂西鄂河流域表层土壤有机碳时空变化及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 189-195. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.028; Fu Yasheng, Zhang Lihua, Zheng Yunqiang, et al. Temporal and spatial variation in soil organic carbon and its influencing factors in Jianghe small watershed of Western Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 189-195.

Temporal and Spatial Variation in Soil Organic Carbon and its Influencing Factors in Jianghe Small Watershed of Western Hubei Province

Fu Yasheng, Zhang Lihua, Zheng Yunqiang, Zhu Zhiru, Ma Yongming, Cui Yue

(School of Geographic and Information Engineering, China University of Geosciences, Hubei, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Objective] The law of soil organic carbon (SOC) differentiation and its influencing factors in small hilly and mountainous catchment areas was studied to provide a scientific basis for the sustainable utilization of soil resources and the protection of water sources of the South-to-North water diversion project. [Methods] The spatial and temporal distribution and influencing factors of SOC in the Jianghe watershed, Shiyan City, Hubei Province were analyzed, based on the digital elevation models (DEM), Landsat 8 OLI products, and measured SOC data from 2016 to 2018. These were analyzed using a correlation analysis and principal component analysis methods. [Results] Regarding the spatial distribution, the SOC had a banded distribution and the concentration of SOC in northeast of the watershed was smaller than that in the southwest. The variability of the SOC was of a middle intensity. The SOC concentration decreased in summer and autumn, whereas it accumulated in winter. For different soil types, the SOC concentration exhibited the following order: calcareous fluvisols > haplic luvisols > dystric cambisols. For different landcover types, the SOC concentration exhibited the following order: farmland > garden plot > mixed forest > evergreen coniferous forest > deciduous

收稿日期: 2020-04-20

修回日期: 2020-07-02

资助项目: 国家自然科学基金项目:“影响坡面径流法河网提取精度的关键问题研究”(41201429); 生物地质与环境地质国家重点实验室自主课题:“鄂河流域水—土—生监测与生态水文过程模拟研究”(GKZ17Y651); 中央高校基本科研业务费“地学长江计划”核心项目:“清江流域喀斯特地区关键带现代过程监测”(CUGCJ1808)。

第一作者: 符雅盛(1995—), 男(汉族), 江苏省常州市人, 硕士研究生, 研究方向为环境遥感和小流域碳水循环过程研究。Email: yashengfu@qq.com。

通讯作者: 张利华(1974—), 女(汉族), 河北省内丘市人, 博士, 副教授, 主要从事流域环境演变分析和环境遥感的研究。Email: zhanglihua7483@163.com。

shrubs. The SOC increased along with the absolute value of the earth's surface curvature and the values of ratio vegetation index (RVI) and normalized difference vegetation index (NDVI). [Conclusion] The topographic factor is the main influencing factor of SOC concentrations in the Jianghe watershed, and vegetation factors (RVI and NDVI) were the second principal components for the SOC variation. The SOC concentration can be increased by changing local small landforms, increasing forest species, and improving water and fertilizer management.

Keywords: small watershed; Western Hubei Province; soil organic carbon; temporal and spatial variation; vegetation factors; principal component analysis (PCA)

土壤是陆地生态系统中最大的碳库^[1],是陆地植被碳库($5.00 \times 10^{11} \sim 6.00 \times 10^{11}$ t)的 2~3 倍,是全球大气碳库(7.50×10^{11} t)的 2 倍多^[2]。土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)包括植物、动物及微生物的遗体、排泄物、分泌物及其部分分解产物和土壤腐殖质。土壤有机碳的储量是植物残体进入土壤并受土壤微生物作用分解损失后的动态平衡结果^[3]。土壤碳是全球碳储量的重要组成,其固定及释出,不仅影响到陆地植被的养分供给,也影响了陆地生态系统的组成、结构、分布及功能,更对温室气体及全球气候变化具有重要影响^[4]。其库容大小受到气候、植被、土壤理化性质以及人类活动等诸多自然和人为因素的影响。深入研究 SOC 在小型丘陵山地集水区的分异规律及其影响因素对小流域碳循环、碳分配以及防止森林 SOC 流失、土壤肥力退化具有重要意义。

中外学者在土壤有机碳储量、密度、空间分异、时间变化及其影响因子等方面做了大量研究,对全球土壤碳库和碳循环研究具有借鉴意义。全球主要生态系统及土壤剖面的土壤有机碳库研究已较成熟,不同模型和方法的计算结果无数量级差异。区域插值模型、回归拟合模型和机器学习等模型被较多的运用于土壤有机碳含量的估算^[5]。空间变异性、依赖性以及各环境因子对土壤有机碳的影响可以被用来认识和研究其含量^[6]。当前,随着研究程度的加深和研究对象的细化,中小尺度的土壤有机碳空间分异和动态变化及其影响因素的研究尚存在一些不足。小尺度的土壤有机碳研究集中在单一土地覆盖类型下土壤有机碳含量与海拔、地形之间的关系^[7]。首先,传统的有机碳空间分布预测局限于土壤普查等历史数据,数据陈旧、更新慢、时间分辨率低。全国土壤普查在小流域尺度的实测剖面不足,空间分辨率低。其次,目前的研究多以土地利用、生态类型和地貌类型为研究对象,研究较多的有耕作模式、植被类型以及生境对土壤有机碳含量的影响。对于地表复杂、山体破碎的小流域尺度土壤 SOC 的影响因子的研究还不够充分。此外,人类活动的规模不断扩大,地表植被的非自然演替以及土地利用使得传统方法不再具有普适

性。小流域尺度的研究区还有着地表形态复杂、人为活动强度大、土壤变异性强等特点,地形的复杂弱化了空间自相关,地统计方法的效果被削弱。

本文基于野外工作、实验室测定、遥感影像解译和地形因子计算,研究环境变量对土壤有机碳含量的影响;通过地统计分析研究区土壤有机碳变异特征,引入植被、地形等因子进行拟合,比较其相关性并作主成分分析,确定研究区土壤有机碳含量时空变化的影响因子和主导因素,以期为当地和类似区域的水土保持提供科学建议。

1 研究区概况

颶河位于丹江口水库上游 100 km 处,是堵河的一级支流,发源于十堰市张湾区大独岭,东西流向,在十堰市黄龙镇东湾村附近汇入堵河,干流全长 25 km 左右。颶河流域跨越东经 $110^{\circ}31'42''$ — $110^{\circ}43'24''$,北纬 $32^{\circ}29'51''$ — $32^{\circ}42'32''$,流域面积 326 km²,是南水北调中线工程的重要水源地之一。流域地处秦巴山区东延余脉,位于大巴山和武当山之间,地势南高北低,自西南向东北倾斜,间有河谷平地,海拔集中在 150 m 到 1 100 m 之间。流域地层以中元古界武当山群为主,岩性为浅变质岩系,以石英片岩为主。流域土壤质地以壤质砂土为主,流域气候属亚热带季风性气候,多年平均气温为 15.4 ℃,多年平均降水量为 769.6 mm,年总平均降水日数为 115~120 d。流域属于北亚热带和温带过渡区的自然生态系统,森林覆盖率近 80%,既具有保存完整的原生林,也具有次生经济林和涵养水源林,植被类型以常绿针叶林、落叶阔叶灌木和针阔混交林为主。

2 材料与方 法

2.1 数据来源与处理

基于 ArcGIS 的水文分析模块对十堰市 ALOS World 3 D-DSM(空间分辨率为 30 m,下载于 http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3_d30/)进行水文分析,获得颶河流域的流域边界,以颶河流域的 ALOS World 3 D-DSM 和 2017 年 3 月的 Landsat8-

OLI 影像(下载于 <http://www.gscloud.cn/>)为基础资料,提取鄂河流域的主要水系(见封 2,附图 4)和土地覆盖类型(见封 2,附图 5)。使用 ENVI 的地形模块计算坡度、坡向、剖面曲率、横向曲率、纵向曲率和水平曲率。提取植被指数包括经典的归一化植被指数(NDVI)和比值植被指数(RVI)。将鄂河干流及其支流分为上游、中游、下游 3 个部分进行土壤样品采集(见封 2,附图 4):样品采集时间为 2017 年 1、6 月和 10 月以及 2018 年 1 月,共采集表层土壤样品 100 个;土壤采集样区的土地覆盖方式以针叶林、阔叶灌木和农田为主(见封 2,附图 5),采集深度均为去除枯枝落叶层后 10—15 cm,每个样区面积为 5 m×5 m,均采集四角及对角线中心点的样品进行混合,然后采用四分法采集总量均为 1 000 g 左右的混合样品装入样袋并进行记录,回室内后自然风干研磨过筛(0.25 mm)备用。土样 SOC 含量由中国地质大学(武汉)地球科学学院的总有机碳分析仪(德国 Elementar 公司的 vario TOC)进行分析和测定。

表 1 4 期土壤有机碳含量描述性统计特征

采样时间	样本数量	范围/ (g·kg ⁻¹)	均值/ (g·kg ⁻¹)	标准差/ (g·kg ⁻¹)	变异 系数/%	偏度 系数	峰度 系数	显著性
201701	10	3.97~27.21	9.843	6.747	68.55	2.12	5.562	0.003
201706	17	1.44~20.06	9.58	4.85	50.64	0.14	0.22	0.20
201710	27	5.54~14.91	9.42	2.97	31.51	-1.20	0.33	0.07
201801	46	0.6~27.08	12.57	6.11	48.63	-0.29	0.10	0.20

Kolmogorov-Smirnov 检验(K-S 检验)是一个比较频率分布 $f(x)$ 与理论分布 $g(x)$ 或者两个观测值分布的检验方法。K-S 检验是一种适用于小样本的非参数检验方法。根据 K-S 检验结果,有 3 期样本的显著性大于 0.05,满足正态分布,为后续地统计分析提供参考。

3.1.2 土壤有机碳的地统计空间分布模拟 描述性统计可以描述数据的总体分布特征,但无法准确反映土壤有机碳的空间变异结构。地统计学基于参数估计和假设检验的思想,既考虑样本值的大小,又重视样本空间位置及样本间的距离,弥补了经典统计学忽略空间方位的缺陷。因此采用地统计学方法对研究区 SOC 含量的结构性与随机性进行定量描述。2018 年 1 月样本分布最均匀,且样本数量较大,因此选择该期样本进行克里金插值,拟合全流域的土壤有机碳分布状况。

分别用高斯模型和指数模型对半变异函数点云进行拟合并制图,并比较两种模型生成的预测图的优劣,比较的统计指标见表 2。对比表 2 中的数据,确定高斯模型作为最适模型。插值结果(见封 2,附图 6)示,鄂河流域土壤有机碳含量的低值出现在阳南沟上游—鲍花沟中游—安沟下游—安沟一线以北以及财

2.2 研究方法

用地统计的克里格模型预测研究区土壤有机碳含量的空间分布并作误差分析,用 SPSS 软件作影响因子的非线性拟合以及主成分分析。

3 结果与分析

3.1 描述性统计和地统计分析

3.1.1 土壤有机碳含量的描述性统计 土壤有机碳含量的描述性统计是一种能够反映土壤有机碳含量基本特征的统计学方法。土壤样品分为 2017 年冬(2017 年 1 月),2017 年夏(2017 年 6 月),2017 秋(2017 年 10 月),2018 冬(2018 年 1 月)共 4 期,次年春季的土样因实验室仪器损坏而损毁。根据 SPSS 描述性统计及正态检验结果(见表 1),土壤有机碳含量的变异系数大于水体有机碳,因为土壤质地、覆盖类型和地形因素等都对土壤有机碳有影响。总体而言,变异系数由大到小依次为:冬季、夏季、次年冬季、秋季。

神沟中游地区;土壤有机碳含量的中等水平分布在大西沟下游、鲍花沟下游、鄂河中下游低坡地区;土壤有机碳含量的高值分布在大西沟上游及财神沟上游以南的山地地区。由附图 7 可知:鄂河中游以西—阳南沟鲍花沟中游以南—大西沟和财神沟中游以北地区预测误差小,预测误差最大处主要在大西沟和枳堰沟上游及以南山区。当模型非常适合用于生产和制图时,预测误差的平均值应趋于 0,标准均方根趋于 1,均方根以及平均标准误差应尽可能小。高斯模型的参数如下:块金值 $C_0=36.762$,偏基台 $C=0$,变程 $=0.217$,方向 $=9^\circ$ 。空间异质比为块金值/基台值,用于衡量随机因素和结构性变异对土壤空间分异性的影响。 $C_0/(C+C_0)=1>0.75$,说明土壤有机碳的空间相关性极弱,即距离不是土壤有机碳含量发生空间变异的主导因子,其变异主要由结构性因素和随机性因素导致。

表 2 克里金交叉验证参数

模型类型	平均值	均方根	标准 平均值	标准 均方根	平均标准 误差
高斯模型	-0.297	7.886	-0.048	1.281	6.159
指数模型	-0.440	8.332	-0.084	1.588	5.246

3.2 影响土壤有机碳的因素分析

影响土壤有机碳含量的结构性因素和随机因素主要有土壤质地、土地覆盖、植被等环境因子以及海拔、坡度、坡向、地表曲率等地形因子。

3.2.1 土地覆盖 根据由犇河流域采集得到的 46 个表层土壤样品的 SOC 含量数据以及流域土地利用数据,采用描述性统计分析方法得到如表 3 所示的统计结果。

表 3 不同土地利用方式下土壤有机碳含量统计特征

土地利用类型	样本数量	范围/ (g · kg ⁻¹)	均值/ (g · kg ⁻¹)	标准差/ (g · kg ⁻¹)	变异系数/ %	偏度系数	峰度系数
灌木	17	2.90~31.62	11.61	6.62	57.02	1.64	4.68
混交林	9	5.22~38.51	15.08	9.89	65.56	1.84	4.35
园地	4	0.60~31.47	16.92	13.31	78.67	-0.32	-1.03
农田	11	1.88~34.86	17.42	9.54	54.75	-0.01	0.26
针叶林	5	7.45~22.86	13.26	6.10	46.02	1.09	1.09
合计	46	0.60~38.51	14.32	8.62	60.19	0.92	0.83

犇河流域 SOC 含量为 14.32 ± 8.62 g/kg,不同土地利用下 SOC 含量差异不显著($p > 0.01$)。其中,农田 SOC 含量的均值最大,园地、混交林和针叶林次之,灌木最小。不同的土地利用方式会直接导致地表覆被的改变,植被覆盖越高,枯枝落叶堆积越多,有利于表层土壤有机碳的富集。土壤 SOC 的含量存在显著差异。园地受人为因素影响严重,生活污水的倾倒和排放也间接给作物提供肥力。作物不同,对农田进行施肥、播种、松土等活动的频次和强度不同,使得农田的土壤有机碳含量的差异也较大。由此可见,农田

和园地受人为因素影响最大。比农田的土壤有机碳含量稍低的是混交林,混交林整体的土壤有机碳水平较针叶林高。混交林中的树种有杉树、竹、杨树、泡桐树等,由于生物群落复杂,生态系统稳定性高,有利于土壤有机碳的生成与积累^[8]。

3.2.2 土壤类型 成土过程、发育程度及耕作管理措施的差异形成了不同的土质类型,不同土质的理化性质也存在不同。石灰性冲积土的土壤有机碳含量相对较高,筒育高活性淋溶土和不饱和雏形土的土壤有机碳含量接近(见表 4)。

表 4 不同土壤类型的土壤有机碳含量统计特征

土壤类型	样本数量	范围/ (g · kg ⁻¹)	均值/ (g · kg ⁻¹)	标准差/ (g · kg ⁻¹)	变异系数/ %	偏度系数	峰度系数
石灰性冲积土	13	0.60~27.08	14.34	8.60	59.97	-0.206	-1.052
筒育高活性淋溶土	14	3.41~18.26	12.02	4.18	34.78	-0.716	-0.209
不饱和雏形土	19	2.90~20.53	11.36	6.10	46.02	0.061	-0.863

3.2.3 坡度 分析 4 期土壤样品有机碳含量与坡度的 Pearson 线性相关性,发现仅 2017 年夏季样本相关系数为 0.618($p < 0.05$),即土壤有机碳含量随坡度的增加而增加,其他几期并无明显规律。其中,线性模型为最优拟合模型,模型表达式为: $Y = 6.067 + 0.299 X$,表明其有机碳含量随坡度的增加而增加(见表 5)。

3.2.4 土层深度 课题组于 2018 年在流域东部的头堰水库采集样本,样点位于人迹罕至的山坡坡顶,排除了人为干扰,植被覆盖为针叶阔叶混交林,坡度为 42°。去掉枯枝落叶层后的土壤厚度为 25 cm。以 5 cm 为一个单位厚度采集同一剖面的土样 5 个,测得其土壤有机碳的含量分别为 5.22 g/kg(0—5 cm), 15.57 g/kg(5—10 cm), 38.51 g/kg(10—15 cm), 19.17 g/kg(15—20 cm), 8.93 g/kg(20—25 cm)。该剖面土壤有机碳含量的平均值为 17.48 g/kg,且随土壤厚度的加深有先增后减的趋势。

3.2.5 坡位 在头堰水库的 42°坡的坡中采集土样,覆盖为针阔叶混交林,其土壤有机碳含量为 14.34 g/kg;在坡脚采集土样,土地覆盖为灌丛,测得其土壤有机碳平均值为 13.99 g/kg。坡顶、坡中、坡底的土壤有机碳含量接近,有不明显的递减趋势。

表 5 2017 年夏季土壤有机碳含量与坡度回归拟合模型

模型	回归方程	R ²	p
线性	$Y = 6.067 + 0.299X$	0.382	$p < 0.05$
对数	$Y = \log 4.116X + 0.367$	0.371	$p < 0.05$
二次项	$Y = 5.934 + 0.319X - 0.001X^2$	0.382	$p < 0.01$
立方	$Y = 0.114 + 1.979X - 0.12X^2 + 0.002X^3$	0.453	$p < 0.1$
幂	$Y = 2.767 + X^{0.491}$	0.364	$p < 0.05$

3.2.6 植被指数 秋季是利用遥感影像光谱信息评估不同植被生长状况的最佳观测时期。经预处理后计算出归一化植被指数 (NDVI) 和比值植被指数 (RVI) (见图 1)。NDVI 和 RVI 都是反映植被长势和营养信息的重要指标之一,前者在低植被区的敏感性强,在植被覆盖度高 (50%) 的地区敏感性降低,而 RVI 对高植被覆盖度下的植被差异响应明显。归一化植被指数图中亮色为低值,暗色为高值;图 1 中显示鄂河流域除了鄂河干流、流域靠近市区的东北部以及南北数条沟内为非植被,其余地区都覆有植被。

比值植被指数图中颜色越暗,植被越密、长势越好。由图 1 可知 RVI 以鄂河干流为轴向两侧逐渐增加,而南北两侧又沿着沟向两侧山坡逐渐增加。由于鄂河南部的面积比鄂河北侧部分的面积大,人类活动少,海拔差异也越大,植被表现出一定程度的差异:鄂河南侧东北部头堰水库附近有较多人工种植的次生针叶林,财神沟海拔中游和上游海拔 700 m 以上为原生针叶林,中游海拔 500~700 m 以下为原生针叶林灌木混交林,下游与头堰水库一致,为次生针叶林。

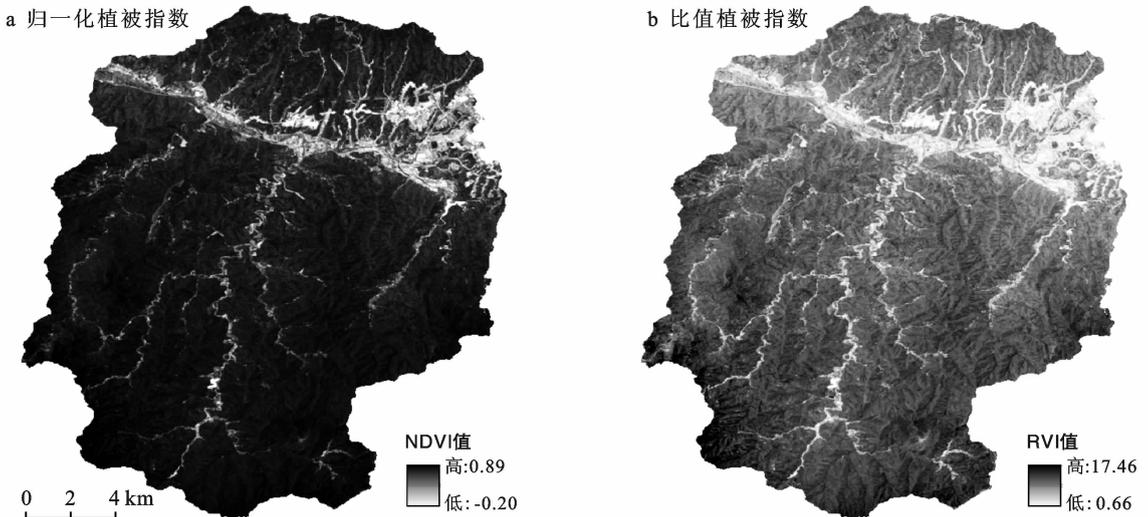


图 1 鄂河流域植被指数分布

(1) NDVI 值。秋季土壤样本与 NDVI 存在中等程度的正相关 (相关系数为 0.49, $p < 0.01$), 即土壤有机碳含量随 NDVI 的增加而增加 (见表 6)。

(2) RVI 值。秋季土壤样本与 RVI 存在强正相关 (相关系数为 0.494, $p < 0.05$), 即土壤有机碳含量随 RVI 的增加而增加 (见表 7)。

表 6 2017 年秋季土壤有机碳含量与坡度回归拟合模型

模型	回归方程	R^2	p
线性	$Y = -3.968 + 17.56X$	0.294	$p < 0.05$
对数	$Y = \lg 8.265X + 11.086$	0.222	$p < 0.05$
二次项	$Y = 24.423 - 87.26X + 91.162X^2$	0.49	$p < 0.01$
立方	$Y = 15.819 - 37.31X + 52.987X^3$	0.488	$p < 0.01$
幂	$Y = 10.146 + X^{1.189}$	0.165	$p < 0.1$

表 7 2017 年秋季土壤有机碳含量与 RVI 回归拟合模型

模型	回归方程	R^2	p
线性	$Y = 0.085 + 1.392X$	0.445	$p < 0.01$
对数	$Y = \lg 6.011X - 2.123$	0.362	$p < 0.01$
二次项	$Y = 5.589 - 0.948X + 0.212X^2$	0.488	$p < 0.01$
立方	$Y = 0.710 + 2.551X - 0.529X^2 + 0.047X^3$	0.494	$p < 0.05$
幂	$Y = 11.484 + X^{0.879}$	0.278	$p < 0.05$

3.2.7 地表曲率 地面曲率是度量地形表面单位点的扭曲变化程度的重要因子,是地面复杂程度以及地面切割破碎程度的体现。垂直方向上的分量称为剖面曲率,水平方向上的水平曲率。

水平曲率是等高线方向的变化率,即坡向的变化率,它是一个反映等高线弯曲程度的指标,反映了坡向的变化。剖面曲率是指地面上任意一点位地表坡度的变化率,即垂直方向上地形的凹凸变化。经过线性和非线性拟合,在 2017 年 1 月和 6 月的样本中均发现土壤有机碳含量随地表曲率绝对值的增大而增加的规律。使用线性、指数、对数等模型进行拟合分析,结果表明指数函数的拟合效果优于其他函数,最优拟合模型的参数见表 8。而秋季和次年冬季的样本并无明显规律。2017 年秋季发生持续性降水,鄂河干流水位达到 1986 年以来的最高值,土壤有机碳流失加重;2018 年冬季采样主要目的是分析不同土地利用方式对土壤有机碳的影响,因此土壤有机碳含量更多的受土地利用方式控制。

3.2.8 主成分分析 土壤有机碳含量的影响因子颇

多,且各因子之间相互关联,相互作用。用“降维”思想对各影响因子做主成分分析(见表 9)。主成分对应特征值大于 1 是主成分分析的原则。由表 9 可知,最终主成分的特征值分别为 3.997,1.818,即原始变量

的信息量分别被扩大了 3.997,1.181 倍,其中前两个主成分指标的贡献率分别达到 66.228%和 30.294%,累计能够解释所有原始变量信息的 96.582%,且特征值均大于 1,达到主成分分析的要求。

表 8 鄂河流域表层土壤有机碳含量与地表曲率回归拟合模型

地表曲率	时间	最优拟合模型的回归方程	R^2	p
水平曲率	201701	$Y = -(9.146 \text{ E}-10)X^3 + 0.000564 X^2 + 6.286$	0.899	$p < 0.01$
	201706	$Y = -(1.28 \text{ E}-09)X^3 - (9.84 \text{ E}-07)X^2 + 0.006 X + 11.357$	0.584	$p < 0.05$
剖面曲率	201701	$Y = -(2.46 \text{ E}-07)X^3 + 0.029 X + 7.046$	0.896	$p < 0.01$
	201706	$Y = (5.16 \text{ E}-05)X^2 + 0.023 X + 9.578$	0.491	$p < 0.05$
横向曲率	201701	$Y = (3.72 \text{ E}-05)X^2 - 0.011 X + 8.285$	0.84	$p < 0.01$
	201706	$Y = (8.54 \text{ E}-05)X^2 - 0.015 X + 7.506$	0.636	$p < 0.001$
纵向曲率	201701	$Y = (1.4 \text{ E}-07)X^3 + (1.59 \text{ E}-05)X^2 + 0.004 X + 8.984$	0.849	$p < 0.01$
	201706	$Y = (8.02 \text{ E}-05)X^2 + 0.025 X + 8.663$	0.598	$p < 0.01$

表 9 土壤有机碳含量影响因子主成分的特征值和贡献率

主分量	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.977	66.288	66.288
2	1.818	30.294	96.582
3	0.122	2.035	98.617
4	0.073	1.222	99.838
5	0.009	0.151	99.989
6	0.001	0.011	100

根据表 10 可知,第一主成分由剖面曲率、横向曲率、水平曲率和纵向曲率决定,它们在主因子上的载荷分别为 0.982, -0.978, 0.963, 0.944, 是鄂河流域土壤有机碳的主导影响因子,而曲率是地形因子的反映;第二主成分由 NDVI 和 RVI 构成,它们在主因子上的载荷分别为 0.926, 0.904, 是鄂河流域土壤有机碳的次要解释变量,代表了植被因子。

表 10 地形和植被因素主成分因子载荷

影响因子	第一主成分载荷/%	第二主成分载荷/%
剖面曲率	0.982	-0.173
水平曲率	0.963	-0.021
纵向曲率	0.944	-0.288
横向曲率	-0.978	0.171
NDVI	0.312	0.926
RVI	0.376	0.904

4 讨论与结论

4.1 讨论

鄂河流域属于鄂西典型的丘陵山地小流域,山体破碎、地形起伏大。流域内土壤样本有机碳的平均含量为 11.39 g/kg, 低于全国平均值(22.28 g/kg); 变幅为 0.6~63.9 g/kg, 变异系数为 76.97%, 低于全国水平(96.10%), 最大值是最小值的 106.5 倍, 变异幅度较大, 具有强空间异质性。块基比为 1, 表明随

机部分引起的空间异质性占系统总变异的比率高, 即样本间的变异更多的是由随机因素引起, 而非距离, 因此 SOC 的空间自相关极弱^[9]。地统计结果表明土壤有机碳含量在水平空间分布上无明显趋势, 建立在地理学第一定律基础上的地统计学方法在山体破碎、地表形态复杂地区的适用性不强。

此外, 鄂河流域属于鄂西北丹江口水库周边山地丘陵水质维护保护区, 全区水土流失面积占区域国土面积的 29.10%, 研究区北部以中度侵蚀—强烈侵蚀—极强烈侵蚀为主, 南部沟谷也有条带状轻度侵蚀—中度侵蚀, 集中在城镇建设用地以及大西沟和枫堰沟内, 中部鄂河干流的侵蚀强度由东至西降低^[10]。仅有 7.77% 的土样的有机碳含量高于全国平均值, 土壤有机碳储存能力较弱。通常土壤中有机碳主要集中在土壤表层, 并随土层深度的增加而减少。人为耕作和管理可以提高土壤有机碳含量, 但不合理的土壤资源利用也会破坏土壤碳储量。鄂河下游以石灰性冲积土为主, 土壤类型样本均值和地统计插值都显示了高值。除了土壤类型因素, 下游较多的农田和园地, 即土地覆盖类型, 亦是区域高值出现的原因。季节尺度的 SOC 变化体现了低温下微生物活动分解作用减弱、SOC 得以保存, 而温度上升和降水增加都能加重 SOC 的消耗。

相关分析表明: 水平曲率、剖面曲率等地表曲率的绝对值以及 RVI 和 NDVI 两个植被指数都和土壤有机碳呈显著正相关关系。地表曲率能影响流水的侵蚀能力, 而流水是地表重力作用的主要营力之一, 地表曲率直接影响着降水对地表土壤的侵蚀强度, 进而影响土壤有机碳的流失, 但与此同时也促使泥沙中有机碳的富集^[11]。中等坡度与凹面剖面曲率和剖面曲率的组合导致了更高的 SOC 含量^[12]。鲍伟佳^[13]

在安徽省舒城县龙潭小流域的表层土壤有机碳研究中也发现了地表曲率与有机碳含量的相关性,龙潭小流域属于山地丘陵小流域,但海拔差和地形复杂程度均不如鄂河流域,研究发现平面曲率和剖面曲率与SOC含量的相关性分别达到0.46,0.56($p < 0.01$),即SOC含量与平面曲率和剖面曲率存在极显著的正相关,但SOC含量与NDVI和坡向的关系不显著;卢宏亮等^[14]利用随机森林模型,预测了安徽省全省的土壤属性,其中以水平曲率为代表的地形因子在随机森林预测模型中的重要性位列第三,仅次于高程和NDVI,考虑安徽省山地和丘陵地貌类型的占比较大,其规律和本文结论接近。此外,在水文学和农学领域的研究和经验也能证明地表曲率在水土流失过程中的作用,例如凹形坡(收敛形山坡)的含水量较凸形坡多,通常凹陷地貌的土壤碳储量更高^[15]。通过改造地表曲率,可以提升土壤的固碳能力,例如“顺坡沟垄”和“横坡沟垄”耕作方式可以减轻土壤有机碳的流失,且后者效果更好^[16]。估算相邻研究区丹江口某村庄的土壤有机碳库的空间变化时,考虑建立在区域地形基础上发展的地形农业,可以提高预测的准确性和可比性,研究发现水道或支流的分水岭附近的SOC含量通常较高^[17]。

因此,自然状态下地表形态复杂的山地丘陵地区的土壤有机碳主要受地表曲率影响,地表的凸处和凹处分别具有侵蚀强度弱和堆积能力强的储碳优势。植被指数代表了植被生长状况,而植被又是土壤有机碳主要的重要来源之一^[18],因此植被指数作为次要解释变量,可以评价相邻或地表形态相近研究区的土壤有机碳含量。

4.2 结论

(1) 丘陵山地小流域山体破碎、地形起伏大,其土壤有机碳含量变异幅度较大,空间异质性强且空间自相关极弱。样本间的变异更多的是由随机因素引起,而非距离。建立在地理学第一定律基础上的地统计学方法对类似地貌的研究区的适用性不强。

(2) 研究区不同季节土壤有机碳的控制因子并不单一,夏秋两季土壤有机碳主要受地表曲率影响,意味着地表的凸处和凹处分别具有侵蚀强度弱和堆积能力强的储碳优势。植被指数作为次要解释变量,可以评价相邻或地表形态相近研究区的土壤有机碳含量。

[参 考 文 献]

[1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47 (2):151-163.
 [2] 汪业勤,赵士洞. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态

学杂志,1999,18(5):29-35.

- [3] Post W M, Izaurralde R C, Mann L K, et al. Monitoring and verifying changes of organic carbon in soil [J]. *Climatic Change*, 2001, 51(1):73-99.
 [4] Schilling K E, Palmer J A, Bettis E A, et al. Vertical distribution of total carbon, nitrogen and phosphorus in riparian soils of Walnut Creek, Southern Iowa [J]. *Catena*, 2009, 77(3):266-273.
 [5] Guo Zhixing, Adhikari K, Chellasamy M, et al. Selection of terrain attributes and its scale dependency on soil organic carbon prediction [J]. *Geoderma*, 2019, 340:303-312.
 [6] 罗梅,郭龙,张海涛,等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1):48-59.
 [7] 张雄伟,李刚,董宽虎,等. 山西主要草地类型土壤有机碳储量及其垂直分配特征[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(1):141-146.
 [8] 孙文义,郭胜利,宋小燕. 地形和土地利用对黄土丘陵沟壑区表层土壤有机碳空间分布影响[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(3):443-453.
 [9] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5):1501-1511.
 [10] 湖北省水利厅. 2016年湖北省水土保持公报[EB/OL]. 武汉:湖北省水利厅,2016:17-18. [2020.05.05]. http://www.hubei.gov.cn/xxbs/bmbs/sslt/201709/t20170918_1193503.shtml.
 [11] 贾松伟,贺秀斌,韦方强,黄绵土土壤活性有机碳的侵蚀和沉积效应[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(2):10-13.
 [12] Fissore C, Dalzell B J, Berhe A A, et al. Influence of topography on soil organic carbon dynamics in a Southern California grassland [J]. *Catena*, 2017, 149:140-149.
 [13] 鲍伟佳. 土壤有机碳含量空间分布预测研究[D]. 安徽芜湖:安徽师范大学,2011.
 [14] 卢宏亮,赵明松,刘斌寅,等. 基于随机森林模型的安徽省土壤属性空间分布预测[J]. *土壤*, 2019, 51(3):602-608.
 [15] Devine S M, O'Geen A T, Liu Han, et al. Terrain attributes and forage productivity predict catchment-scale soil organic carbon stocks [J]. *Geoderma*, 2020, 368:114286.
 [16] 赵晓莅. 紫色土区水力侵蚀对土壤有机碳的影响及SOC预报模型研究[D]. 重庆:西南大学,2008:54-55.
 [17] Zhang Yani, Zhang Guoshi, Pan Junfeng, et al. Soil organic carbon distribution in relation to terrain & land use: A case study in a small watershed of Danjiangkou reservoir area, China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20:e00731. DOI:10.1016/j.gecco.2019.e00731.
 [18] 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.