

河北坝上地区坡面尺度土壤有机碳空间变异

周卓丽, 张卓栋, 罗建勇, 邹心雨, 肖人杰

(北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘 要:土壤有机碳作为土壤的重要组成部分,其空间变异对土壤资源的合理利用、土壤碳循环等具有重要意义。选取河北坝上地区典型草地坡面,通过实地采样、试验分析、地统计与空间插值制图,探究农牧交错带坡面土壤有机碳含量空间变异特征及机理。结果表明:坡面土壤有机碳含量平均为 2.72%,空间差异较大,在坡形上表现为凹坡>偏凹坡>偏凸坡>凸坡,在坡位上表现为坡下>坡中>坡上。随着深度的增加,土壤有机碳含量逐渐减少,且土壤有机碳的空间变异有增强趋势。表层变程为 49.8 m,其他深度变程范围 100.90~108.50 m,表明表层土壤有机碳空间自相关的距离明显小于其他深度。与较大尺度相比,该坡面尺度土壤有机碳主要受地形、土壤性质、植物根系等结构性因子影响,各层均表现出强空间自相关。地形控制着坡面的水热再分配,在其作用下土壤颗粒的流失、迁移、堆积以及根系生物量在不同深度的生长差异引起有机碳的空间变异,人类活动主要影响表层土壤。

关键词:土壤有机碳;空间变异;地统计;深度;地形

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0031-06

Spatial Variation of Soil Organic Carbon at Slope Scale in Bashang Region of Hebei Province

ZHOU Zhuoli, ZHANG Zhuodong, LUO Jianyong, ZOU Xinyu, XIAO Renjie

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology / MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Soil organic carbon (SOC) is an important component of soil, and its spatial variability is of great importance to the rational utilization of soil resources and the soil carbon cycle. In order to explore spatial variation characteristics and mechanism of SOC at the slope scale in the agro-pastoral transition zone, field sampling, experimental analysis, geostatistics and spatial interpolation mapping were implemented on a typical grassland slope in Bashang region of Hebei Province. The results showed that the average content of SOC was 2.72%, and the spatial difference was obvious; the SOC content was the highest on the concave slope, and followed by sub-concave, sub-convex, convex slope, and the SOC content decreased with elevation; SOC content decreased with depth, and the spatial variation of SOC tended to increase; the range was 49.8 m in the surface layer, and it varied from 100.90 m to 108.50 m at other depths, indicating that the spatial autocorrelation distance of surface SOC was obviously shorter than other depths; compared with other larger scales, the SOC at this slope scale mainly affected by structural factors such as topography, soil properties and roots and SOC at all depths shows the strong spatial autocorrelation. Topography controls the redistribution of water and heat on slopes. Under the influence of topography, the loss, transportation and accumulation of soil particles and the differences of root biomass at different depths affected the spatial variability of SOC at slope scale. Human activities mainly affected the surface soil.

Keywords: soil organic carbon; spatial variation; geostatistics; depth; topography

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,大于全球植被和大气碳库的总量^[1]。土壤有机碳作为土壤的组成部分,对土壤结构、持水能力、土壤肥力等具有重要作用^[2],其受自然和人为因素的综合影响,具有明显的空

间差异^[3]。研究土壤有机碳及其空间变异特征对土壤资源的可持续利用、全球碳循环等具有重要意义^[4-5]。

近年来,大多数研究表明土壤有机碳主要呈现强烈或中等空间自相关,其空间变异主要受结构因子影响或

收稿日期:2020-04-06

修回日期:2020-04-28

资助项目:国家重点研发计划课题(2017YFA0604704);国家自然科学基金(41730748,41301282)

第一作者:周卓丽(1996—),女,四川乐山人,硕士研究生,研究方向为土壤资源利用与保护。E-mail:zzhou@mail.bnu.edu.cn

通信作者:张卓栋(1984—),男,湖南湘潭人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:zzhang@bnu.edu.cn

由结构因子和随机因子共同引起^[3,6-9]。地形、土壤性质、植被覆盖等是造成土壤有机碳空间变异的结构因子^[3,6-9],而生态工程^[10]、放牧等^[11]人类活动是造成其空间变异的随机因子,土壤侵蚀是有机碳空间变异的重要驱动力^[12-15]。这些研究从分布特征、影响因子与机制等多个方面开展,为有机碳的空间变异研究做了有益的探索。然而,当前研究主要集中在 0—20 cm 的表层,20 cm 以下有机碳储量仍占有较高的比重^[16],且在不同深度有机碳空间变异特征及机理存在差异^[17],研究这种差异有利于土壤资源的合理利用和碳储量的准确估算。土壤有机碳空间变异的强弱受尺度效应的影响明显^[18],目前研究多集中于小流域、区域及更大的空间尺度,对坡面尺度缺乏全面深入的研究。坡面尺度的研究能更直接地指导生产实践,且坡面是水土流失的重要单元^[19],侵蚀引起的土壤再分配会增强有机碳的空间变异,研究其空间变异对农业生产、水土保持具有重要意义。已有研究主要集中在黄土高原^[6,18]、东北黑土区等^[14]土壤侵蚀高发区,及西北森林草原和北方草原等重要碳汇区^[4,7],鲜有关注生态脆弱、土壤性质空间变异较为突出的农牧交错区。

河北坝上地区属于典型的农牧交错区,其生态环境的优劣直接影响着京津地区的环境质量^[20]。该区域草地面积占 51.4%,由于大规模开垦与过度放牧导致草地退化、水土流失严重,是区域生态环境治理的重要对象^[20],加强该区草地有机碳的研究对维护区域生态安全具有重要意义。

本研究选取河北坝上草地坡面为研究对象,实测 0—60 cm 不同深度的土壤有机碳含量。本研究目标是获取草地坡面尺度不同深度有机碳含量空间变异特征,分析小尺度下有机碳空间变异机理及其在不同深度的差异性,为农牧交错带土壤资源管理与更有效的水土保护治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省丰宁满族自治县,地处内蒙古高原东南缘,燕山山脉北部,海拔 1 500~1 800 m。区域内雨热同期,属于典型的大陆性季风气候,年均温约为 0.6℃,年均降水量约 400 mm,降水主要集中于 6—9 月^[21]。土壤类型为简育干润均腐土^[22]。植被优势种包括中华隐子草(*Cleistogenes chinensis* Maxim. Keng.)、散穗早熟禾(*Poa subfastigiata* Trin.)、黄囊苔草(*Carex korshinskyi* Kom)等,土地利用类型以草地为主。

采样点分布于丰宁县大滩镇二道河村火石沟南侧

一草地坡面(41.534°N, 116.112°E)(图 1),样地坡向为 88°,坡度为 14.8°。坡面东西跨度 280 m,南北跨度 200 m,高差为 90 m,总面积约 2.7 hm²。该坡面起伏较小,根据微地形可分为凸坡、偏凸坡、偏凹坡和凹坡 4 种坡形,表现出坝上草原典型的丘陵山地的地形特征。

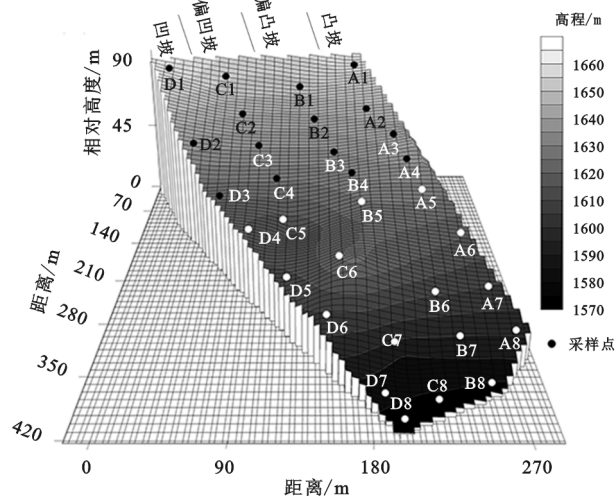


图 1 研究坡面概况及采样点分布

1.2 野外采样及实验室分析测定

在 4 种坡形顺坡方向各布设 8 个采样点,共计 32 个点。凸坡、偏凸坡、偏凹坡和凹坡 4 个坡形分别编号为 A, B, C 和 D,所有样点由坡上至坡下分别编号为 1—8(图 1)。使用土钻在每个点按 5 cm 间隔取样,取样深度为 60 cm,凸坡顶部以及偏凹坡中部有两个采样点由于砾石影响,分别只取到了 45 cm 和 50 cm,共获取 379 个样。土样自然风干后,除去植物根系和砾石并称重,研磨后过 0.15 mm 筛,使用德国 Elementar Vario TOC 总有机碳分析仪测定所有样品有机碳含量。

1.3 数据处理与分析

利用 SPSS 20.0 对有机碳数据进行统计分析。运用 Origin 2017 绘制不同坡位、坡形有机碳含量随深度变化的箱型图。利用 GS+9.0 进行地统计分析,分析不同深度有机碳含量的自相关程度,在 ArcGIS 10.4 中对各层有机碳含量进行克里金插值,并将插值结果在 Surfer 13 中建立 3D 模型。

2 结果与分析

2.1 有机碳含量统计特征

随着深度的增加土壤有机碳含量总体呈现减小的趋势(表 1),这与席小康等^[7]在锡林河流域草地的研究结果相同。从 0—5 cm 到 55—60 cm 平均值降低了 1.69%。30 cm 以下深度的有机碳平均值低于坡面平均水平。各个深度的有机碳含量都属于中等变异,但是随着深度增加变异系数逐渐增大,这与刘伟等^[23]在黄土

高原草地的研究结果一致。说明该坡面上层土壤中有
机碳含量更为均一,深层土壤中有机碳含量差异相对
更为明显。K-S 检验表明各个深度的土壤有机碳数
据均符合正态分布,可以对其进行地统计分析。

表 1 不同采样深度土壤有机碳统计特征

深度/cm	样本数	平均值/%	最大值/%	最小值/%	标准差/%	变异系数/%	K-S
0—5	32	3.74	5.26	2.45	0.79	21.12	0.93
5—10	32	3.45	5.46	1.69	1.02	29.57	0.81
10—15	32	3.20	4.88	1.45	0.97	30.31	0.76
15—20	32	3.00	4.59	0.64	1.04	34.67	0.46
20—25	32	2.78	4.79	0.58	1.13	40.65	0.71
25—30	32	2.72	4.82	0.43	1.19	43.75	0.89
30—35	32	2.48	4.40	0.25	1.13	45.56	0.94
35—40	32	2.41	4.30	0.24	1.22	50.62	0.82
40—45	32	2.29	4.34	0.27	1.24	54.15	0.84
45—50	31	2.32	4.59	0.21	1.24	53.45	0.62
50—55	30	2.13	4.45	0.29	1.27	59.62	0.77
55—60	30	2.05	4.15	0.20	1.17	57.07	0.98
0—60	379	2.72	5.46	0.20	1.22	44.85	0.29

2.2 土壤有机碳含量空间变异特征

土壤有机碳的地统计结果显示(表 2),块金值在
0.00~0.13,说明在一些深度存在由随机因子引起的
土壤有机碳的空间异质性。随着深度增加基台值逐
渐增大,表明系统空间内的总变异在增大。块金比分布
在 0.06%~8.80%,各深度均为强空间自相关,其空间
变异主要由结构因子引起,与冯娜娜等^[9]坡面尺度的
研究结果相同,小于李龙等^[18]研究的小流域、中等区域、
县域尺度的块金比 27.66%,33.42%,36.61%,这些较大
尺度有机碳的空间变异由随机因素和结构因素共同引
起。大尺度上植被、土壤分布可以综合体现研究区的环
境特征,是影响有机碳空间变异的主导因子,而小尺度
上植被、土壤分布相对单一,地形是关键因素^[18]。表层
受到人类活动干扰,变程最小,其他深度变程在 100.90—
108.50 m,表明表层土壤有机碳的空间自相关距离明显
小于其他深度。该坡面变程小于冯娜娜等^[9]的 311 m,
可能原因是本研究选取的是存在 4 种坡形的不规则坡
面,在地形影响下土壤有机碳的自相关距离减弱,变异
性增强。以上结果表明,土壤有机碳的空间变异特征

及其影响因素具有明显的尺度效应,对坡面尺度土壤
有机碳的研究具有重要意义。

土壤有机碳插值结果显示(图 2),各层有机碳含量
的空间分布特征较为一致,沿坡形走向呈条带状分布,
总体趋势为从凸坡向凹坡逐渐升高。Wiaux 等^[12]对黄
土侵蚀坡面有机碳分布的研究也认为凸形坡肩的有机
碳含量比其他地貌类型更低。表层坡中有机碳含量高
于坡上和坡下部位。在坡形和坡位的综合作用下,凹坡
中下部土壤有机碳含量高,偏凹坡和偏凸坡中部有机碳
含量较高,而凸坡在深层坡中上部位高于坡下。表层到
深层有机碳含量总体呈降低趋势,表层受人为因素的干
扰,减弱了表层各坡形之间的差异,而深层差异相对较
大。A3,B5,B8,C1,D5,D6 点对应的坡形中各个深度
有机碳含量都较高,A1,A8,B7,C7,D1 点对应坡形的
各个深度都较低,A5,B4,C2,D4 点从表层到深层有机碳
含量降低的很明显。坡面有机碳的最大值位于 5—
10 cm 凹坡的 D3 点,最小值位于 55—60 cm 凸坡的
A2 点。以上结果表明,微地形中的坡形和坡位是影
响坡面土壤有机碳含量空间变异的关键因素。

表 2 不同采样深度土壤有机碳地统计特征

深度/cm	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金比 $C_0/(C_0+C)/\%$	变程/m	R^2	RSS
0—5	指数模型	0.01	0.60	1.34	49.80	0.21	0.03
5—10	球状模型	0.03	1.16	2.76	100.90	0.95	0.02
10—15	球状模型	0.00	1.08	0.19	108.50	0.89	0.07
15—20	球状模型	0.11	1.24	8.70	108.10	0.87	0.08
20—25	球状模型	0.12	1.43	8.27	106.90	0.76	0.24
25—30	球状模型	0.13	1.52	8.80	104.40	0.79	0.21
30—35	球状模型	0.03	1.41	1.92	102.90	0.79	0.22
35—40	球状模型	0.03	1.68	1.72	106.30	0.77	0.35
40—45	球状模型	0.06	1.78	3.08	106.70	0.76	0.42
45—50	球状模型	0.02	1.79	1.23	107.00	0.71	0.56
50—55	球状模型	0.04	1.90	2.21	105.70	0.76	0.47
55—60	球状模型	0.00	1.56	0.06	102.40	0.82	0.27

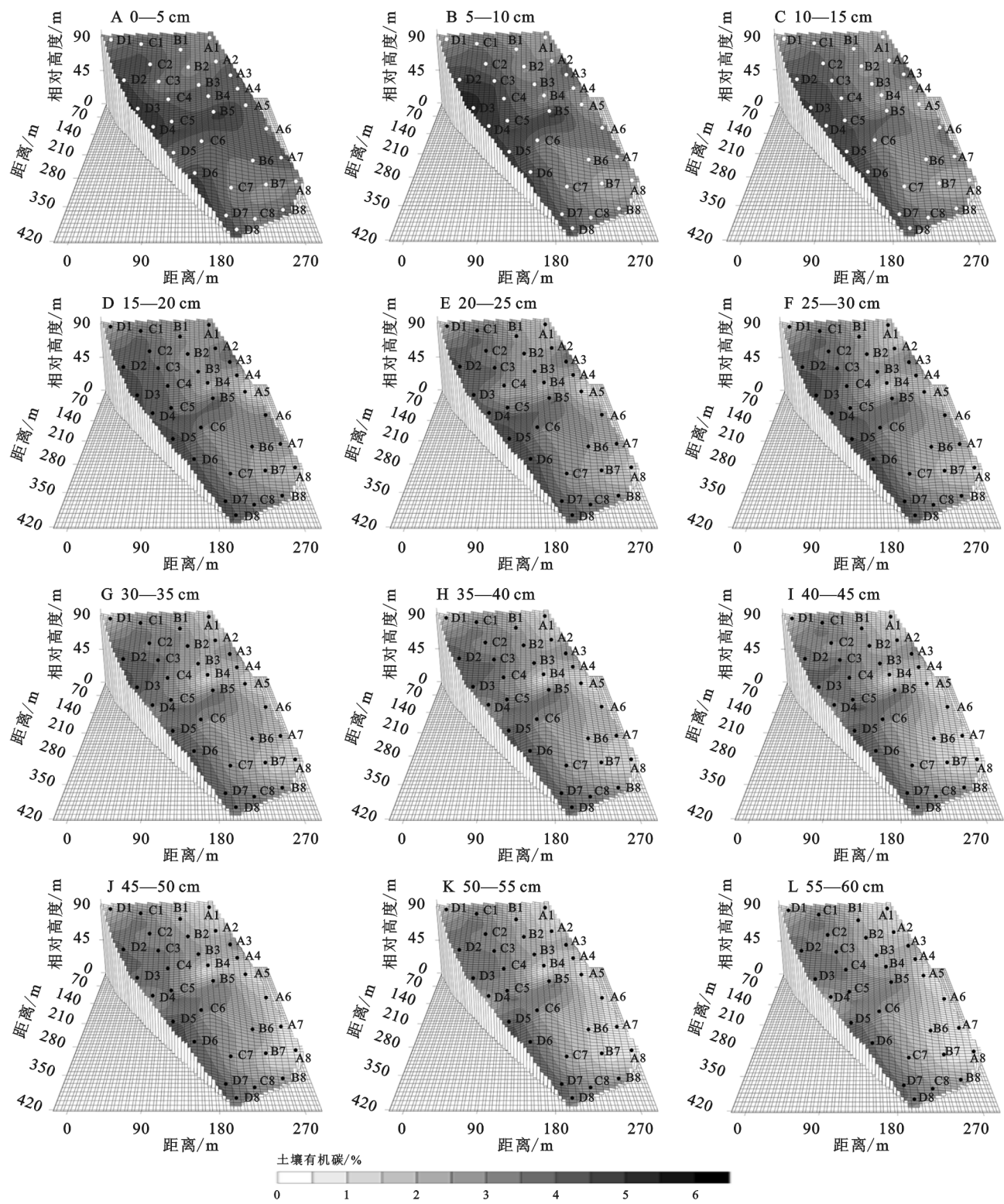


图 2 坡面各个深度土壤有机碳的空间分布

2.3 土壤有机碳含量随深度变化特征

按采样点的海拔将其分为坡上、坡中、坡下 3 个坡位。有机碳含量在各个坡位均呈现由表层至深层逐渐减小的特点,且坡中有机碳含量随深度减小的速率相对更大(图 3)。总体上有机碳含量坡下>坡中>坡上,基本符合有机碳在坡上随土壤侵蚀流失,搬运、堆积在坡中、坡下的一般规律,这与何燕等^[24]研究结论相似。坡

下和坡中之间没有显著差异,而坡上与坡下、坡中差异显著($p<0.01$)。与总体趋势不同,有机碳含量在表层 0—10 cm 表现为坡中>坡下>坡上。

随着土层深度的增加有机碳含量在 4 个坡形均减小,其中凸坡减小的速率相对最快,偏凸坡和凹坡次之,偏凹坡减小的最慢,且随着深度增加坡形之间的差异越明显(图 4)。各深度有机碳含量均呈现凹坡>偏凹

坡>偏凸坡>凸坡,凹坡、偏凹坡与其他坡形间差异显著($p<0.01$)。杨丹等^[8]的研究表明在不同深度土壤有机碳含量与地形的凸凹度有一定的负相关关系。凹坡

有一个有机碳含量明显偏小的点(D1),该点位于凹坡顶部,是坡面采样点中海拔最高的点,在各个深度有机碳含量都明显低于凹坡的其他样点。

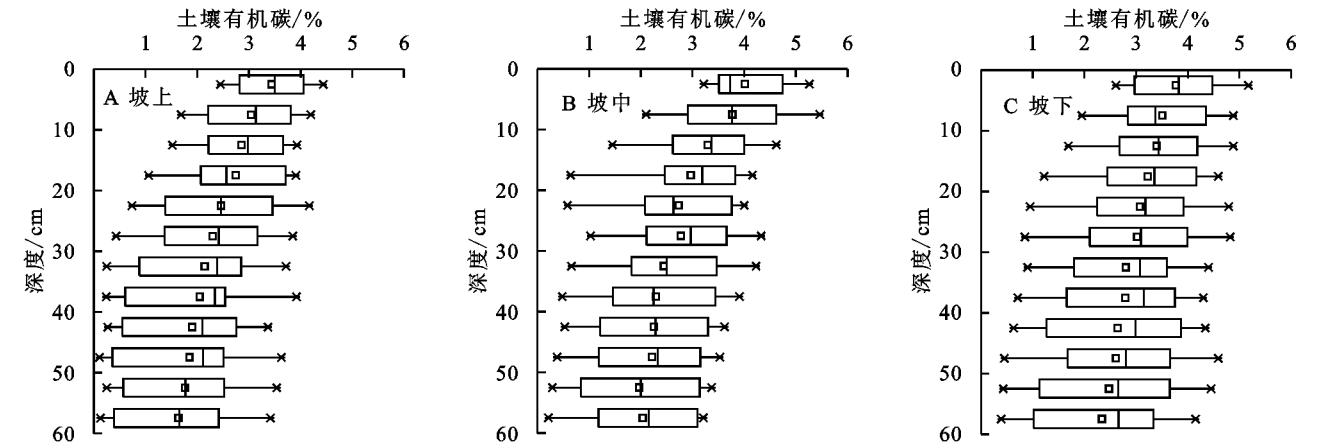


图 3 土壤有机碳在不同坡位随深度变化规律

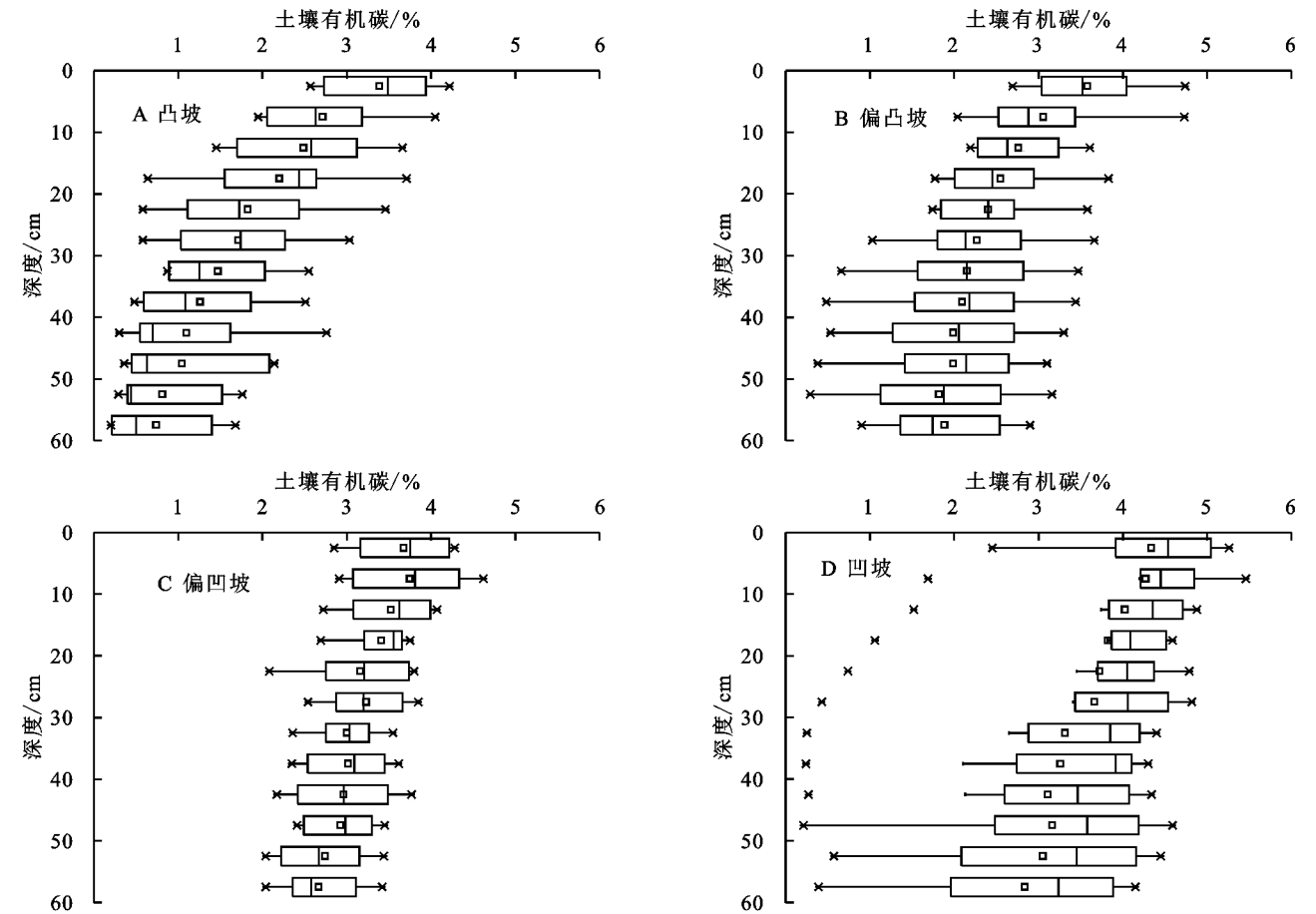


图 4 土壤有机碳在不同坡形随深度变化规律

2.4 土壤有机碳空间变异机制

以上结果表示坡面土壤有机碳空间差异较大,受结构因子的影响,各层均为强空间自相关性,但在一些深度也受人活动的干扰产生一定的随机差异。研究区为小尺度草地坡面,气候、土地利用条件一致,结构因子主要是地形、土壤性质和植被,随机因子为

试验误差、放牧等人类活动。
坡位和坡形是导致坡面有机碳含量空间变异的重要因子,有机碳含量从地势高的排水区向低洼汇水区递增(图 3)。土壤在排水区更易受到侵蚀,而土壤侵蚀优先使与细颗粒结合的有机碳在流水及重力作用下迁移流失,并堆积在汇水区^[14]。土壤有机碳含量与土壤颗粒大小有密切关系,砂粒含量大的土壤肥易流失,而粉

粒对土壤水分有效性具有正效应,黏粒通过与有机碳结合形成有机—无机复合体对有机碳有保护作用^[25]。该坡面土壤机械组成的空间变异研究^[21]表明坡上、坡中部位及凸坡砂粒含量较高,黏粒和粉粒主要分布在地势较低的坡下和偏凹坡、凹坡。此外,地势低洼区土壤水分含量高,有利于减缓有机碳的矿化^[14]。

土壤有机碳含量与根系生物量分布趋势相似。植物根系死亡后进入土壤碳循环过程,是草原土壤有机碳的重要物质来源^[4],其对土壤有机碳储量的贡献远大于地表植被^[26]。该坡面地表植被条件较为一致,但根系生物量的差异较为明显^[27],极大值多出现在凹坡和凸坡,但凹坡有机碳含量却显著大于凸坡。凹坡优越的水土条件利于植物根系生长,为凹坡有机碳的形成提供了物质基础,而凸坡土壤砾石含量高、土壤粗化严重,冷蒿根系攀附于砾石对土壤侵蚀不利条件做出逆反馈,有机碳含量随土壤侵蚀加剧而进一步减小。根系的垂直分布特征及分解速率对不同深度有机碳含量有直接影响^[25]。0—20 cm 的有机碳含量显著高于下层,底层仅为表层的 55%,该坡面植被根系生物量表层的明显大于深层,且微生物活动更强,导致有机碳含量高。例如浅层的 A3、A6 点、深层的 D6 点附近根系含量较大,有机碳含量也高。此外,偏凹坡随深度增加有机碳含量减小的速率最缓,这与偏凹坡的根系生物量呈现出相似特征。

表层土壤有机碳含量受人类活动的影响而降低。与其他土层不同,该坡面表层 0—10 cm 深度坡下有有机碳含量小于坡中(图 3)。坡底为一级河流阶地,同时有乡间土路穿过,牲畜踩踏、人车通行对坡下表层土壤扰动较大,破坏坡下的植被及土壤结构,降低了有机物质的输入和分解,进一步导致有机碳含量降低,减弱了坡形、坡位的影响程度,王明君等^[11]的研究也发现同样的问题。

地形控制着坡面的水热再分配,决定了坡面水土流失的方向和强度,影响土壤性质的空间变异。粉粒和黏粒与有机碳聚合形成胶体对有机碳积累具有正效应,在相同动能条件下比砂粒更易被侵蚀、搬运,土壤有机碳也表现出相应的空间分布特征。植物根系是有机碳积累的重要物质来源,其分割、粘结作用也利于土壤团粒结构的形成,改善土壤结构。植物根系的垂直分布及分解速率差异形成了不同深度有机碳的空间变异。

3 结论

该坡面土壤有机碳含量平均为 2.72%,随深度增加其含量逐渐减少,各层变异系数均属于中等。土壤有机碳空间分布差异较大,整体表现为凹坡>偏凹

坡>偏凸坡>凸坡,坡下>坡中>坡上。各层土壤有机碳均属于强空间自相关,表层变程为 49.8 m,其他层稳定分布在 100.90~108.50 m。

坡面土壤有机碳的空间变异主要由地形、土壤颗粒和植物根系等结构性因子引起。坡形、坡位是影响坡面尺度土壤有机碳的关键因素,不同深度土壤有机碳的差异主要受根系生物量的直接影响,在衡量区域有机碳水平、估算有机碳储量时,需要着重加以考虑。

致谢:感谢北京师范大学地理科学学部高晓飞高级实验师在试验方面提供的指导,感谢于浩、冀东莹、李晓辉、旦周加、孙传龙等人在野外采样和样品处理方面的帮助。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils[J]. *Nature*, 1990, 348(6298): 232-234.
- [2] Tiessen H, Cuevas E, Chacon P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. *Nature*, 1994, 371(6500): 783-785.
- [3] 马渝欣,李徐生,李德成,等.皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1153-1159.
- [4] 霍艳双,杨波,杨雪栋,等.草地土壤有机碳研究进展[J]. *中国草地学报*, 2014, 36(6): 90-96.
- [5] Chappell A, Webb N P, Butler H J, et al. Soil organic carbon dust emission: An omitted global source of atmospheric CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 3238-3244.
- [6] 栗文玉,刘小芳,赵勇钢,等.黄土丘陵区人工柠条恢复为主小流域土壤有机碳空间变异性及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 15-22.
- [7] 席小康,朱仲元,郝祥云.锡林河流域土壤有机碳空间变异分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(6): 97-104.
- [8] 杨丹,项文化,方晰,等.石栎—青冈常绿阔叶林土壤有机碳和全氮空间变异特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3452-3462.
- [9] 冯娜娜,李廷轩,张锡洲,等.不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 349-356.
- [10] 王伟,李占斌,李鹏,等.生态建设对坡面土壤有机碳分布的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 35-41.
- [11] 王明君,韩国栋,赵萌莉,等.草甸草原不同放牧强度对土壤有机碳含量的影响[J]. *草业科学*, 2007, 24(10): 6-10.
- [12] Wiaux F, Cornelis J, Cao W, et al. Combined effect of geomorphic and pedogenic processes on the distribution of soil organic carbon quality along an eroding hillslope on loess soil[J]. *Geoderma*, 2014, 216: 36-47.

退耕林地土壤碳氮差异及其影响因素[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(6): 123-133.

[4] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.

[5] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153-159.

[6] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11-18.

[7] 张艺, 李海光, 余新晓, 等. 黄土高原典型流域土壤抗冲特性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 60-63.

[8] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵区开垦地土壤抗冲性的时间变化研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(2): 8-11.

[9] 张建军, 张宝颖, 毕华兴, 等. 黄土区不同植被条件下的土壤抗冲性[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(6): 25-29.

[10] 周佩华, 郑世清, 吴普特, 等. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 47-58, 66.

[11] 王丹丹, 张建军, 丁杨, 等. 晋西黄土区退耕林地土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 14-18.

[12] 陈国靖. 宁南黄土丘陵区土壤理化性质对不同植被恢复模式的响应[D]. 银川: 宁夏大学, 2018.

[13] 马璠. 黄土丘陵区土壤抗冲性研究思考[M]. 银川: 宁夏人民教育出版社, 2019.

[14] 梁博, 聂晓刚, 杨东升, 等. 西藏尼洋河流域下游 5 种典型土地利用方式土壤物理性质差异分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(1): 119-128.

[15] 李民义. 晋西黄土区不同植被类型植物多样性及土壤水文物理特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[16] 张晓梅, 邸利, 王彦辉, 等. 黄土高原典型林分土壤水文物理性质及持水性能[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 117-124, 133.

[17] 顾宇书, 邢兆凯, 韩友志, 等. 浑河上游 4 种典型水源林土壤物理性质及其水源涵养功能[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1): 37-41.

[18] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223-226.

[19] 韦洁. 广西大青山人工纯林和混交林对植物多样性和土壤肥力的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2011.

[20] 苏成西, 尚宇南. 不同退耕还林模式的土壤抗冲性研究[J]. 河南农业科学, 2014, 43(8): 57-63.

[21] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.

[22] 李超, 周正朝, 朱冰冰, 等. 黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 61-66.

~~~~~

(上接第 36 页)

[13] Hancock G R, Murphy D, Evans K G. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment [J]. Geoderma, 2010, 155(1/2): 36-45.

[14] 方华军, 杨学明, 张晓平, 等. 黑土坡耕地侵蚀和沉积对物理性组分有机碳积累与损耗的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 467-474.

[15] 贾松伟, 贺秀斌, 陈云明, 等. 黄土丘陵区土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 88-90.

[16] 周一鹏, 张雨辰, 罗鑫叶, 等. 土壤有机质空间变异性及其驱动因素研究进展[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1492-1499.

[17] 李龙, 姚云峰, 秦富仓, 等. 赤峰市黄花甸子流域土壤有机碳含量的空间变异特征研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3): 742-748.

[18] 李龙, 姜丽娜, 白建华. 半干旱区土壤有机碳空间变异及其影响因素的多尺度相关分析[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 40-48.

[19] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响: 以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 51-56.

[20] 王德全, 关印山, 李显瑞. 坝上草原生态系统建设的演变、教训与措施[J]. 中国草地, 1992(2): 78-80.

[21] 邹心雨, 张卓栋, 吴梦瑶, 等. 河北坝上地区坡面尺度土壤机械组成的空间变异[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 44-53.

[22] 张科利, 王志强, 高晓飞, 等. 土壤地理综合实践教程[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 211-214.

[23] 刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. 草地学报, 2011, 19(3): 425-431.

[24] 何燕, 李廷轩, 王永东. 低山丘陵区不同坡位茶园土壤有机碳特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 122-126.

[25] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.

[26] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 141(1/2): 184-192.

[27] 王雪妍, 张卓栋, 罗梦婷, 等. 河北坝上地区坡面尺度根系生物量空间变异[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 72-77.