

# 陕西省土壤有机质含量及其与影响因素的关系

董莉丽, 杨波, 李晓华, 王新芳

(咸阳师范学院 资源环境与历史文化学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** [目的] 分析陕西省土壤有机质空间分布特征及其影响因素, 并揭示土壤有机质与地形、植被类型、气候和土壤其他属性的关系, 为该区土壤碳汇(碳源)功能变化研究提供科学基础。[方法] 通过采集陕西省 12 个样区不同植被类型和地形条件下的 85 个表层土壤样品, 并利用 SPSS 16.0 中的 K-means 聚类和 Canoco 4.5 软件中的冗余(RDA)方法进行分析。[结果] 土壤有机质浓度在 2~6 级之间; 并表现为由南至北, 由西至东大致呈降低趋势; 在各样区, 最大值是最小值的 1.89~14.84 倍; 同一样区不同样地土壤有机质含量等级不同; 各影响因素中, 除经度和无霜期的影响不显著外, 其他各环境因子的影响均显著, 退耕年限和植被类型的影响最大, 坡度和坡向的影响程度较低, 且交互影响作用明显。[结论] 除农地转变为果园外, 农地退耕能够显著提高土壤有机质含量, 并随着恢复年限的延长, 有机质含量增加日益显著, 生态系统逐渐由碳源转变为碳汇。

**关键词:** 土壤有机质; 冗余分析; 影响因素; 林龄

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)04-0085-07

**中图分类号:** S158

**文献参数:** 董莉丽, 杨波, 李晓华, 等. 陕西省土壤有机质含量及其与影响因素的关系[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 85-91. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 04. 015; Dong Lili, Yang Bo, Li Xiaohua, et al. Content of soil organic matter and its relationships with influencing factors in Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 85-91. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 04. 015

## Content of Soil Organic Matter and Its Relationships with Influencing Factors in Shaanxi Province

DONG Lili, YANG Bo, LI Xiaohua, WANG Xinfang

(College of Resources & Environment and History & Culture,

Xiayang Normal University, Xiayang, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** [Objective] The spatial distribution and influencing factors of soil organic matter in Shaanxi Province were analyzed to reveal the relationships between soil organic matter and the influencing factors as topography, vegetation types, climate and other soil properties, to provide scientific basis for the study of soil carbon sink(carbon source) function change in this area. [Methods] Eighty-five top-soil samples were collected from 12 regional sites with different vegetation types and topographic conditions. Methods K-means clustering analysis and redundancy analysis(RDA) were used by SPSS 16.0 and Canoco 4.5. [Results] The soil organic matter concentration belonged to 2~6 levels, spatially having a decrease trend from the south to the north, and from the west to the east of province wide. The maximum value was 1.89~14.84 times of the minimum one. The contents of soil organic matter at different sample sites from a same region was not at similar level. Except for longitude and frost-free period, the content of organic matter was significantly affected by several environmental factors. Among which, years of vegetation restoration and vegetation types were the greatest influencing factors, slope gradient and aspect also have their influences and have obvious interaction effect. [Conclusion] Significant increase in soil organic matter content was found when farmland was transformed to other lands but orchard. The increase was more obvious with the increase of farmland

收稿日期: 2016-11-30

修回日期: 2017-02-14

资助项目: 陕西省教育厅重点科研计划项目“关中帝陵封土土壤和植被演化特征”(16JZ089); 陕西省普通高等学校优势学科建设资助项目(0602)

第一作者: 董莉丽(1979—), 女(汉族), 陕西省扶风县人, 博士, 副教授, 主要从事生态修复与环境效益评价方面的研究。E-mail: 527172621@qq.com.

converted ages, whereby it made reverted farmland shifted from carbon source to carbon sink.

**Keywords:** soil organic matter; redundancy analysis; influencing factors; stand age

土壤有机质是土壤固相物质组成之一,与土壤自净和缓冲能力、养分的供应与储存及微生物活动密切相关,并影响土壤团聚体的形成与稳定性,在全球碳平衡中起至关重要的作用,是评价土壤质量的重要标志之一。理解不同环境条件下土壤有机质的差异,是理解生态系统功能和全球气候变化的关键。坡向与热量和水分条件相关,并影响生态系统生产力和有机质分解。目前,有关坡向对土壤有机质影响的研究结果并不一致:有研究<sup>[1-3]</sup>认为南坡大于北坡;也有研究<sup>[4-5]</sup>认为北坡较高;另外,也有南坡和北坡差异不明显<sup>[6-7]</sup>和半阴坡最高<sup>[8-9]</sup>等观点。坡度与土壤养分的分布有一定的联系,研究坡度对于土壤养分的关系,有利于对土壤养分分布规律的研究<sup>[10]</sup>。但仅仅研究某一因素对土壤有机质含量的影响是不够的,近几年出现了很多针对两种因子的交互作用对土壤有机质影响的研究,例如,植被类型和坡向<sup>[1-3]</sup>;林龄和坡向<sup>[11]</sup>;土壤质地和年均温<sup>[12]</sup>;土壤质地和土地利用类型<sup>[13-14]</sup>;坡度和坡向<sup>[15]</sup>等。但土壤特性往往受到多个成土因素的综合作用,而同时综合考虑多个环境因子进行土壤-环境之间数量关系的研究还比较少。另外,目前有关土壤有机质的影响因素的研究,主要是应用了地统计学和 GIS 软件相结合的方法<sup>[13-18]</sup>,该方法往往受到空间分辨率的影响。Canoco 4.5 是一种生态应用软件,它将排序、回归和排列方法学进行了整合,利用降趋势对应分析和冗余分析可以避免出现较大的误差,减少分析过程中的主观性,是目前用于约束与非约束排序的较为流行的工具<sup>[19]</sup>。例如:陈晓琳等<sup>[20]</sup>利用 Canoco 分析了坡向、坡度、海拔和生物量等环境因子对土壤活性有机碳的影响;Wang 等<sup>[21]</sup>利用 Canoco 软件中的 RDA 分析方法研

究了生物量、叶面积指数、土壤黏粒含量、容重和 pH 值等对土壤有机碳的影响。目前,利用该方法研究省域范围内土壤有机质浓度的影响因素鲜有报道。本文采集陕西省 12 个样区 85 个样地表层土壤样品,测定了土壤有机质、黏粒、速效磷含量和团聚体水稳性等土壤属性特征,并对立地条件及植被类型进行调查,通过冗余分析对数据进行直接梯度排序,分析土壤有机质对各环境因子的响应,以探明陕西省退耕还林还草工程在提高土壤有机质方面产生的效应,揭示土壤有机质分布特征和变化的影响因素,为理解全球变化下和人类生态环境建设作用下的该地区土壤碳汇(碳源)功能变化提供基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本文研究样区共有 12 个,均分布于陕西省,从北向南依次为榆林市的米脂县(1)、绥德县(2)、定边县(3)、延安市的吴起县(4)、志丹县(5)、安塞县(6)、咸阳长武县(7)、铜川印台区(8)、咸阳市礼泉县(9~10)、渭城区(11)和安康市紫阳县(12),括号内为样区编号。研究样区从北到南分属于 4 个气候带:中温带、北暖温带、南暖温带和北亚热带。各研究样区涉及的土地利用类型有:农地、果园、草地、灌木地和人工林地,人工林树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseud-acacia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、苹果(*Malus pumila*)、杏(*Armeniaca vulgaris*)、小叶杨(*Populus simonii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、金竹(*Phyllostachys sulphurea*)和板栗(*Castanea mollissima*)等,林龄在 8~50 a 之间。

表 1 研究区各样区样地基本情况

样区	经度/(°)	纬度/(°)	海拔/m	坡度/(°)	林龄/a	土地利用类型
1	110.29~110.27	37.77~37.78	1 003~1054	0~33	0~49	农地\草地\灌木地\人工林\果园
2	110.32~110.33	37.43~37.44	837~960	10~35	0~50	农地\草地\灌木地\人工林
3	107.60	37.14~37.31	1 587~1626	10~15	0~8	农地\草地\人工林
4	108.12	37.07~37.08	1 359~1476	0~35	0~50	农地\草地\灌木地\人工林
5	108.93~109.92	36.80	1 488~1531	0~16	0~7	农地\草地\人工林
6	109.26~109.27	36.74~36.77	1 160~1307	14~32	0~34	农地\草地\灌木地\人工林
7	107.52~107.82	35.24	809~1179	0~31	0~25	农地\草地\人工林
8	109.35	35.14~35.10	1 003~1043	0	6~22	果园
9	108.13~108.46	34.67~34.73	1 238~1363	0~31	0~30	农地\草地\人工林\果园
10	108.39	34.56	638~680	0	5~33	果园
11	108.71	34.40	460~507	0~25	13~35	草地\人工林
12	108.33	32.34	809~854	25~40	0~50	草地\人工林

## 1.2 样品采集

每个样区选取不同土地利用类型及不同植被类型样地,利用 GPS 测定各样地的经纬度和海拔高度,利用罗盘测定各样地的坡度和坡向。

每个样地设置标准样方 3 块,沿 S 形采集 5 个表层土壤样品,用四分法取土装袋。将土样风干,磨碎过 0.25 mm 筛。土壤有机质采用重铬酸钾热容量法进行测定。

## 1.3 数据分析

采用 Canoco for Windows 4.5 软件对土壤属性和环境因子各数据进行 RDA 分析,响应变量矩阵为土壤有机质、黏粒(<0.002 mm)、速效磷含量和水稳性团聚体平均质量直径,环境变量包括植被类型、退

耕年限、坡向、坡度、经纬度、海拔、年平均降水量、无霜期、年平均温度。将定性变量进行编码,坡向划分为阴(1)、半阴(2)、半阳(3)、阳(4)。植被类型分为 6 类,农地为 1,苜蓿地为 2,荒草地为 3,经济林为 4,人工生态林中的针叶林为 5,阔叶林为 6。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤有机质分布的统计分析

对各样区土壤有机质数据进行描述性统计分析,结果详见表 2。由表 2 可知,土壤有机质含量的最大值和最小值相差较大,前者是后者的 1.89~14.84 倍;均值和中值接近;根据全国土壤养分含量分级标准,土壤有机质含量变化范围在 2~6 级之间。

表 2 各样区土壤有机质数据的描述性统计分析

样区	样地数	最大值/%	最小值/%	均值/%	中值/%	标准偏差	变异系数/%
1	10	1.69	0.51	1.14	1.19	0.42	36.84
2	8	3.18	0.67	1.32	0.89	0.93	70.45
3	4	2.42	1.12	1.64	1.15	0.64	39.02
4	12	7.91	0.53	3.37	3.32	2.18	64.69
5	3	1.06	0.56	0.82	0.85	0.25	30.49
6	8	2.52	0.40	1.41	1.46	0.67	47.52
7	6	5.27	1.09	2.84	2.85	1.54	54.23
8	6	2.19	1.15	1.73	1.82	0.44	25.43
9	9	10.76	1.83	6.18	6.89	3.32	53.72
10	6	2.12	1.12	1.67	1.68	0.43	25.75
11	8	4.20	1.65	2.82	2.69	0.90	31.91
12	5	7.77	2.69	4.71	4.57	1.94	41.19

变异系数也是土壤特性变异性的一个估计值,由于样区 8,10 的所有样地均为果园,植被类型相同且田间管理方式基本一致,因此土壤有机质变异系数较小。其他样区土壤有机质的变异系数较大,在

30.49%~70.45%之间,所有样区土壤有机质含量均属中等变异。图 1 为土壤有机质含量随经纬度的变化。由图 1 可以看出,表层土壤有机质含量由南至北,由西至东大致呈降低趋势。

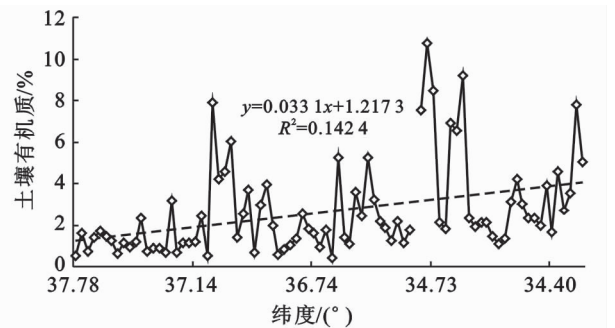
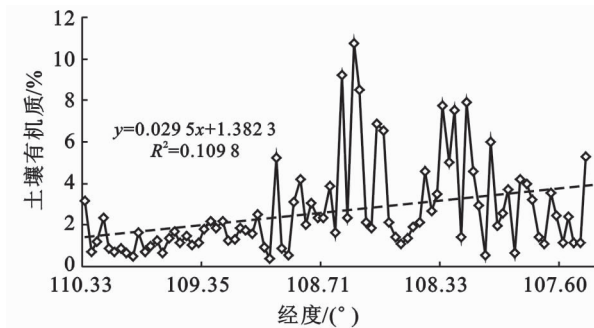


图 1 土壤有机质(SOM)随经纬度的变化

## 2.2 聚类分析

为了解各研究区不同样地土壤有机质分布规律

和影响因素,对 12 个研究区 85 个样地进行 K-means 聚类分析。每个样地名称为林龄(退耕年限)+植被

类型+样区编号,结果见表 3。

由表 3 可以看出,同一样区不同样地属于不同类群,样区 1 的 10 个样地分属于第 1 和第 2 个类群,样区 2,3 的样地分属于第 1 和第 3 类群,样区 4 的 12 个样地分属于 1,2,3,4,5,6 类群,样区 5 的 3 个样地属于第 1 类群,样区 6 的 8 个样地分属于第 1,2,3 类群,样区 7 的 6 个样地分属于第 1,2,3,4 类群,样区 8

和样区 10 的样地均为果园,分属于第 1,2 类群,样区 9 分属于第 2,3,5,6,7 类群,样区 11 的 8 个样地分属于第 2,3,4 类群,样区 12 的 5 个样地分属于第 3,4,6 类群。12 个样区中,农地、果园和退耕年限较短的荒草地土壤有机质含量较低,林龄较长的林地、退耕时间较长的荒草地和纬度较低的农地有机质含量丰富。

表 3 聚类分析结果

样地	类群	样地	类群	样地	类群	样地	类群	样地	类群
农地 1	1	农地 5	1	31 a 刺槐 6	2	30 a 柠条 2	3	50 a 杏林地 4	4
21 a 果园 1	1	5 a 苜蓿地 5	1	20 a 刺槐 6	2	50 a 杜梨 2	3	15 a 沙棘林 4	4
14 a 仁用杏地 1	1	7 a 杏林地 5	1	34 a 柠条 6	2	8 a 刺槐 3	3	50 a 荒草地 4	4
3 a 苜蓿地 1	1	18 a 刺槐 6	1	0.5 a 荒地 7	2	10 a 沙棘林 4	3	25 a 刺槐林 7	4
8 a 荒地 1	1	3 a 荒地 6	1	18 a 果园 8	2	15 a 沙棘林 4	3	35 a 草地 11	4
37 a 柠条地 1	1	农地 6	1	22 a 果园 8	2	34 a 柠条刺槐 6	3	35 a 草地 11	4
10 a 草地 2	1	农地 7	1	14 a 果园 8	2	25 a 核桃地 7	3	30 a 金竹林 12	4
5 a 酸枣树 2	1	11 a 果园 8	1	19 a 果园 8	2	10 a 荒地 7	3	农地 12	4
4 a 草地 2	1	6 a 果园 8	1	1 a 果园 9	2	15 a 刺槐林 7	3	30 a 小叶杨林 4	5
4 a 草地 2	1	8 a 果园 10	1	农地 9	2	20 a 苹果林 9	3	20 a 油松林 9	5
5 a 草地 2	1	49 a 侧柏地 1	2	30 果园 10	2	35 草地 11	3	15 a 油松林 9	5
农地 2	1	24 a 油松地 1	2	24 a 果园 10	2	35 a 草地 11	3	30 a 荒草地 9	5
农地 3	1	24 a 杨树地 1	2	25 a 果园 10	2	35 a 草地 11	3	50 a 柠条林 4	6
6 a 荒地 3	1	24 a 刺槐地 1	2	33 a 果园 10	2	35 a 草地 11	3	30 a 荒草地 9	6
1 a 荒地 3	1	10 a 油松林 4	2	5 a 果园地 10	2	10 a 板栗林 12	3	15 a 刺槐林 9	6
农地 4	1	10 a 酸桃林 4	2	35 a 草地 11	2	10 a 刺槐林 12	3	50 a 刺槐林 12	6
农地 4	1	30 a 油松 6	2	13 a 杏林 11	2	50 a 杏林地 4	4	30 a 油松林 9	7

### 2.3 基于 Canoco 多元统计分析研究土壤—环境关系

采用 Canoco 4.5 软件中的线性约束性排序方法 RDA 进行排序。排序前 4 轴的特征值及其与各环境因子的相关系数详见表 4。由表 4 可知,4 个排序轴的特征值分别为 0.304,0.143,0.038,0.027。排序轴 1 解释了 30.4% 的土壤性质的变化,土壤性质变化的累积解释量在前 4 个轴的值 51.3%,土壤性质与环境相关关系在第 1 轴和第 2 轴的解释量分别为 59.3% 和 28.0%,即第 1 轴和第 2 轴共解释了 87.3% 的土壤与环境因子之间的关系(表 4)。

表 4 排序前 4 轴的特征值及其与环境因子的相关系数

CCA 排序结	排序轴 1	排序轴 2	排序轴 3	排序轴 4
特征值	0.304	0.143	0.038	0.027
物种与环境相关系数	0.776	0.720	0.669	0.452
物种变化累积解释量%	30.4	44.8	48.6	51.3
物种与环境关系累积解释量%	59.3	87.3	94.7	100.0
特征值总和	1.000			
典范特征值总和	0.513			

图 2 为样地、环境因子与土壤各属性的 RDA 排序图。黑色箭头代表环境因子,虚线箭头代表土壤属性,箭头的夹角余弦代表相关性,箭头的长短代表该因子对土壤属性的解释量的大小。圆圈代表样地,圆圈之间的距离为欧几里得距离,距离越短表示差异越小,反之越大。

由图 2 可以看出,环境因子中退耕年限和植被类型表现了对土壤有机质变化较高的解释量,而降水表现了对土壤速效磷较高的解释量;随着坡度和坡向的增大,土壤有机质含量呈增加趋势;有机质与海拔、平均温度和无霜期表现为正相关,而与经度和纬度为负相关;土壤黏粒含量与平均质量直径(MWD)呈正相关,二者与土壤有机质正相关;速效磷与土壤有机质的相关性较小。蒙特卡洛显著性检验表明,经度和无霜期对各土壤属性的影响不显著外,其他各环境因子对土壤属性的影响均显著。样区 9 的 9 个样地(样地编号为 58~66)及样区 3 的 4 个样地(样地编号为 19

~22) 差异性小,前者土壤黏粒含量较高,后者样地海拔较高。其他属于同一样区的样地并未集中排列,这

主要是由于各样区样地的植被类型和退耕年限的不同引起的。

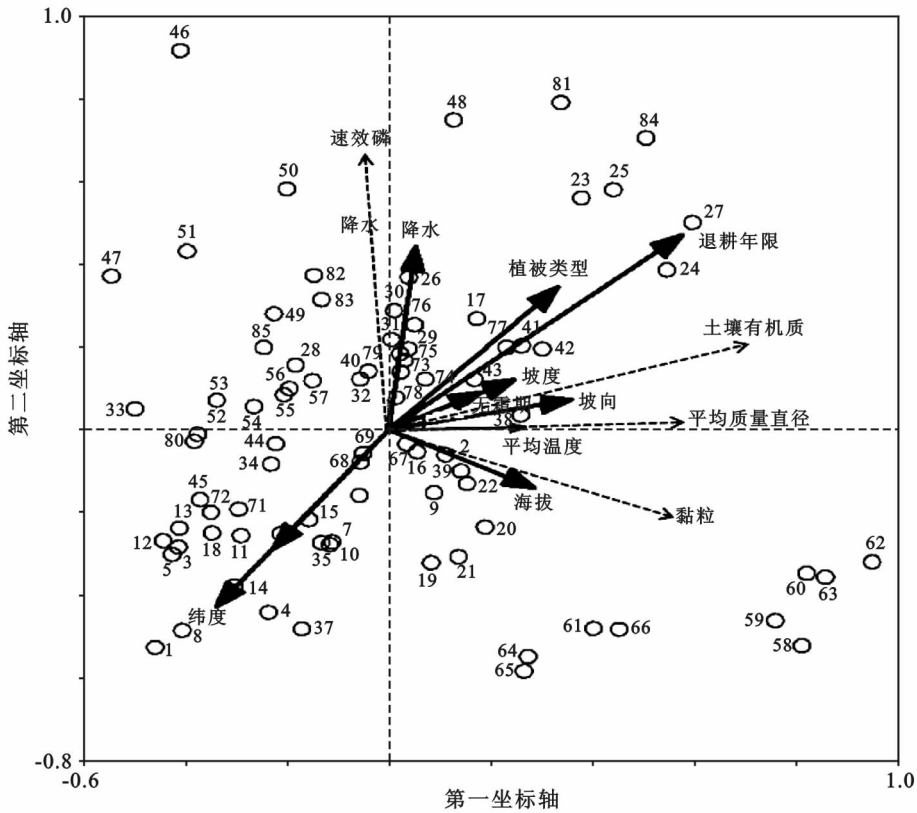


图 2 样地、土壤属性和环境因子的冗余分析排序

### 3 讨论

Andriamananjara 等<sup>[22]</sup> 研究认为影响土壤碳库的环境因子包括海拔、气候、土壤质地和根系生物量;宋轩等<sup>[17]</sup> 研究认为流域内海拔是影响土壤养分分布的主要影响因素。本文研究认为,在土壤性质的各影响因素中,退耕年限的影响最重主要。Wang 等<sup>[21]</sup> 和赵海燕等<sup>[23]</sup> 研究也认为表层土壤的有机质随林龄的增加而增加。Guan 等<sup>[24]</sup> 研究认为次生林转变为杉木和毛竹后土壤有机碳含量明显降低,并认为林龄是重要因素。可见,随着林龄的增长,森林土壤碳汇潜力明显。这是因为在植物生长过程中,植物吸收环境中的碳素并将其转变为有机物质,并以枯落物等带入土壤逐年累积所致。植被类型与土壤有机质的夹角为锐角,表明植被类型也显著影响 SOM 含量,这与 Yimer 等<sup>[1]</sup>、王合玲等<sup>[14]</sup> 和 Wang 等<sup>[21]</sup> 的研究结论一致,后者研究认为不同植被类型下活体生物生物量差异是影响土壤有机质含量的主要因素。

地形变化对土壤理化性质和水分特性有明显的影响<sup>[25]</sup>。其中,坡度与土壤养分的分布有一定的联系,研究坡度对于土壤养分的关系,有利于对土壤养

分分布规律的研究<sup>[10]</sup>。目前,有关坡度对土壤有机质含量影响的结论不一致,蒋文慧等<sup>[10]</sup> 认为坡度和土壤有机质呈正相关,而李婷等<sup>[26]</sup> 认为随着坡度增大,土壤有机质含量逐渐下降,张文博等<sup>[27]</sup> 研究则认为坡度为  $0\sim 3^\circ$ ,  $3\sim 8^\circ$ ,  $>8^\circ$  的土壤有机质含量无显著性差异。本研究中,坡度与土壤有机质正相关,即随着坡度等级的增加,表层土壤的有机质含量增加,这与我国实施的退耕还林还草政策有关,这一政策中明确规定禁止开垦  $25^\circ$  以上陡坡地,且坡度越大,退耕时间更早。但坡度的影响程度较低,这主要是由于随着坡度的增大,影响土壤有机质含量的因素增多,并且复杂化,致使坡度对土壤有机质空间分布影响权重减小<sup>[15]</sup>。坡向不同的地方,所接受的太阳辐射能不同,温度状况不同,水分状况不同,植被的覆盖程度也不同。因此,不同坡向表层土壤中物理、化学和生物过程存在差异,进而导致表层土壤养分含量和分布状况的异质性<sup>[10]</sup>。本文研究认为坡向与有机质含量正相关,即随着坡向由阴坡到阳坡,土壤有机质含量增大。坡度和坡向对土壤有机质的影响程度较低,且交互影响作用明显。另外,坡度和坡向与退耕年限和植被类型正相关。可见,阴坡较低的太阳辐射

并未使土壤有机质分解速率降低<sup>[3]</sup>,而生长在阳坡,且坡度较陡,退耕时间较长的林地,由于冠层的遮挡,使到达地面的太阳辐射量较低,适宜的温度和水分条件、以及更多的枯枝落叶和根系凋落物更有利于土壤有机质的积累。

黏粒含量与土壤有机质呈正相关关系,这与前人<sup>[13,22,26,28]</sup>的研究结果一致。黏粒含量高的地区土壤中的细颗粒对有机质有吸附保护作用,有机质不易被矿化分解<sup>[12]</sup>;并且,由于黏性高的土壤,水分充足,透气性差,原有机残体在水分作用下易于腐烂降解<sup>[18]</sup>,因而其含量高。土壤有机质和水稳性团聚体平均质量直径正相关,且二者均与植被类型和退耕年限相关,这主要是由于植被恢复过程枯枝落叶及根系的增加有利于稳定性团聚体的形成,并增加了土壤有机质含量<sup>[29]</sup>。前人研究认为土壤有机质为土壤大团聚体的形成提供了良好的物质基础<sup>[30]</sup>,同时团聚体也降低了其内部包裹的颗粒态/不稳定有机质的分解<sup>[29]</sup>。Hobley 等<sup>[31]</sup>等研究认为表层土壤有机质浓度主要受气候变量的影响,本研究认为多年平均降水、平均温度、无霜期与土壤有机质含量正相关,其中,无霜期的影响不显著。由于本研究样本量较少且样本在空间上未均匀分布,本文所得结论还需进一步验证。

## 4 结论

土壤有机质含量属中等变异程度,有随着纬度和经度的降低而增大的趋势。各影响因素中,除经度和无霜期影响不显著外,其他各因素显著影响表层土壤有机质含量,尤以退耕年限影响最明显。各样区退耕年限较长的林地、荒地土壤有机质含量高。坡向和坡度交互影响作用明显,且二者与退耕年限和植被类型相关。土壤黏粒含量越高,越利于有机质的累积。

### [参 考 文 献]

- [1] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia[J]. *Geoderma*, 2006,135(135):335-344.
- [2] Sidari M, Ronzello G, Vecchio G, et al. Influence of slope aspects on soil chemical and biochemical properties in a *Pinus laricio* forest ecosystem of Aspromonte (Southern Italy)[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2008,44(4):364-372.
- [3] Drewnik M, Musielokl, Stolarczyk M, et al. Effects of exposure and vegetation type on organic matter stock in the soils of subalpine meadows in the Eastern Carpathians[J]. *Catena*, 2016,147:167-176.
- [4] Egli M, Sartori G, Mirabella A, et al. Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils[J]. *Geoderma*, 2009,149(1/2):124-136.
- [5] Lozano G B, Parras A L, Brevik E C. Impact of topographic aspect and vegetation(native and reforested areas) on soil organic carbon and nitrogen budgets in Mediterranean natural areas [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,544(8):963-970.
- [6] Egli M, Mirabella A, Sartori G, et al. Effect of north and south exposure on weathering rates and clay mineral formation in Alpine soils[J]. *Catena*, 2006,67(3):155-174.
- [7] Mären I E, Karki S, Prajapati C, et al. Facing north or south: Does slope aspect impact forest stand characteristics and soil properties in a semiarid trans-Himalayan valley [J]. *Journal of Arid Environments*, 2015,121:112-123.
- [8] Huang Yimei, Liu Dong, An Shaoshan. Effects of slope aspect on soil nitrogen and microbial properties in the Chinese Loess region [J]. *Catena*, 2015,125:135-145.
- [9] Qin Yanyan, Feng Qi, Holden N M, et al. Variation in soil organic carbon by slope aspect in the middle of the Qilian Mountains in the upper Heihe River Basin, China [J]. *Catena*, 2016,147:308-314.
- [10] 蒋文慧. 地形和土地利用对山区土壤养分空间变异性影响[D]. 山东 泰安:山东农业大学,2014:37-62.
- [11] 黄婷,刘政鸿,王钰莹,等. 陕北黄土丘陵区不同立地条件下刺槐群落的土壤质量评价[J]. *干旱区研究*, 2016,33(3):476-485.
- [12] 赵明松,张甘霖,李德成,等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. *生态学报*, 2013,33(16):5058-5066.
- [13] 张世文,叶回春,王来斌,等. 景观高度异质区土壤有机质时空变化特征分析[J]. *农业机械学报*, 2013,44(12):105-113.
- [14] 王合玲,张辉国,秦璐,等. 新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2012,32(16):4969-4980.
- [15] 黄平,李廷轩,张佳宝,等. 坡度和坡向对低山茶园土壤有机质空间变异的影响[J]. *土壤*, 2009,41(2):264-268.
- [16] 宋莎,李廷轩,王永东,等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. *土壤*, 2011,43(1):44-49.
- [17] 宋轩,李立东,寇长林,等. 黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系[J]. *应用生态学报*, 2011,22(12):3163-3168.
- [18] 武婕,李玉环,李增兵,等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014,34(6):1596-1605.

- [19] 王洪丹,王金满,曹银贵,等.黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响研究[J].生态学报,2016,36(16):1-11.
- [20] 陈晓琳,李忠武,王晓燕,等.中亚热带红壤丘陵区松林生态系统表层土壤活性有机碳空间分异规律[J].地理研究,2011,30(10):1825-1834.
- [21] Wang Tian, Kang Fengfeng, Cheng Xiaoqin, et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 163: 176-184.
- [22] Andriamananjara A, Hewson J, Razakamanarivo H, et al. Land cover impacts on aboveground and soil carbon stocks in Malagasy rainforest[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 233: 1-15.
- [23] 赵海燕,徐福利,王渭玲,等.秦岭地区华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性变化[J].生态学报,2015,35(4):1086-1094.
- [24] Guan Fengying, Tang Xiaolu, Fan Shaohui, et al. Changes in soil carbon and nitrogen stocks followed the conversion from secondary forest to Chinese fir and Moso bamboo plantations[J]. Catena, 2015, 133: 455-460.
- [25] 柳云龙,胡宏涛.红壤地区地形位置和利用方式对土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2004,18(1):22-26.
- [26] 李婷,张世熔,刘浔,等.沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J].土壤学报,2011,48(4):863-868.
- [27] 张文博,张福平,苏玉波,等.渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J].水土保持通报,2014,34(1):138-143.
- [28] 张建杰,张强,杨治平,等.山西临汾盆地土壤有机质和全氮的空间变异特征及其影响因素[J].土壤通报,2010,41(4):839-844.
- [29] Nadal-Romero E, Cammeraat E, Pérez-Cardiel E, et al. How do soil organic carbon stocks change after cropland abandonment in Mediterranean humid mountain areas? [J]. Science of the Total Environment, 2016, 566: 741-752.
- [30] 董莉丽,陈益娥,李晓华.吴起县退耕还林对土壤团聚体水稳性和养分含量的影响[J].林业科学,2014,50(5):140-146.
- [31] Hobley E U, Wilson B. The depth distribution of organic carbon in the soils of eastern Australia[J]. Ecosphere, 2016, 7(1): 1-21.

(上接第84页)

- [13] 冯金朝,袁飞,徐刚.贵州雷公山自然保护区秃杉天然种群生命表[J].生态学杂志,2009,28(7):1234-1238.
- [14] 吴承祯,洪伟,吴继林,等.珍稀濒危植物长苞铁杉的分布格局[J].植物资源与环境学报,2000,9(1):31-34.
- [15] Wentworth T R. Laboratory and field exercises in ecology[J]. Ecology, 1982, 63(6): 1987.
- [16] 卢杰,潘刚,罗大庆,等.濒危植物急尖长苞冷杉种群生命表分析[J].水土保持通报,2010,17(5):212-221.
- [17] Ripley B D. The second-order analysis of stationary point processes [J]. Journal of Applied Probability, 2004, 13(2): 255-266.
- [18] Illian J, Penttinen A, Stoyan H, Stoyan D. Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns[M]. US: John Wiley & Sons Ltd., 2008.
- [19] 刘炜洋.水曲柳天然更新及其影响因子研究[D].黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2008.
- [20] 张巧明.辽东栎林天然更新特征的研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [21] Greig S P. Quantitative Plant Ecology[M]. 3rd ed. London: Blackwell Scientific Publications, 1983: 19-128.
- [22] 孙志虎,张彦东.长白落叶松人工林天然更新幼苗分布格局及其研究方法的比较[J].生物数学学报,2009,24(3):556-566.
- [23] 蔡飞,宋永昌.武夷山木荷种群结构和动态的研究[J].植物生态学报,1997,21(2):138-148.
- [24] 彭闪江,黄忠良,彭少麟,等.植物天然更新过程中种子和幼苗死亡的影响因素[J].广西植物,2004,24(2): 113-121.