DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.01.043

渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素

张文博[1]，张福平[1,2]，苏玉波[1]，景彩娥[1]

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院，陕西 西安 710062；2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所，甘肃 兰州 730000)

摘　要：通过野外实地调查，系统采集了渭河干流区域土壤表层及深层样品，利用方差分析、缓冲区分析等分析方法，研究了土地利用类型、海拔、坡度、坡向以及距离河岸的距离因素对土壤有机质空间分布的影响。结果表明，渭河流域沿岸区域土壤有机质含量总体偏低，分布不均，变异性较大，随着土层深度增加有机质含量逐渐降低。土地利用类型、海拔、坡度、坡向以及距离河流的距离因素只在 20 cm 以上土层具有显著影响。不同用地类型有机质含量的顺序是：农田＞林地＞果园＞荒滩草地。随着海拔升高，有机质含量逐渐增加。阴坡和半阴坡的有机质含量明显高于阳坡。离河岸越远有机质含量越高，随深度增加这种趋势逐渐减弱。

关键词：有机质；分布特征；影响因素；渭河干流

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)01-0138-06　　**中图分类号**：S158

Spatial Distribution Characteristics of Soil Organic Matter and Its Influencing Factors on Two Sides Along Mainstream of Weihe River

ZHANG Wen-bo[1], ZHANG Fu-ping[1,2], SU Yu-bo[1], JING Cai-e[1]

(1. *College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi* 710062, *China*;
2. *Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: Through field survey, systematic soil sample collection from surface soils and deep soil layers in the area, effects of land use type, altitude, slope degree and slope aspect on spatial distribution of soil organic matter are studied using variance analysis and buffer analysis methods. Results show that soil organic matter content on the two side areas is low overall, with an uneven distribution and large variability, and gradually declines with decreasing soil depth. Land use type, altitude, slope degree, slope aspect and the distance to the river have significant effects on soil organic matter only within 20 cm of soil surface. Land types, in order of decreasing organic matter content, are farmland, woodland, grassland and orchard wasteland. Organic matter content increases gradually with increasing altitude. Organic matter content on shady and semi-shady slopes is higher than that on sunny slope. Organic matter content increases away from the river bank, but gradually declines with increasing soil depth.

Keywords: SOM; distribution characteristic; influencing factor; mainstream of the Weihe River

土壤有机质(SOM)是土壤的重要组成部分，是植物营养元素的主要来源，可以促进植物和微生物的生理活性，增加土壤的蓄水、保水和保肥能力，促进土壤良好结构的形成等，对土壤物理、化学和生物学性质有着深刻的影响，在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面具有很重要的意义[1]。研究土壤有机质分布特征、影响因素和响应机制，有助于估算土壤碳库和土壤碳汇潜力以及研究土壤生态系统演替规律、合理制定农业种植规划及农田管理措施[2]。国内外学者对土壤有机质空间分布及其影响因素已进行

收稿日期：2013-01-24　　修回日期：2013-04-22
资助项目：中国博士后基金项目“内陆河流域水文循环要素的遥感反演与尺度效应分析”(2011M501496)；陕西师范大学中央高校基本科研业务费专项资金项目“干旱地区水文生态研究”(GK201101002)
作者简介：张文博(1989—)，男(汉族)，陕西省西安市人，硕士，研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail：794359026@qq.com。
通信作者：张福平(1973—)，男(汉族)，山西省吕梁县人，副教授，硕士生导师，研究方向为资源环境遥感与 GIS 应用。E-mail：zhangfuping@163.com。

了大量的研究，如陈冲等[3]研究了坡度坡向对耕地土壤养分空间差异的影响；潘明安[4]对不同种植方式与土壤有机质的关系作了研究；彭陶[5]研究了绿洲棉田土壤有机质在时间和空间上的变异性；杜冠华等[6]对不同湿地类型的土壤有机质的水平分布、垂直分布特征及其与 pH 值、土壤水分和容重等指标的相关性进行了研究；Mishra 等[7]研究了农田尺度的土壤有机质的空间变异特征；李婷[8]分析了小流域尺度土壤有机质空间分布特征及影响因素。但这些研究大多使用统计分析方法，基于 Kriging 空间插值技术和 GIS 技术，侧重在表层土壤有机质及理化因子在水平方向上的空间变异状况[9]，而在中等流域尺度土壤有机质水平和垂直方向立体分布特征的研究鲜有报道，同时，对于流域内河流对两岸土壤有机质分布影响还未见研究。本文利用 2012 年 8 月上旬渭河干流生态调查的土壤分析成果，使用缓冲区分析、方差分析等方法对河岸 3 000 m 范围内的土壤有机质空间分布进行了研究，并探讨了沿渭河干流的土壤有机质在水平和垂直方向上的空间分布特征及影响因素。

1　研究区概况

渭河是黄河流域的最大支流，发源于甘肃省渭源县鸟鼠山，流经甘肃、宁夏、陕西 3 省区，干流全长 818 km，流域总面积达 13.48 km^2[10]。渭河两岸为波状起伏地形，自西向东地势逐渐变缓，河谷变宽。上游主要为黄土丘陵区，中下游北部为陕北黄土高原，中部为经黄土沉积和渭河干支流冲积而成的河谷冲积平原区——关中盆地，南部为秦岭土石山区[11]。渭河两岸的土壤主要是近代河流的冲积物及重积物，土壤熟化程度较高，主要土壤类型有盐碱土、砂土、黄土、黑黏土、红油土、黑油土、耕侵灰褐土、红黏土、水稻土[12]。主要土地利用类型是耕地，约占 50%，其次是林地和草地[13]。

2　数据的采集与分析

2.1　样品采集与测定

2012 年 8 月，依据 1∶10 万地形图沿渭河干流关中段采集土样，为揭示河流对土壤有机质的影响，采样点均选在距离河岸 3 000 m 的范围内。样点深度 1 m，每 10 cm 取一次样，每次取土样 30～50 g。采样点共 60 个，土壤样品 600 个。野外调查记录采样点经纬度、高程和附近土壤类型，以及植被覆盖程度和类型等多项参数。将土样在 105 ℃下烘干 24 h，经过称量、研磨、过 60 目筛（0.2 mm 孔径），用重铬酸钾溶液容量法测定土壤有机质含量。

在国际科学数据服务平台网站下载 2009 年空间分辨率为 30 m 的 DEM 图像，经拼接裁剪，用以提取流域范围坡度坡向。

2.2　数据处理与分析方法

（1）土壤有机质含量有两种表示方法，分别为百分比含量（%）和绝对含量（g/kg），本文采用后者。计算公式如下：

$$土壤有机碳=\frac{C(V_0-V)\times10^{-3}\times3.0\times1.33}{m}\times1\,000$$

式中：1.33——氧化校正系数；C——0.5 mol/L 硫酸亚铁标准溶液的浓度；V_0——滴定空白消耗硫酸亚铁标准溶液的体积（ml）；V——土样消耗硫酸亚铁标准溶液的体积（ml）；m——烘干土质量（g）。

（2）应用 ArcGIS 空间分析工具从 DEM 图像中提取采样点的坡度、坡向及高程数据。

（3）本文采用单样本 K—S（Kolmogorov—Smirnov）检验方法检验样本所属的总体是否服从正态分布。在此基础上使用方差分析进行计算。

为研究土地利用类型、坡度、坡向、高程 4 个因素的不同水平是否给土壤有机质造成了显著差异和变动，本文采用单因素方差分析方法分别对这 4 个因素分析。当方差分析结果认为各水平间存在显著差异时，进行验后多重比较，即各个水平的均值进行两两比较，检验任意两个水平之间的差异是否会对土壤有机质造成显著影响。当两水平组方差相等时使用 LSD（最小显著性差异法），方差不相等时使用 Tamhane′s 方法。

本文采用缓冲区分析的方法研究河流对两岸的土壤有机质的影响，即以河流这个线状要素为中心向两边延伸一定范围，以延伸的距离不同划分为不同的等级范围，再统计不同等级范围内土壤有机质含量。应用 ArcGIS 缓冲区分析工具，以渭河及其各支流为基准向外扩展，每 500 m 为一个缓冲带，将研究区分为 6 个缓冲带，分别统计每个缓冲带内各土层土壤有机质平均含量，再应用单因素方差分析计算不同缓冲带对土壤有机质的影响。

依据采样时记录的样点数据，将所有土样按照土地利用类型分成 4 类，即农田、林地、果园和荒滩草地。再由坡度图和坡向图得到每个土样的坡度坡向，应用相关分析方法计算土壤有机质与地形因子之间的相关性。按各地形因子将坡度分为 0°～3°，3°～8°，＞8° 这 3 个等级，坡向分为正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西、西北 8 个方向，高程分＜400，400～800 和＞800 m 3 组。分别使用单因素方差分析计算各地形因子不同水平对有机质的影响程度。

3 结果与分析

3.1 土壤有机质分布特征

为定量分析所有土样的概率分布，将其按深度分成 10 层，经 K—S(Kolmogorov—Smirnov)方法检验，在 0.05 置信水平下，所有土层 p 值都大于0.05，服从正态分布(表 1)。说明所采土样可以代表渭河干流区域的土壤有机质状况，并且可以进行相关分析和方差分析等。

从渭河干流的土壤有机质描述性统计可以看出，研究区有机质含量均值在 24.85～41.86 g/kg，与全球土壤有机质含量均值相比较，渭河沿岸的土壤有机质含量整体偏低。随着土层深度加深，均值逐渐变小，较深层的土壤中动植物不发育，有机质主要分布在表层。由于靠近河岸，部分地区为砂土，在 50 cm 层以下土层有机质含量极小，最小值只有1.72 g/kg。极差范围为63.63～94.58 g/kg，范围较大，标准差均在 15.85 g/kg 以上，各个土层的有机质含量波动较大，主要是受人工施肥的影响造成的。变异系数最小的 0—10 cm 层为 51%，区域整体有机质差异较大，河岸边许多农田多年闲置或者荒废，土壤肥力不断下降。说明研究区土壤较贫瘠，人为因素影响程度大，主要靠人工施肥维持土壤肥力，靠近河岸地区多沙石，不适宜耕种。

表 1 土壤有机质基本统计学特征

土层/cm	算术平均值/(g·kg^{-1})	最大值/(g·kg^{-1})	最小值/(g·kg^{-1})	极差/(g·kg^{-1})	标准差/(g·kg^{-1})	变异系数/%	K—S 检验 p 值
0—10	41.86	101.46	6.88	94.58	21.27	51	0.92
10—20	35.66	87.70	3.44	84.26	21.91	61	0.32
20—30	27.63	82.55	5.16	77.39	18.65	67	0.09
30—40	27.60	79.11	3.44	75.67	19.11	69	0.20
40—50	26.13	65.35	1.72	63.63	15.85	61	0.07
50—60	26.66	75.67	1.72	73.95	18.87	71	0.18
60—70	29.66	77.39	3.44	73.95	19.38	65	0.15
70—80	27.71	75.67	1.72	73.95	17.53	63	0.48
80—90	26.40	72.23	1.72	70.51	17.74	67	0.49
90—100	24.85	68.79	1.72	67.07	17.47	70	0.79

注：表中显著水平为 0.05。下同。

3.2 土地利用类型与土壤有机质的关系

土地利用方式是影响土壤物理化学性质的重要因素[14]。为了定量研究土地利用类型对土壤有机质的影响，分别在农田、林地、果园和荒滩草地 4 种地类上进行采样。如图 1 所示，农田土壤有机质含量整体变化最大，在 0—20 cm 的耕层最高达到 50 g/kg，并且随深度增加有机质含量减少，30—100 cm 层有机质含量波动较小，保持在 25 g/kg 左右。林地的有机质含量变化趋势与农田相似，只是在 50—100 cm 层比农田略高，保持在 30 g/kg 水平。果园的有机质含量保持平稳，50 cm 以上在 40 g/kg 水平波动，50—100 cm 土层有机质在 30～35 g/kg 波动。所有土层中荒滩草地的有机质含量最低，这是由于此种地类主要分布在河滩等沙石较多的地方，无人管理，长期受河流冲刷，植被覆盖少。农田和果园受人为灌溉施肥的影响，有机质含量相对较高。本研究所采林地样本均为人工林，所以在一定程度上也受人为因素影响，但相对农田果园，林地的投入少，时间长，所以有机质含量相对减少。

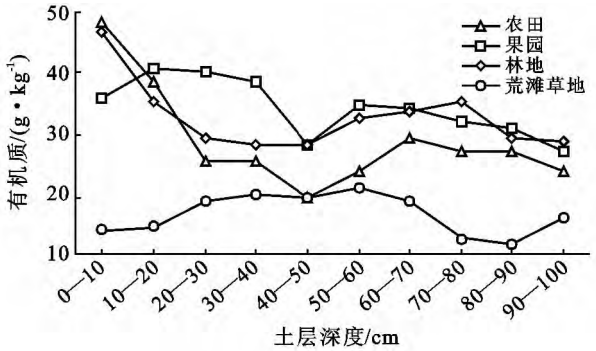


图 1 不同土地利用类型土壤有机质变化

经 K—S 检验，4 种地类的土样均服从正态分布($p>0.05$)，本文采用单因素方差分析方法分别对 10 个土层的有机质加以分析，Levene's 方差齐性检验结果见表 2。当方差齐性的值大于 0.05 时，说明通过方差齐性检验，使用 LSD 方法进行多重比较，当 p 值小于 0.05 时，说明 4 种地类对有机质含量的影响有显著性差异。从表 2 可以看出，不同土地利用类型只在 0—10 和 10—20 cm 这两个土层对有机质的影响效果有显著性差异，20 cm 以下土层不同地类间比较的 p 值均大于 0.05，即说明 4 种地类间无显著性差异。

表 2　土壤有机质不同影响因素的方差分析结果

土层/cm		0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
地类	方差齐性	0.15	0.17	0.51	0.41	0.17	0.92	0.39	0.52	0.44	0.75
	p 值	0.00	0.04	0.23	0.42	0.50	0.50	0.58	0.15	0.35	0.80
高程	方差齐性	0.52	0.03	0.16	0.11	0.16	0.31	0.84	0.80	0.69	0.24
	P 值	0.05	0.03	0.79	0.71	0.58	0.67	0.90	0.73	0.32	0.65
坡度	方差齐性	0.53	0.15	0.06	0.04	0.36	0.02	0.33	0.33	0.39	0.18
	P 值	0.11	0.69	0.48	0.36	0.94	0.44	0.73	0.82	0.97	0.58
坡向	方差齐性	0.26	0.29	0.05	0.03	0.00	0.19	0.00	0.45	0.36	0.10
	P 值	0.12	0.52	0.82	0.83	0.73	0.91	0.54	0.26	0.32	0.28
缓冲区	方差齐性	0.86	0.31	0.15	0.18	0.23	0.35	0.31	0.33	0.24	0.08
	p 值	0.42	0.06	0.71	0.59	0.52	0.64	0.71	0.93	0.90	0.81

表 3 为 0—10 和 10—20 cm 土层均值两两比较结果,只有荒滩草地的土壤有机质与其他 3 种地类间具有显著性差异,农田、林地和果园由于受到人工施肥的影响,有机质含量相对较高。但从标准差可以看出,农田有机质含量的波动也较大,说明只要实施合理有效的耕地管理方式便可以提高耕地肥力。

表 3　不同土地利用类型土壤有机质均值两两比较结果(LSD 方法)及相关统计量

土层深度/cm	土地利用类型	平均值/(g·kg^{-1})	标准差/(g·kg^{-1})	差异显著性
0—10	农田	48.08	21.36	ac
	林地	46.81	14.64	ac
	果园	35.77	15.78	ac
	荒滩草地	14.62	9.53	ad
10—20	农田	38.73	21.13	bc
	林地	23.58	10.21	bc
	果园	31.30	17.72	bc
	荒滩草地	14.79	10.64	bd

注:LSD 多重比较($p<0.05$),字母不同表示其具有显著性差异。下同。

3.3　地形因子对土壤有机质的影响

3.3.1　高程与土壤有机质的关系　所采样点沿渭河干流上游到中下游,海拔范围在 300～1 000 m,落差较大。为定量研究海拔对有机质的影响,将所有样点按高程分成 3 个级别(<400,400～800,>800 m),分别对 0—100 cm 深度的 10 个土层作方差分析,分析结果见表 2。不同高程组只在 0—10 和 10—20 cm 两个土层对有机质的影响效果有显著性差异,20—100 cm土层不同高程组的 p 值均大于 0.05,说明不同高程组在 20 cm 以下对有机质的影响无显著性差异。10—20 cm 层方差齐性小于 0.05,没有通过方差齐性检验,使用 Tamhane's 多重比较方法进行两两比较。

不同海拔高度影响土壤的水热条件以及物质的堆积和迁移,高海拔地区的土壤环境处于半封闭状态,人为因素影响小,微生物分解动植物残体形成的有机质容易保存,土壤有机质所受破坏程度小。而低海拔地区相对农业耕作多一些,土壤有机质受外界环境的影响较大[15]。分别计算不同高程组土壤有机质含量的平均值,从图 2 中看出,海拔越高土壤有机质含量越高。对 3 个高程组间的两两比较可以发现,在 0—10 cm层,低于 400 m 海拔的土壤有机质含量较小,<400 和>800 m 高程组间具有显著性差异;在 10—20 cm层,低于 400 m 的有机质也明显低于其他高程组,400～800 和>800 m 高程组之间没有显著性差异。

3.3.2　坡度和坡向与土壤有机质的关系　坡度、坡向对土壤有机质的腐殖化和矿化过程都有重要影响,从而影响其存在形态、含量及空间分布等[16]。一般说来土壤侵蚀强度随坡度的增大而增大[17]。为了分析坡度对有机质的影响,本文将采样点坡度分为 0°～3°,3°～8°,>8°这 3 个等级。如表 4 所示,渭河干流区域的有机质有随坡度增加而减少的趋势,土层越深,趋势越不明显。在全部土层中,0°～3°的土壤有机质明显高于 3°～8°和>8°的有机质含量,平坦的土地更容易维持土壤肥力。方差分析结果表明,10 个土层的有机质在 3 个坡度组间均无显著差异性,这是由于采样点分布在距离河岸 3 000 m 范围内,河水对土壤的侵蚀影响所致,近河水地带主要以沙土居多,有机质含量极少。

为分析坡向对有机质的影响,将 337.5°～360°和 0～22.5°规定为正北方向,沿顺时针每隔 45°分别为东北、东、东南、南、西南、西、西北 8 个方向。分别算出 10 个土层在每个方向上的有机质含量均值,50 cm 以下土层有机质含量较低且均值接近,故未标示。如图 3 所示,阴坡和半阴坡的有机质含量明显要高于阳

坡，阳坡接受的太阳辐射多，导致土壤温度高湿度低，相对阴坡土壤干燥，有机质分解速度快，不易积累。土壤有机质含量水平通常随热量条件的增加而降低，随湿润度的增加而增高[18]。随着深度增加，各个方向上的有机质含量都随之降低，并且坡向对有机质的影响趋势也随之减弱，坡向只影响表层土壤有机质的分布。方差分析表明，不同坡向的有机质含量无显著性差异。

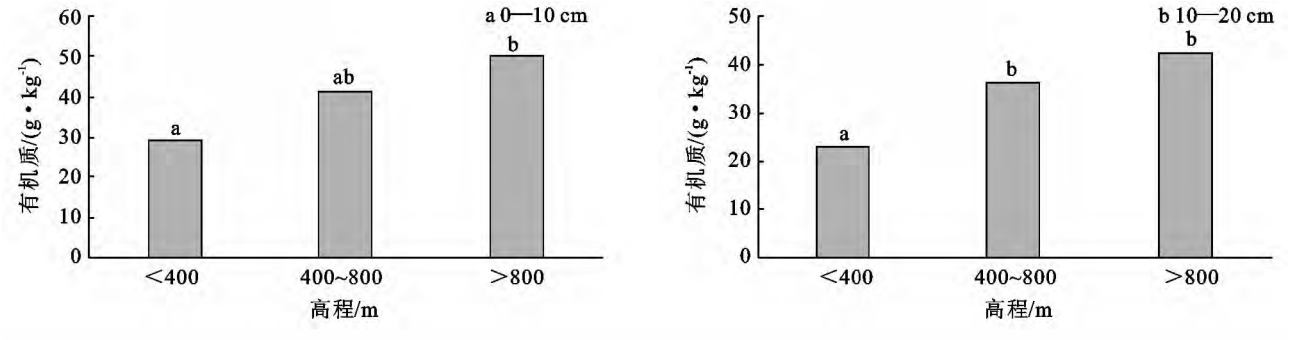


图 2 不同高程组有机质含量变化

表 4 不同坡度分级土壤有机质变化 g/kg

坡度分级/(°)	土层/cm									
	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	60—70	70—80	80—90	90—100
0～3	45.51	37.83	30.18	31.42	23.29	29.51	32.15	29.53	27.36	24.89
3～8	42.50	31.81	22.82	21.42	21.59	20.64	25.41	24.08	25.15	20.88
＞8	40.13	32.33	23.39	21.32	20.98	22.36	24.94	24.51	23.65	33.82

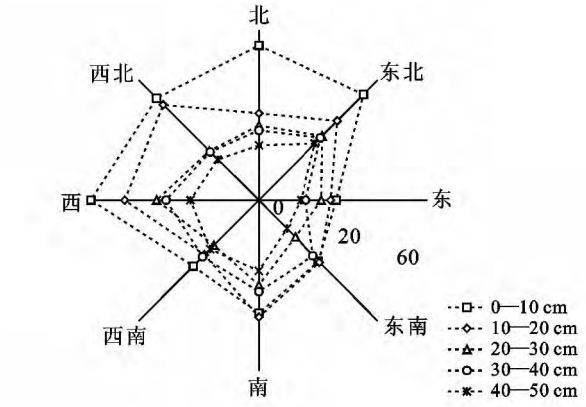


图 3 不同坡向土壤有机质变化

3.4 河流不同距离缓冲带的土壤有机质结构分析

毛丽丽等[19]关于黑河下游河道渗漏面积估算中得出结论，黑河渗漏近似平均宽度约 321.7 m。为研究与河流距离对土壤有机质的影响，依据此黑河渗漏宽度，本研究将 500 m 作为一个缓冲带宽度，则第 1 缓冲带就可以基本包含两岸浸润带，第 2 至第 6 缓冲带不受河流渗漏影响。使用 ArcGIS 9.3 的缓冲区分析工具，分别统计了 10 个土层在不同缓冲带上的有机质含量如图 4 所示。从图 4 可看出，距离河岸越远，土壤有机质含量逐渐增加，这种趋势在 0—10 和 10—20 cm土层尤其明显，随着深度向下，这种趋势逐渐减弱，说明不同缓冲带只对土壤表层有机质有显著的影响。0—10 和 10—20 cm 层的趋势线明显高于其他土层，表明不论距河远近，有机质均随着深度增加而减低。

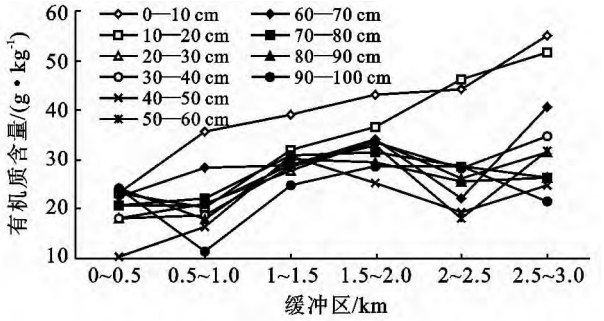


图 4 不同缓冲区土壤有机质变化

3.5 土壤有机质垂直分布特征分析

由于成土过程对疏松物质的改造作用，特别是腐殖质的形成和加入过程，以及颗粒与溶解物质的转移过程，导致土壤内部沿垂直方向发生分异，形成了一些物理和化学性质明显不同的水平层次[20]。为研究土壤有机质在垂直方向上的分布特征，将所有土样按土层深度分成 10 层，对每一土层做不同地类、高程、坡度、坡向以及缓冲区的方差分析，分析结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，当 $p<0.05$，则说明其具有显著性差异，不同地类间只在 0—10 和 10—20 cm 土层具有显著性差异，其 p 值分别为 0.003 和 0.042。不同高程组间也有同样的结果，坡度和坡向因素的结果显示都不具有显著性差异。

土壤有机质沿垂直方向分布的特征主要是由有机质的积累和分解两个过程共同影响,而此过程又受到多种因素控制,例如土地利用类型、地貌特征、生态景观类型、土壤类型、土壤坡面沉积发育、植被覆盖程度和气候条件等因素。本研究通过对地类、高程、坡度、坡向和缓冲区分别做单因素方差分析得知,在渭河干流区域只有土地利用类型和高程因素在 20 cm 以上土层有显著性差异,有机质主要分布在耕层,尤其是农田、果园地类,耕层以下土壤含有机质极少,所以影响程度也相对减弱。本研究区是一个沿河流方向的狭长地带,坡度坡向因素差异较小,并且耕层下层土壤多沙石,造成坡度坡向等其他因素并未对有机质造成显著影响。但在 10 cm 深度以上的表层 p 值明显小于下层土壤,有机质主要分布在地表最上面的有机质层和淋溶层,所以各影响因素只在表层土壤有显著影响,随着土层深度向下,有机质含量逐渐减少,各影响因素对有机质的影响效果也逐渐减弱。

4　结 论

(1) 渭河流域干流区域土壤有机质含量总体偏低,分布不均,变异性较大,随着土层深度向下逐渐降低。不同用地类型的有机质含量的顺序是:农田>林地>果园>荒滩草地。高程对表层土壤有机质有显著影响,随着海拔升高,有机质含量逐渐增加。坡度对有机质的影响不显著,但随着坡度增加,有机质有下降的趋势。阴坡和半阴坡的有机质含量明显高于阳坡,但随着深度增加,这种现象越来越不明显。

(2) 随着缓冲区域的扩大,0—20 cm 深度,在同一水平土层上,有机质含量逐渐升高,20 cm 以下土层这种趋势逐渐减弱。每一个缓冲带与总体土壤有机质的分布规律相似,即随深度增加有机质含量逐渐减少。

(3) 土地利用类型、海拔、坡度、坡向以及距离河流的距离这些影响有机质变化的因素,只在 20 cm 以上土层具有显著性,对下层土壤的影响效果逐渐减弱。所以在研究渭河干流区域土壤有机质时,所采土壤样本可以只取到表层 20 cm。

(4) 本研究依据相关文献以及采样条件,选择 500 m 为缓冲带宽度,仅分析了 3 000 m 范围内的有机质分布规律。鉴于研究区域地形复杂,人为影响等因素干扰,河流对两岸的土壤有机质影响范围、强度及作用机理还有待进一步研究。本研究所得结论与大部分研究基本一致,并且适合于渭河流域,为流域内土壤资源开发、保护以及生态修复提供重要决策依据。

[参 考 文 献]

[1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[2] 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.

[3] 陈冲,周卫军,郑超,等. 红壤丘陵区坡度与坡向对耕地土壤养分空间差异的影响[J]. 湖南农业科学,2011,41(23):53-56.

[4] 潘明安. 不同种植方式下低山丘陵区茶园土壤有机质空间变异研究[J]. 土壤通报,2010,41(3):558-562.

[5] 彭陶. 绿洲棉田土壤有机质的时空变异性研究[J]. 土壤通报,2010,41(3):563-567.

[6] 杜冠华,李素艳,郑景明,等. 洞庭湖湿地土壤有机质空间分布及其相关性研究[J]. 现代农业科学,2009,16(2):21-32.

[7] Mishra T K, Banerjee S K. Spatial variability of soil pH and organic matter under *Shorea robusta* in lateritic region [J]. Indian Journal of Forestry, 1995,18(2):144-152.

[8] 李婷. 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.

[9] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. 地理学报,2002,57(5):587-594.

[10] 占车生. 基于遥感的渭河关中地区生态景观格局变化研究[J]. 资源科学,2011,33(12):2349-2355.

[11] 程三友,王红梅,李英杰,等. 渭河水系流域地貌特征及其成因分析[J]. 地理与地理信息科学,2011,27(3):45-49.

[12] 耿成杰,李远清,刘廷立. 关中渭河流域两岸的土壤及其改良利用[J]. 土壤通报,1959,3(4)20-27.

[13] 宋维念,占车生,李景玉,等. 近 30 年来渭河关中地区土地利用时空格局的遥感分析[J]. 中国土地科学,2012,26(2):56-61.

[14] Cho S E. Effects of spatial variability of soil properties on slope stability[J]. Engineering Geology, 2007,92(3/4):97-109.

[15] 钟远平. 三峡库区土壤有机质区域分布及影响因素[J]. 水土保持学报,2006,20(5):73-76.

[16] 薛晓辉,卢芳,张兴昌. 陕北黄土高原土坡有机质分布研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(6):69-74.

[17] 江忠善,王志强,刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间定量化研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(1):1-9.

[18] 黄元仿,周志宇,苑小勇,等. 干旱荒漠区土壤有机质空间变异特征[J]. 生态学报,2004,24(12):2776-2781.

[19] 毛丽丽,于静洁,张一驰,等. 黑河下游河道渗漏面积的估算及其精度初步研究[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(5):27-58.

[20] 刘南威. 自然地理学[M]. 北京:科学出版社,2007.