

朱阳春, 张振华, 赵学勇, 等. 河套灌区土壤有机碳和总碳的空间异质性及相关性分析[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(6): 1294-1300.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.06.014

河套灌区土壤有机碳和总碳的空间异质性及相关性分析

朱阳春¹, 张振华¹, 赵学勇², 连杰², 童非¹, 张娜¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 应用地统计学方法, 研究河套永济灌域表层土壤(0~20 cm)有机碳(TOC)和总碳(TC)的空间异质性及二者之间的相关性。结果表明, 土壤 TOC 平均含量为 6.96 g/kg, TC 平均含量为 21.06 g/kg, TOC 占 TC 的 33.05%, 二者之间线性回归方程为: $Y_{TC} = 13.169x_{TOC} + 1.252$ ($F = 142.846, P < 0.001$)。在不同土地利用方式下, TOC 含量差异非常显著 ($F = 13.136, P < 0.001$), 林地和农田中 TOC 含量显著高于荒地 ($P < 0.05$)。TOC 和 TC 的半方差拟合结果分别为高斯模型和球型模型, 空间相关度分别为 16.73% 和 0, 具有强烈的空间相关性。TOC 和 TC 含量在空间上呈斑块状分布, 以永济干渠为中心向两边对称增高。虽然土壤受到施肥、灌溉等农业管理小尺度因素的影响, 造成土壤 TOC 在不同土地利用方式下的含量差异显著, 然而却未达到破坏其原有空间格局的程度, TOC 和 TC 的空间变异均由土壤母质、气候、地形等自然因素引起, 可能与海拔、地形起伏等因素引起的太阳辐射、降水格局及植被覆盖等差异有关。

关键词: 土地利用方式; 土壤有机碳; 土壤总碳; 空间异质性

中图分类号: S151.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)06-1294-07

Spatial heterogeneity and relationship between soil total organic carbon and total carbon in the Hetao irrigation district

ZHU Yang-chun¹, ZHANG Zhen-hua¹, ZHAO Xue-yong², LIAN Jie², TONG Fei¹, ZHANG Na¹

(1. Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Geostatistical techniques were used to quantify the spatial heterogeneity and relationship between soil total organic carbon (TOC) and total carbon (TC) at 0-20 cm soil layer in the Yongji irrigation sub-district (YD) from the Hetao irrigation district (HD). The results showed that the mean values of TOC and TC were 6.96 g/kg and 21.06 g/kg, respectively. TOC accounted for about 33.05% of TC and the linear regression equation was $Y_{TC} = 13.169x_{TOC} + 1.252$ ($F = 142.846, P < 0.001$). TOC significantly differed among three land-use types ($F = 13.136, P < 0.001$), and the concentration in cropland and forestland significantly higher than that in wasteland ($P < 0.05$). TOC and TC was mostly accordance

with the gaussian and spherical models, respectively, and the values of special related degree were 16.73% and 0, indicating that soil carbon strongly correlated in the special heterogeneity. TOC and TC distributed plaques in the YD on the space, with increasing from the Yongji Canal (YC) to both sides, symmetrically. The fertilization, irrigation and other farm management would cause difference of TOC among the different land-use types at small scale, but that

收稿日期: 2017-08-02

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(16)1051]; 江苏省农业科学院基本科研业务专项基金项目[ZX(17)2017]

作者简介: 朱阳春(1985-), 女, 浙江衢州人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤污染监测与土壤修复研究。(E-mail) zhuyangchun1008@sina.com

通讯作者: 张振华, (E-mail) zhenhuaz70@hotmail.com

did not destroy soil carbon in the original space. The special heterogeneity of TOC and TC in the YD was subjected to natural factors such as soil parent material, climate, topography and so on, which maybe have relation to the differences of solar radiation, precipitation and vegetation pattern caused by the differences of altitude, topographic relief and other natural factors.

Key words: land use type; soil total organic carbon; soil total carbon; spatial heterogeneity

土壤碳(C)库是地球上最大的碳库,其碳储量约是地上部生物量的3倍和大气碳库储量的2倍,其中土壤有机碳(TOC)库储量为2 000 PGC^[1-2]。土壤碳库是全球碳循环的重要构成,其空间异质性受气候、地形、母质、植被类型等结构性因素和取样、测量误差等随机性因素,以及人为因素包括土壤农艺措施(施肥、灌溉、耕作等)、土地利用方式等的综合影响,是当前生态学、林学、土壤学等领域的研究热点之一^[3-4]。杜虎等^[5]的研究结果表明,土壤有机碳密度拟合为指数模型,在喀斯特区域含量低,非喀斯特区域含量高,碳密度在不同植被类型和土壤类型下差异显著,海拔是该地区森林土壤TOC空间异质性的主要影响因素。Maillard等^[6]研究全球19个国家177个草地土壤TOC储量及空间异质性,结果表明,空间尺度及采样深度均对TOC储量有一定影响。农田土壤是大气二氧化碳(CO₂)的一个重要来源,是全球土壤碳库研究的重要内容。Li等^[7]分析美国南都山麓地带土地利用方式对土壤基本特性和微量元素空间异质性的影响,结果表明,在阔叶林、农田、松树林等土地利用方式下,土壤中C含量、N含量、pH值、Cu含量、Zn含量、Fe含量等差异显著,耕作等农艺措施显著影响不同土地利用方式间的土壤特性(C、N、C:N)及微量元素等空间结构的异质性。贾晓红等^[3]运用地统计学方法,分析黄灌沙区农田耕层土壤性状空间异质性,结果表明,土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾等的空间异质性主要受施肥、灌溉和作物轮作等随机性因子影响,在农业活动中,应注重施肥和灌溉的方式,避免因土壤性状变异导致肥料利用效率降低。因此,研究农田土壤碳的空间异质性,可以对土壤肥力空间分布有一个准确的了解,预测土壤养分及其空间变化特征,是开展精确农业和清洁农业研究的基础。

内蒙古河套灌区位于干旱区内蒙古西部黄河冲积平原,具有2 000多年的农业灌溉历史,是中国主要的商品粮基地。灌区约有90%以上的农业退水,经总排干,最终汇入乌梁素海,导致乌梁素海富营养

化程度加重^[8]。因此,本研究拟基于地统计学半方差函数模型,分析河套灌区土壤TOC和总碳(TC)的空间异质性,分析不同土地利用方式下的差异性,以期充分掌握土壤肥力的空间分布,合理规划土地利用方式,合理施肥,提高土壤养分利用率,为精确施肥,发展清洁农业,保护流域生态环境提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永济灌域位于河套灌区中部,海拔1 039 m,年降雨量130~220 mm,年蒸发量1 900~2 500 mm,降雨主要集中于7-8月。灌域以永济干渠为主,从总干渠引黄河水灌溉,土地总面积2 520.0 km²,灌溉面积1 167.5 km²,主要担负行政区域内临河区的7个乡镇、2个国营农场及五原县银定图克镇和乌拉特中旗呼鲁斯太镇部分土地的农业灌溉任务,退水汇入四排干和五排干,再经总排干,最后汇入乌梁素海间接汇入黄河。灌域主要的土地利用类型为农田、人工林地和荒地,土壤类型为灌淤土,质地包括沙壤土、轻壤土和黏壤土。农田和林地每年施用一定量的有机肥和无机肥,荒地不施肥。灌域内所有土壤采用大水漫灌的方式。

1.2 样品采集与测定

在充分了解永济灌域土壤基本概况的基础上,根据不同土地利用方式、地形、地貌等因素选择采样区。2013年5月夏灌之前,共设置125个0~20 cm土壤采样点,其中荒地样点27个,林地样点24个,农田样点74个(图1),每个样点以S形随机取3~5个样,混匀后装袋备用。同时记录每个采样点的经纬度、海拔、地形特征、施肥量、灌溉量、种植类型等基本情况。

所有土壤样品剔除杂石、杂草、根系和动物残体等杂质后,在室内自然晾干,用四分法缩分至约1 kg,研磨,过2.00 mm和0.15 mm尼龙筛,装袋备用。土壤pH值采用酸度计法(水土比5:1)测定,

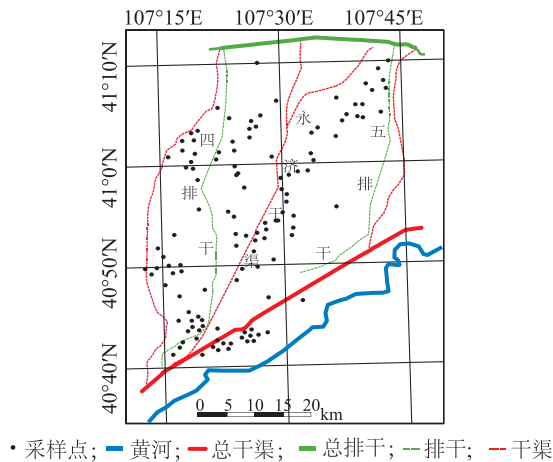


图1 永济灌域表层土壤采样点分布示意图

Fig.1 The soil sampling points in the Yongji irrigation sub-district

永济灌域土壤 pH 平均值为 9.13。采用元素分析仪测定土壤 TOC 含量和 TC 含量。

1.3 数据处理

1.3.1 地理统计方法 半方差函数是研究变异性的关键函数,公式^[9]为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数, h 为2个样本间的分离距离, $z(x_i)$ 和 $z(x_i+h)$ 分别是随机变量在空间位置 x_i 和 (x_i+h) 上的取值, $N(h)$ 是分离距离为 h 时的样本总数。

在建立理论模型时,要对模型进行最优拟合。而实际变异函数值 $\gamma(h)_1$ 和理论模型计算的变异函数值 $\gamma(h)_2$ 的差称为残差(RSS),公式^[10]为:

$$RSS = \sum_{i=1}^n [\gamma(h_i)_1 - \gamma(h_i)_2]^2 \quad (2)$$

表1 土壤有机碳和总碳统计分析结果

Table 1 Statistical analysis of distribution of total organic carbon (TOC) and total carbon (TC) in 0-20 cm soil layer

项目	样本数 (个)	最大值 (g/kg)	最小值 (g/kg)	平均值 (g/kg)	标准差	变异系数 (%)	分布
有机碳含量	125	12.76	1.35	6.96	2.42	34.79	正态分布
总碳含量	90	26.93	11.80	21.06	3.26	15.47	正态分布

2.2 土壤 TOC 含量和 TC 含量之间的回归分析
灌域土壤 TOC 含量和 TC 含量之间的相关性非

根据 RSS 最小原则,对试验半方差函数进行拟合,得到半方差函数的理论模型。 C_0 为块金值,反映最小抽样尺度下变量的变异性及测量误差。 C 为结构方差,表示非随机原因形成的变异。 (C_0+C) 为基台值,表示系统属性或区域化变量的最大变异程度。 A 为变量空间自相关变异的尺度,在尺度内,变量具有空间自相关特征,反之不存在。

块金值与基台值的比值 $[C_0/(C_0+C)]$ 为空间相关度,反映可度量空间自相关变异所占的比例。 $[C_0/(C_0+C)] < 25\%$,表示具有强烈的空间相关性,主要由土壤母质、地形等非人为因素引起; $[C_0/(C_0+C)]$ 为 25%~75%,表示具有中等相关性; $[C_0/(C_0+C)] > 75\%$,说明系统相关性很弱,主要是由人类活动引起的^[10]。

1.3.2 数据处理 在 95%的置信区间下,利用 SPSS 19.0 软件包中的回归分析模块分析 TOC 和 TC 之间的相关性,利用 ArcGIS 10.0 绘制采样点分布示意图。利用 ArcGIS 10.0 软件的地统计模块,并采用克里格空间内插法,将土壤 TOC 和 TC 以属性挂接的方法连接到空间数据中,再进行空间分析,绘制不同等级土壤 TOC 含量和 TC 含量的空间分布图。采用 GS+ 软件进行半方差分析,分析土壤 TC 和 TOC 的空间异质性并绘制 TC 的空间分布等值图。

2 结果与分析

2.1 土壤 TOC 含量和 TC 含量的基本特征

K-S 检验结果表明,土壤 TOC 含量和 TC 含量均符合正态分布。表 1 显示,土壤 TOC 和 TC 的平均含量分别为 6.96 g/kg 和 21.06 g/kg,TOC 约占 TC 的 33.05%。从变异系数来看,TOC 含量波动较大,变异系数为 34.79%,TC 含量波动小,变异系数为 15.47%。

常显著,回归分析结果(图 2)表明,二者之间呈显著正相关的线性关系($F = 142.846, P < 0.001$),线性回

归方程为: $Y_{TC} = 13.169x_{TOC} + 1.252$ 。

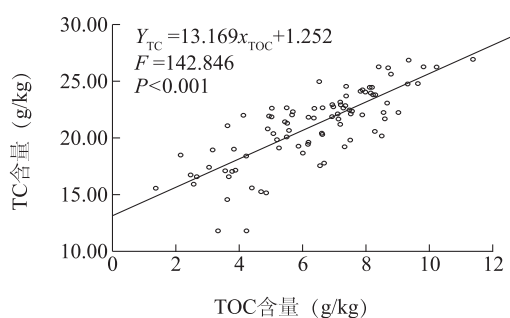


图2 土壤有机碳含量和总碳含量之间的回归方程

Fig.2 The regression equation of TC and TOC in 0-20 cm soil layer

2.3 不同土地利用方式下土壤 TOC 含量和土壤 TC 含量的差异性

图3显示,3种土地利用方式下的土壤 TOC 含量差异显著 ($F = 13.136, P < 0.001$), 林地和农田土壤 TOC 含量分别为 7.78 g/kg 和 7.40 g/kg , 显著高于荒地土壤中 TOC 含量 ($P < 0.05$)。图4显示,不同土地利用方式下,土壤 TC 含量的差异不显著 ($F = 1.105, P > 0.050$), 荒地、林地和农田土壤 TC 含量的平均值分别为 20.25 g/kg 、 20.53 g/kg 和 21.43 g/kg 。

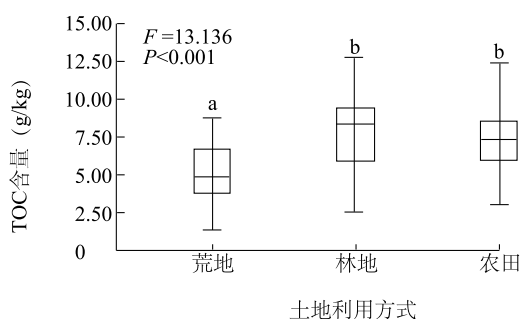


图3 不同土地利用方式下土壤有机碳含量的差异性

Fig.3 The differences of soil TOC content under different land-use types

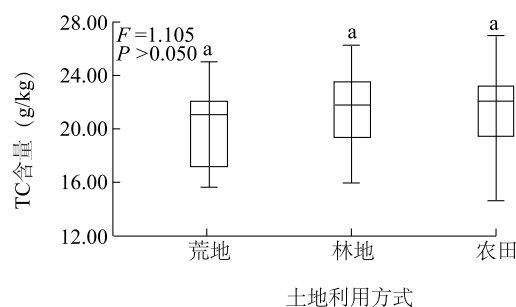


图4 不同土地利用方式下土壤总碳含量的差异性

Fig.4 The differences of soil TC content under different land-use types

2.4 土壤 TOC 和 TC 的空间结构

表2和图5显示,永济灌域土壤 TOC 含量和 TC 含量的半方差拟合效果较好,分别为高斯模型和球型模型,残差平方和非常低,很好地反映了土壤碳的空间结构特征。TC 的空间相关度为 0,具有强烈的空间自相关性。TOC 的空间相关度为 16.73%,小于 25.00%,以结构性变异方差为主。在研究区域内,TOC 和 TC 空间自相关变异的尺度分别为 980 m 和 3 790 m。

2.5 土壤 TOC 含量和 TC 含量的空间分布特征

图6显示,灌域土壤 TOC 含量在空间上呈斑块状分布,大部分含量集中于 $5.47 \sim 8.64 \text{ g/kg}$, 其分布总体呈现中间低两边较高的趋势。土壤 TOC 含量较高 ($> 8.64 \text{ g/kg}$) 的区域位于总干渠永济段下游和总排干永济段上游以及五排干下游,土壤 TOC 含量较低 ($< 5.47 \text{ g/kg}$) 的区域位于总排干下游和五排干上游。

图7显示,土壤 TC 含量的空间变化与 TOC 含量的空间变化类似,呈斑块状,空间差异较小,总体呈中间低两边高的趋势。土壤 TC 含量较高 ($> 22.53 \text{ g/kg}$) 的区域位于五排干上游、总干渠上游和总排干上游,土壤 TC 含量较低 ($< 17.33 \text{ g/kg}$) 的区域位于灌域东北角。

表2 土壤有机碳含量和总碳含量的半方差函数模型及参数

Table 2 Semivariogram theoretical models and parameters of TOC and TC in soil

特性	样本数 (个)	模型类型	C_0	C_0+C	空间相关度 (%)	A (m)	RSS ($\times 10^{-3}$)
有机碳	125	高斯	0.027 4	0.163 8	16.73	980	3.633
总碳	90	球型	0	0.026 5	0	3 790	0.532

C_0 为块金值; C_0+C 为基台值;A为空间自相关变异的尺度;RSS为残差。

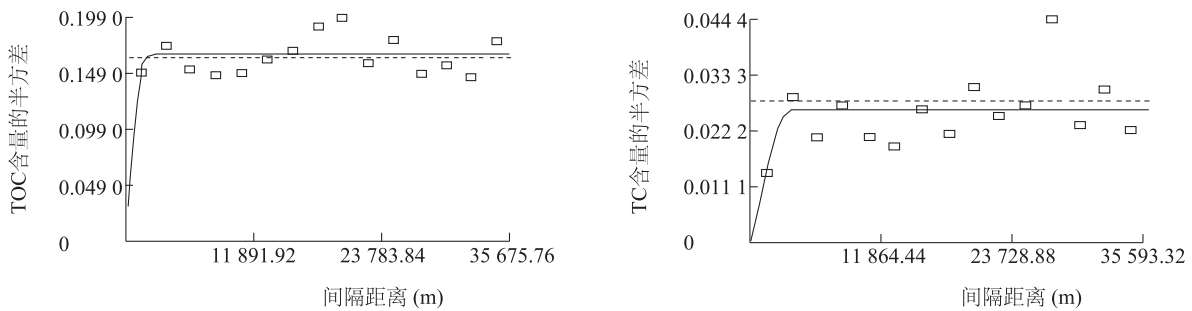


图5 土壤有机碳和总碳的半方差函数

Fig.5 Semivariogram of TOC and TC in 0-20 cm soil layer

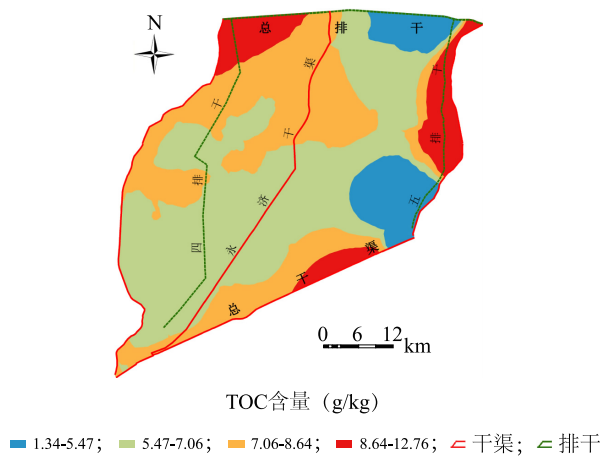


图6 土壤有机碳含量的空间插值

Fig.6 Interpolation maps of TOC in surface soil

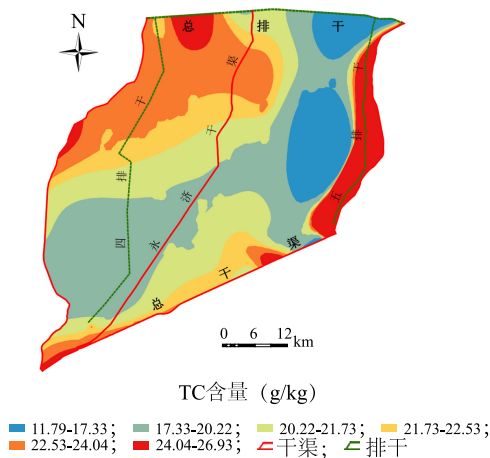


图7 土壤总碳含量的空间插值

Fig.7 Interpolation maps of TC in surface soil

分组成。SIC 是指以碳酸钙、碳酸根、碳酸氢根等形式存在于土壤中的碳素,在土壤中相对比较稳定,主要存在于干旱半干旱区的土壤中^[11]。中国西北干旱区土壤 SIC 库的碳含量一般比 TOC 库高2~5 倍,占全国土壤 SIC 库的 60.00%以上^[12]。若土壤碳库以 SIC 库为主,表明其肥力水平低,供肥、供氮和保氮能力差^[13]。本研究中,地处干旱区的河套永济灌域,土壤 TOC 平均含量为 6.96 g/kg,约占 TC(平均值为 21.06 g/kg)的 33.05%,二者之间呈显著正相关的线性关系,回归方程为: $Y_{TC} = 13.169x_{TOC} + 1.252$ 。可见,灌域土壤 TOC 在土壤 TC 中占有的比重相对较低,SIC 则是灌域表层土壤碳库的主要存在形式。这与 Tan 等^[11]的研究结果类似,该地区土壤 SIC 含量是有机碳含量的 2.1 倍,约占全国 SIC 含量的 18.40%,并且在不同土地利用方式和不同土壤类型中差异显著。因此,研究区当地的农业活动应注重提高土壤中 TOC 的含量,提高土壤肥力。

土壤 TOC 是土壤养分循环转化的核心,是土壤有机质的重要组成部分,直接影响土壤肥力的高低^[14]。土壤约 94%~98%的有机碳含量因土地利用方式的变化而变化^[15],不同土地利用方式可导致土地覆盖变化,影响植被残余量、土壤呼吸作用和微生物活动,进而影响土壤 TOC 的输入和输出平衡^[16]。本研究中,农田、林地和荒地 3 种土地利用方式下土壤 TOC 含量的差异性非常显著 ($F = 13.136, P < 0.001$),有施肥等农业活动的土壤(林地和农田)中 TOC 含量显著高于未施肥荒地土壤中的 TOC 含量。已有研究结果^[17]表明,施肥可通过影响作物生长来增加土壤中有机的输入,从而有效增加土壤中 TOC 的含量。李小涵等^[13]研究长期定位施肥引起的黄土高原旱地土壤不同形态碳的变化,其结果表明,土壤 TOC 含量随着氮肥施用量的增加

3 讨论

3.1 土壤有机碳和总碳之间的相关关系

土壤碳库由土壤 TOC 库和无机碳(SIC)库 2 部

而增加,尤其是土壤轻质 TOC 含量增幅高达 31%~106%,但过量施肥则不利于 TOC 积累。在经济利益的驱动下,研究区农民对林地和农田的水肥投入较高,实行大水大肥的管理方式。据统计,无机肥的年平均施肥量为 1 500~3 000 kg/hm²,2013 年全年施肥量为 5.06×10⁷ kg^[18],同时施用一定量的有机农家肥。可见,灌域内的大量农业投入,显著增加了该灌区土壤 TOC 含量。

TOC 在灌域内的空间插值分布,大体上以永济干渠为中心,呈中间低两边高的对称分布。永济干渠是研究区最大最主要的引黄干渠,灌域采用大水漫灌的灌溉方式,随着接纳的农业退水量的增加,表层土壤 TOC 含量也随之增加,即从引水干渠到接纳退水的排干,表层土壤 TOC 含量逐渐增加。调查发现,目前四排干和五排干水质恶臭不断,富营养化程度较为严重。由此可知,施肥等农业措施可在一定程度上提高表层土壤 TOC 含量,然而在实际生产中,化肥的当季利用率低于 50%,氮素化肥利用率低于 30%^[10],加上不合理的灌溉方式(漫灌)恶化了灌域内排水沟的水质,引发农业面源污染等一系列环境问题,这些退水最终汇入乌梁素海,对乌梁素海的水环境造成危害。因此,在利用施肥等农艺措施提高当地土壤 TOC 含量的同时,应注重提高肥料的利用率,采用先进的灌溉方式,发展清洁农业,减少农业面源污染。

3.2 土壤 TOC 和 TC 的空间异质性

由于成土母质、地形、气候等自然因素以及人为活动的不同,以地理统计学中半方差函数理论为基础,将空间格局与生态过程紧密联系,可定量揭示土壤碳等属性变量在空间上的分布、变异及其他相关特征^[19-20]。本研究对土壤 TOC 和 TC 进行半方差函数分析,结果表明,土壤 TOC 和 TC 分别符合高斯模型和球型模型,表现为强烈的空间相关性,说明在一定空间尺度下,土壤碳空间的异质性受气候、地形、成土母质等自然因素的影响比较大。研究区土壤为灌淤土沉积而成,数百年来,土壤经植被演替和农业改良后,发育成灰褐土、栗钙土、棕钙土、半水成土、盐碱土和人为土等土壤类型^[21]。在这个过程中,土壤 TOC 含量和 TC 含量也随之发生演变^[21],尽管目前研究区土壤受到施肥等农业管理的小尺度因素影响,造成土壤 TOC 含量在不同土地利用方式下差异显著,然而却未达到破坏其原有空间格局的程度,

TOC 空间相关度仍低于 25%,这与张文敏等^[22]的研究结果相似。虽然不同土地利用方式、管理措施、凋落物量的差异导致土壤有机碳含量输入和输出存在差异,进而增加土壤有机碳的空间异质性,然而有机碳含量在空间上表现为强烈的空间相关性,结构性因素是其空间异质性的主导因素。

研究区土壤 TC 空间相关度接近 0,具有非常强烈的空间自相关性。有研究结果^[23]表明,土壤碳含量与海拔、地形起伏及坡度等因素控制下的太阳辐射和降水的空间再分配等有关。舒洋等^[24]研究了内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗乌拉山地区天然油松林土壤碳密度空间的异质性,结果表明,不同坡向土壤碳密度存在显著差异,阴坡碳密度高于阳坡碳密度,这是因为阴坡光照度弱,水分状况较好,阴坡凋落物分解及微生物活性与阳坡有较大的差别,导致土壤 TOC 积累量存在差异,引起碳密度的变异性。刘玲等^[25]研究长白山低山区森林土壤有机碳和养分的空间异质性,结果表明,表层土壤 TOC 与海拔和坡向余弦值呈显著正相关,这可能与高海拔和阴坡地区植物碳输出和水分蒸发量较低有关。本研究区是鄂尔多斯台地的一部分,地质结构属于河套断陷,地形起伏大,土壤母质的再分布不同,地上生长的植物具有一定的差异性,对地表土壤的贡献率有差异,因而导致土壤碳积累量不同,这可能是造成土壤碳空间上异质性的主要原因^[24],但研究区土壤 TOC 和 TC 结构性变异的具体原因仍需进一步研究。

4 结论

永济灌域表层(0~20 cm)土壤 TOC 占 TC 的 33.05%,二者之间的回归方程为: $Y_{TC} = 13.169x_{TOC} + 1.252$,灌域土壤以 SIC 为主,土壤肥力低。施肥等农业活动可有效增加表层土壤 TOC 含量,使不同土地利用方式下的 TOC 含量差异显著($P < 0.001$, $F = 13.136$)。不合理的灌溉方式,加重排水沟的富营养化程度,对乌梁素海产生潜在的生态危害。

灌域土壤 TOC 和 TC 半方差拟合分别为高斯模型和球型模型,空间相关度低于 25%,结构性变异是其空间异质性的主导因素。尤其是土壤 TC,其空间相关度为 0,具有非常强烈空间相关性。TC 含量最高点位于海拔最高及地形起伏处,这可能与海拔、地形起伏等因素引起的太阳辐射、降水格局及植被

覆盖等差异有关。

参考文献:

- [1] 张亚茹, 欧阳旭, 褚国伟, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有机碳和全氮的空间分布[J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 19-23.
- [2] VASENEV V, STOORVOGEL J J, VASENEV I I. Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region[J]. Catena, 2013, 107: 96-102.
- [3] 贾晓红, 李新荣, 周海燕, 等. 黄灌沙区农田耕层土壤性状空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 101-104.
- [4] TAKOUTSING B, MARTÍN J A R, WEBER J C, et al. Landscape approach to assess key soil functional properties in the highlands of Cameroon: repercussions of spatial relationships for land management interventions [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 178: 35-44.
- [5] 杜 虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 282-291.
- [6] MAILLARD É, MCCONKEY B G, ANGERS D A, et al. Increased uncertainty in soil carbon stock measurement with spatial scale and sampling profile depth in world grasslands: a systematic analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 236: 268-276.
- [7] LI J W, RICHTER D D, MENDOZA A, et al. Effects of land-use history on soil spatial heterogeneity of macro-and trace elements in the Southern Piedmont USA[J]. Geoderma, 2010, 156: 60-73.
- [8] ZHAO Y H, DENG X Z, LU Q, et al. Regional rural development, nitrogen input and output in farming-grazing system and its environmental impacts [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 542-556.
- [9] WANG S K, ZHAO X Y, QU H, et al. Variation in soil water content to rainfall under *Caragana microphylla* shrub in Horqin sandy land[J]. Journal of Arid Land, 2010, 2(3): 174-179.
- [10] 郝芳华, 欧阳威, 李 鹏, 等. 河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(5): 845-852.
- [11] TAN W F, ZHANG R, CAO H, et al. Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess plateau region of China[J]. Catena, 2014, 121: 22-30.
- [12] 许文强, 陈 曦, 罗格平, 等. 土壤碳循环研究进展及干旱区土壤碳循环研究展望[J]. 干旱区地理, 2011, 34(4): 614-620.
- [13] 李小涵, 李福翠, 刘金山, 等. 长期施氮引起的黄土高原旱地土壤不同形态碳变化[J]. 中国农业科学, 2014, 47(14): 2795-2803.
- [14] 李银科, 刘世增, 李发明, 等. 景电灌区几种土地利用方式土壤有机碳和养分特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 267-271.
- [15] 汪明霞, 朱志锋, 刘 凡, 等. 汉江平原不同土地利用方式下农田土壤有机碳组成特点[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 24-28.
- [16] FRANCAVIGLIA R, RENZI G, LEDDA L, et al. Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599: 789-796.
- [17] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.
- [18] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 586-639.
- [19] FANG X, XUE Z J, LI B C, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess plateau, China[J]. Catena, 2012, 88: 6-13.
- [20] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地沙质草地土壤水分对干旱和降雨响应的空间变异性[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 140-144.
- [21] 张银辉, 罗 毅, 刘纪远, 等. 灌区土地利用变化驱动因素分析-以内蒙古河套灌区为例[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 81-86.
- [22] 张文敏, 姜小三, 吴 明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087-1095.
- [23] WANG J, FU B J, QIU Y, et al. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 48: 537-550.
- [24] 舒 洋, 魏江生, 周 梅, 等. 乌拉山天然油松林土壤碳密度空间异质性研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1304-1307.
- [25] 刘 玲, 王海燕, 戴 伟, 等. 长白山低山区森林土壤有机碳及养分空间异质性[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2460-2468.

(责任编辑:王 妮)