

doi:10.11937/bfyy.20194661

基于地理探测器的宁夏贺兰山东麓土壤有机碳驱动分析

陈 锋, 贺 婧, 崔文斌

(宁夏大学 资源环境学院, 宁夏(中阿)旱区资源评价与环境调控重点实验室, 宁夏 银川 750021)

摘 要:以宁夏贺兰山东麓 7 年葡萄地为研究对象,通过地理探测器对土壤中总有机碳、轻组有机碳、重组有机碳、高活性、中活性和低活性有机碳与土壤中部分理化性质的关系进行分析,研究西北干旱半干旱地区耕作地块的土壤有机碳及其组分与土壤养分的相互关系。结果表明:贺兰山东麓葡萄产地土壤总有机碳含量低于我国平均水平,平均值为 $(3.93 \pm 2.49) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,变异强度为弱、中等变异,纵向呈下降(降-略升-降)趋势。交互探测发现,全钾、速效钾是轻组有机碳和活性有机碳解释力最强的交互因子。因子探测与生态探测结果表明,全氮是对土壤总有机碳的空间分布影响显著且贡献强度最大的因子,该研究可以深入了解西部地区土壤有机碳变化的驱动力提供参考依据。

关键词:土壤有机碳;地理探测器;驱动力;贺兰山东麓

中图分类号:Q 938.1⁺3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2020)17-0087-07

目前,气候变化成为全球关注的热点之一,特别是工业革命以来,因人类生产生活中的碳排放活动造成的全球变暖现象,已成为诸多学者的研究对象。全球碳库中,土壤有机碳库储量分别约占大气碳库和植被碳库的 2~3 倍,其短期的变化深刻影响着全球碳循环的稳定^[1-2]。因此,在碳排放贡献中,土壤有机碳库是其重要组成部分。此外,就全球来看,干旱区约占陆地面积的 30%^[3],旱区土壤有机碳对地球碳平衡具有重要意义。我国西北干旱半干旱地区作为“一带一路”关键协作区,生境特殊,生态脆弱,对该地区土壤有机碳多视角的研究成果诸多,当前对该地区土壤有机碳的研究内容主要针对

土壤有机碳储量及空间格局变化和土地利用方式等方面^[4-6],但对土壤有机碳的驱动关系的研究则相对较少。该研究特对该地区土壤有机碳及其组分与土壤养分的关系进行研究,深入了解土壤有机碳各驱动因子贡献强度。针对有机碳变化与养分的相互关系的研究方法看,多为常用统计学分析方法^[7-9],即通过相关分析或逐步回归分析等进行分析探讨,但此类方法可能会造成对各因子间作用的研究具有线性局限^[10],造成研究深度不足。为克服经典统计学分析方法的弱点,在无过多约束条件下来分析多因子之间的交互作用,该研究借助王劲峰发明的地理探测器模型^[11],利用“因子探测器”“生态探测器”“交互作用探测器”,以我国酿酒葡萄优良种植地区宁夏贺兰山东麓区为研究对象,对影响宁夏贺兰山东麓葡萄产地土壤有机碳空间分布的各驱动因子进行定量分析,探索贺兰山东麓土壤有机碳及其组分与其它因子的响应关系,同时为深入研究西部地区土壤有机碳变化的驱动力奠定基础。

第一作者简介:陈锋(1993-),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为自然资源环境。E-mail:cf0927@qq.com.

责任作者:贺婧(1977-),女,黑龙江五常人,博士,副教授,现主要从事农业环境与生态等研究工作。E-mail:819848204@qq.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41661050)。

收稿日期:2020-03-14

1 材料与方法

1.1 试验区概况

贺兰山东麓区(东经 $105^{\circ}45'$ ~ $106^{\circ}47'$, 北纬 $37^{\circ}43'$ ~ $39^{\circ}23'$)位于宁夏回族自治区境内,地处贺兰山以东,银川平原西部边缘,是宁夏黄河冲积平原和贺兰山冲积扇之间的洪积地带。该区属中温带干旱气候区,干旱少雨,蒸发强烈,年均降水量约 200 mm,光照充足,热量丰富,昼夜温差大,年平均日照时数为 2 600~3 000 h。该地区土壤以灰钙土为主,同时包括风沙土、灌淤土、砾质砂土和少量灰漠土,土壤质地疏松,地形起伏较小、沟壑较浅。由于该区独特地理区位和自然条件,成为世界最佳酿酒葡萄种植区之一,2002 年被确定为国家地理标志产品保护区,是我国最大的葡萄酒标志性地理产品保护产区^[12],如今葡萄酒产业已成为宁夏特色农业发展的优势产业,该区在建设发展过程中,大量原生荒漠草原改为葡萄种植基地,土地利用类型、土地覆被和土壤有机碳发生较大变化。

1.2 试验材料

经过前期对贺兰山东麓区进行实地调研发现,该区的土地葡萄种植时长为 1~20 年不等。考虑到种植时间对土壤有机碳的影响程度,筛选所占比例较大的种植年限为 7 年的葡萄地作为研究对象,同时,为避免土壤质地以及管理措施的不同造成的影响差异,研究对象选择面积较大且具有代表性的兰一酒庄的葡萄种植区为采样区域。

1.3 试验方法

样品采集时间为 2017 年 9 月,在采样区域内选择具有代表性的 200 m×200 m 的样区 3 个,在样区内布设 3 个样方,每个样方按照对角线法选择 5 个点作为采样点,5 点混合并用便携式手持 GPS 测定采样点位经纬度。每个点位共采集土壤剖面为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm 的 7 份土壤样品。样品在实验室风干,去除植物根系等杂物,使用立式行星磨仪(PBM-1A)研磨过 0.90、0.25、0.15 mm 标准筛,用于不同土壤养分指标的测定。

1.4 项目测定

1.4.1 土壤理化指标测定^[13]

土壤容重采用环刀法测定,土壤 pH 采用电位法测定,土壤碳酸钙含量采用中和滴定法测定,土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定,土壤全磷含量采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法测定,土壤全钾含量采用碱熔-火焰光度法测定,土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定,土壤速效磷含量采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 法测定,土壤速效钾含量采用 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定,土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。

1.4.2 土壤有机碳各组分测定

轻组和重组有机碳采用密度分组法^[14-15](密度为 $1.7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的 NaI 溶液)测定,通过重复震荡、离心、NaI 浸提方法,分离出重组有机质,同总有机碳测定。由于轻组有机碳含量少,其含量为用总有机碳含量减去重组有机碳含量。

活性有机碳组分采用高锰酸钾溶液氧化法测定,根据不同浓度高锰酸钾反应结果,计算出氧化的碳含量即为活性有机碳含量。该试验选择的 KMnO_4 浓度为 33、167、333 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,据此测定出的 3 组结果分别称其为高活性有机碳、中等活性有机碳和活性有机碳^[16]。

1.5 数据分析

采用 Office Excel 2016 软件对数据进行初步整理与分析;采用 SPSS 19.0 软件进行土壤有机碳含量描述性统计分析;采用地理探测器(Geo-Detector 2018)中的分异及因子探测、交互作用探测、生态探测进行土壤有机碳各组分与土壤理化性质(容重, pH, 碳酸钙、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾含量)之间的驱动关系探测。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳的剖面分布特征

贺兰山东麓种植 7 年葡萄地剖面(0~100 cm)土壤有机碳含量的描述性统计结果见表 1。有机碳平均含量为 $(3.93\pm 2.49)\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 低于我国平均水平 $17.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17]。最大值为 $12.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最小值为 $0.83\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 极差较

表 1 土壤总有机碳含量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistical results of soil total organic carbon content

土层深度	土壤有机碳平均含量	极小值	极大值	变异系数
Soil depth/cm	Average soil organic carbon content/(g · kg ⁻¹)	Minimum/(g · kg ⁻¹)	Maximum/(g · kg ⁻¹)	Coefficient of variation/%
0~10	8.22±3.53a	5.78	12.27	43.01
10~20	5.44±1.53ab	3.77	6.77	28.10
20~30	3.35±0.3bc	3.00	3.55	9.02
30~40	3.60±1.02bc	2.88	4.76	28.26
40~60	2.82±0.09bc	2.75	2.92	3.22
60~80	2.28±0.33c	1.91	2.53	14.28
80~100	1.82±1.34c	0.83	3.34	73.42
0~100	3.93±2.49	0.83	12.27	63.43

注:不同土层有机碳含量均值用不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。土壤有机碳含量分别由各层土壤有机碳平均含量和相对应的标准误差组成。
Note: The mean values of organic carbon content in different soil layers are denoted by different lowercase letters ($P<0.05$). Soil organic carbon content is composed of average soil organic carbon content and corresponding standard error in each layer.

大。从变异系数来看,各层土壤有机碳含量的变异系数差异较大,20~30、40~60 cm 变异系数分别为 9.02%和 3.22%,表现为弱变异性,其它层间均为中等强度变异性。

从表 1 还可以看出,从土壤有机碳随土层深度变化的情况来看,总的来说呈先快后缓慢的下降(降-略升-降)趋势,在 0~30 cm 层间下降迅速,30~40 cm 层略有回升,40~100 cm 层间呈缓慢下降态势。单因素方差分析结果表明,土层 0~10 cm 与 20~100 cm 和 10~20 cm 与 60~100 cm 土壤有机碳含量差异显著,20~100 cm 中的各层差异不显著。土壤有机碳含量主要集中在 0~20 cm 表土层中,约占整个剖面总有机碳含量的 49.64%,20~30、30~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层有机碳含量占剖面总有机碳的比例分别为 12.16%、13.07%、10.23%、8.27%和 6.61%,此外,经实际调研分析,30~40 cm 层有机碳含量略微提高,主要受到人为施放有机肥

料及土地翻耕等措施影响,使凋零脱落的葡萄枝叶、根系进入土壤表土以下,经土壤微生物分解转化产生部分有机碳有关。

2.2 土壤有机碳驱动力分析

2.2.1 分异及因子探测

分异及因子探测器主要是探测某驱动因子 X 对 Y 空间分异的解释力,用 q 值度量, q 的值域为 $[0,1]$,数值越大表明自变量 X 对属性 Y 的解释力越强,反之则越弱。该研究主要识别各驱动因子是否为影响土壤有机碳空间分布的主导因素, q 值越大表明驱动因子对土壤有机碳空间分异的解释力越强,值为 0 说明驱动因子对土壤有机碳的空间分布无影响,值为 1 说明驱动因子能够完全解释土壤有机碳的空间分布。

由表 2 可知,各驱动因子对土壤有机碳各组分的影响既存在统一性,又具有差异性。对有机碳各组分来说,全氮对多数有机碳组分均具有较好解释力,容重、碳酸钙、碱解氮、全磷、速效磷、全

表 2 土壤有机碳及其组分驱动强度分析

Table 2 Analysis of driving strength of soil organic carbon and its components

指标	全钾	全磷	全氮	速效钾	速效磷	碱解氮	碳酸钙	容重
Indicators	Total	Total	Total	Available	Available	Alkaline hydrolysis	Calcium	pH
	potassium	phosphorus	nitrogen	potassium	phosphorus	nitrogen	carbonate	density
总有机碳 Total organic carbon	—	—	0.983 5	—	—	—	—	—
轻组有机碳 Light fraction organic carbon	—	—	—	—	—	—	—	—
重组有机碳 Heavy organic carbon	—	—	0.960 7	—	—	—	—	—
高活性有机碳 Highly active organic carbon	—	—	0.966 9	—	—	—	—	—
中活性有机碳 Medium active organic carbon	—	—	0.960 3	—	—	—	—	—
活性有机碳 Active organic carbon	—	—	0.706 7	—	—	—	—	—

注:“—”为 q 统计量未通过 $P<0.05$ 检验。
Note: “—” for q statistics failed $P<0.05$.

钾和速效钾皆因 q 统计量未通过 $P < 0.05$ 的显著性检验,而不存在显著解释力,这表明全氮是影响土壤有机碳多数组分空间分布格局的主要驱动因子。但在不同有机碳组分中全氮所具有的贡献程度各不相同,由大到小排列为总有机碳(0.983 5) > 高活性有机碳(0.966 9) > 重组有机碳(0.960 7) > 中活性有机碳(0.960 3) > 活性有机碳(0.706 7)。轻组有机碳则未有驱动因子通过 q 统计值检验,说明不存在主导因子对轻组有机碳空间分布的影响具有显著的解释力。

2.2.2 交互探测

在实际环境中,土壤作为复杂的耦合系统,其内部土壤有机碳的分布同样会受多种因素共同影响,交互作用探测器目的就是用于检验各因子两两之间交互作用时是否会增加、减弱或相互独立的影响因变量,用以更好解释驱动机理。评价方法如下,先分别计算 2 个因子 q 值,分别记作 A、B,其次计算 2 个因子交互后的 q 值,用 C 表示,根据 C 与 A、B 的关系来判断交互后的影响情况。判断公式如下:非线性减弱为 $C < A$ 和 B;单因子非线性减弱为 $C < A$ 或 B;相互独立为 $C = A + B$;双因子增强为 $C > A$ 和 B;非线性增强为 $C > A + B$ 。

该研究探测各驱动因子两两共同作用时对土壤有机碳空间分异的影响程度。由表 3 可知,任何 2 种驱动因子交互后对总有机碳的空间分布影响为双因子增强或非线性增强,就影响土壤总有机碳的交互因子强弱关系来看,全氮与碳酸钙的交互作用影响最强(0.995 8);全氮与容重的交互作用次之(0.993 8);全氮与全磷,全氮与速效钾

交互作用同为(0.993 5)。该研究又进一步探测了各驱动因子对土壤轻组、重组和各类活性有机碳的交互影响。由表 4~8 可知,重组有机碳交互作用强弱情况排序为全氮和容重(0.988 5) > 全氮和碳酸钙(0.987 0);轻组有机碳排序为全钾和速效钾(0.979 7) > 全磷和碱解氮(0.953 6)。对活性有机碳为全钾和速效钾(0.949 6) > 全磷和碱解氮(0.949 2),中活性有机碳为全氮和速效钾(0.991 8) > 全氮和碳酸钙(0.983 4),高活性有机碳排序为全氮和速效钾(0.996 7) > 全氮和全钾(0.994 1)。

值得注意的是:对影响土壤有机碳各组分交互情况来看,全氮仍为多数组分的主要贡献因子,且其交互后的贡献程度明显高于各单独驱动因子的贡献。此外,由上述结果得知土壤总有机碳与重组有机碳的交互作用强的驱动因子存在相似关系,主要是由于该地区重组有机碳含量占总有机碳的比重达 80% 左右,因此二者有共同影响因子。轻组有机碳和活性有机碳的强性交互因子存在一致性,全钾和速效钾,全磷和碱解氮为二者交互作用贡献最高的 2 组,其交互关系对轻组有机碳为非线性增强和双因子增强,对活性有机碳均为非线性增强。虽然有研究分析发现全磷、全钾、速效钾等对土壤有机碳的影响并不显著^[18-19],但是通过该研究探测结果表明其二者交互后的作用显著,并高于全氮对其它因子的交互后的贡献。结果可能与不同地区土壤理化不同有关,此外,就交互探测来看,地理探测器相比其它相关分析,可以很好的对非线性关系进行解释。

表 3 不同影响因子对于土壤总有机碳的交互作用

Table 3 Interaction of different influencing factors on total soil organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium	0.250 5								
全磷 Total phosphorus	0.636 1	0.470 9							
全氮 Total nitrogen	0.992 8	0.993 5	0.983 5						
速效钾 Available potassium	0.982 2	0.784 9	0.993 5	0.556 8					
速效磷 Available phosphorus	0.860 0	0.745 2	0.991 7	0.637 5	0.279 6				
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.971 1	0.980 2	0.989 3	0.960 3	0.961 2	0.359 7			
碳酸钙 Calcium carbonate	0.750 1	0.956 3	0.995 8	0.937 1	0.451 5	0.932 7	0.140 4		
pH	0.974 3	0.851 2	0.991 6	0.910 1	0.869 6	0.919 9	0.825 4	0.662 3	
容重 Bulk density	0.846 7	0.745 0	0.993 8	0.765 3	0.809 8	0.966 2	0.491 5	0.844 1	0.187 0

表 4 不同影响因子对于重组有机碳的交互作用

Table 4 Interaction of different influencing factors on heavy organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium	0.176 5								
全磷 Total phosphorus	0.616 9	0.456 3							
全氮 Total nitrogen	0.983 3	0.980 8	0.960 8						
速效钾 Available potassium	0.977 7	0.778 0	0.986 3	0.576 9					
速效磷 Available phosphorus	0.851 5	0.730 5	0.976 9	0.654 2	0.281 1				
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.955 1	0.965 8	0.975 6	0.957 2	0.942 9	0.329 4			
碳酸钙 Calcium carbonate	0.769 0	0.944 4	0.987 0	0.945 0	0.423 8	0.892 6	0.124 6		
pH	0.956 6	0.840 9	0.976 0	0.920 0	0.866 9	0.880 7	0.791 3	0.655 7	
容重 Bulk density	0.841 0	0.735 2	0.988 5	0.775 5	0.810 6	0.931 6	0.435 1	0.829 9	0.169 0

表 5 不同影响因子对于轻组有机碳的交互作用

Table 5 Interaction of different influencing factors on light fraction organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium	0.497 3								
全磷 Total phosphorus	0.820 6	0.618 7							
全氮 Total nitrogen	0.908 2	0.910 4	0.570 2						
速效钾 Available potassium	0.979 7	0.885 5	0.763 0	0.376 0					
速效磷 Available phosphorus	0.899 4	0.876 9	0.659 3	0.486 0	0.223 7				
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.931 1	0.953 6	0.651 5	0.918 3	0.680 5	0.333 1			
碳酸钙 Calcium carbonate	0.719 8	0.896 0	0.884 9	0.862 6	0.602 6	0.753 9	0.164 8		
pH	0.842 6	0.851 8	0.709 0	0.712 5	0.611 3	0.705 1	0.753 9	0.402 4	
容重 Bulk density	0.832 8	0.866 8	0.923 4	0.769 2	0.603 3	0.847 5	0.632 6	0.678 4	0.240 3

表 6 不同影响因子对于活性有机碳的交互作用

Table 6 Interaction of different influencing factors on active organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium	0.416 5								
全磷 Total phosphorus	0.845 7	0.437 6							
全氮 Total nitrogen	0.914 5	0.834 7	0.706 8						
速效钾 Available potassium	0.949 6	0.676 8	0.947 1	0.447 9					
速效磷 Available phosphorus	0.696 4	0.752 2	0.902 5	0.722 5	0.031 1				
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.913 4	0.949 2	0.915 5	0.778 8	0.722 3	0.448 2			
碳酸钙 Calcium carbonate	0.797 1	0.848 9	0.832 6	0.803 9	0.399 6	0.647 3	0.293 6		
pH	0.901 1	0.688 3	0.917 1	0.666 5	0.476 2	0.584 8	0.665 5	0.138 5	
容重 Bulk density	0.614 7	0.534 7	0.917 8	0.643 7	0.326 5	0.726 6	0.548 4	0.626 4	0.145 2

表 7 不同影响因子对于中活性有机碳的交互作用

Table 7 Interaction of different influencing factors on medium active organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium	0.211 4								
全磷 Total phosphorus	0.557 2	0.430 9							
全氮 Total nitrogen	0.981 8	0.979 0	0.960 4						
速效钾 Available potassium	0.946 1	0.777 6	0.991 8	0.526 0					
速效磷 Available phosphorus	0.839 1	0.715 5	0.982 8	0.571 6	0.245 0				
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.934 0	0.938 8	0.980 7	0.910 3	0.933 1	0.388 3			
碳酸钙 Calcium carbonate	0.772 5	0.940 6	0.983 4	0.892 4	0.402 9	0.861 8	0.118 6		
pH	0.931 0	0.818 0	0.981 1	0.862 7	0.811 8	0.840 4	0.779 4	0.596 0	
容重 Bulk density	0.813 1	0.747 0	0.982 0	0.783 4	0.775 0	0.947 9	0.453 2	0.839 7	0.147 9

表8 不同影响因子对于高活性有机碳的交互作用

Table 8 Interaction of different influencing factors on highly active organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium	0.258 4								
全磷 Total phosphorus	0.560 0	0.437 2							
全氮 Total nitrogen	0.994 1	0.974 9	0.966 9						
速效钾 Available potassium	0.954 1	0.766 1	0.996 7	0.503 1					
速效磷 Available phosphorus	0.833 1	0.693 3	0.993 3	0.558 4	0.206 1				
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	0.948 9	0.952 7	0.993 7	0.927 2	0.943 3	0.420 6			
碳酸钙 Calcium carbonate	0.784 5	0.944 4	0.976 0	0.882 3	0.402 5	0.886 5	0.121 0		
pH	0.945 6	0.833 4	0.992 6	0.856 3	0.787 9	0.871 2	0.787 4	0.623 2	
容重 Bulk density	0.796 2	0.730 3	0.993 2	0.750 1	0.748 7	0.972 5	0.437 9	0.882 9	0.155 6

2.2.3 生态探测

生态探测器是用来比较不同因子 X1、X2 对属性值 Y 的空间分布影响是否具有显著差异,结果以 F 检验来衡量,若具有显著差异,记作 Y;无显著差异,则记作 N。该研究探测不同驱动因子对土壤总有机碳的作用是否有显著差异,由表 9 可知,对土壤总有机碳的空间分布影响来说,全钾、全磷、速效磷、碱解氮、碳酸钙和容重各因子之间对土壤总有机碳的空间分布影响的强弱均无显

著差异性,表明在上述各因子中不存在较为突出的影响因子;全氮对包括全钾、全磷、速效磷、速效钾、碱解氮、碳酸钙、容重和 pH 在内的任一因子作用于土壤总有机碳的空间分布的强弱都具有显著差异,这表明全氮是各因子中突出的影响因子,结合因子探测结果分析可表明全氮是土壤总有机碳的空间分布影响显著且贡献强大的因子,其同样体现了土壤碳元素与氮元素呈高度耦合关系,这与诸多研究成果一致^[9,18-19]。

表9 土壤总有机碳生态探测结果

Table 9 Result of ecological detection of soil total organic carbon

指标 Indicators	全钾 Total potassium	全磷 Total phosphorus	全氮 Total nitrogen	速效钾 Available potassium	速效磷 Available phosphorus	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	碳酸钙 Calcium carbonate	pH	容重 Bulk density
全钾 Total potassium									
全磷 Total phosphorus	N								
全氮 Total nitrogen	Y	Y							
速效钾 Available potassium	N	N	Y						
速效磷 Available phosphorus	N	N	Y	N					
碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen	N	N	Y	N	N				
碳酸钙 Calcium carbonate	N	N	Y	Y	N	N			
pH	Y	N	Y	N	Y	Y	Y		
容重 Bulk density	N	N	Y	Y	N	N	N	Y	

注:Y 表示 2 个驱动因子对总有机碳的作用具有显著性差异(置信度为 95%);N 表示无显著性差异。

Note:Y indicate that the effects of the two drivers on the total organic carbon are significantly different (confidence is 95%);N means no significant difference.

3 结论

该研究对宁夏贺兰山东麓葡萄地的土壤有机碳及其组分与土壤部分理化因子的驱动关系进行了地理探测分析,通过因子分析较好的探讨了影响土壤有机碳分布的各土壤理化因子的贡献强度,运用交互探测分析了各因子间复合影响对土壤有机碳及其各组分分布的贡献水平。具体可

知,贺兰山东麓葡萄产地土壤总有机碳含量较少,平均值为 $(3.93 \pm 2.49) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于我国平均水平,变异强度为弱、中等变异。土壤有机碳含量从表层到底层总体呈下降(降-略升-降)趋势。交互探测发现,全钾和速效钾是轻组有机碳与活性有机碳解释力最强的交互因子。综合因子探测和生态探测结果表明,全氮是对土壤总有机碳的空间分布影响显著且贡献强度最大的因子。

参考文献

- [1] 陈心桐,徐天乐,李雪静,等.中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(4):1133-1140.
- [2] 赵永存,徐胜祥,王美艳,等.中国农田土壤固碳潜力与速率:认识、挑战与研究建议[J].中国科学院院刊,2018,33(2):191-197.
- [3] 潘竟虎,文岩.中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J].生态学报,2015,35(23):7718-7728.
- [4] 白雪爽,胡亚林,曾德慧,等.半干旱沙区退耕还林对碳储量和分配格局的影响[J].生态学杂志,2008(10):1647-1652.
- [5] 师晨迪,许明祥,邱宇洁,等.黄土丘陵区县域农田土壤近30年有机碳变化及影响因素研究:以甘肃庄浪县为例[J].环境科学,2014,35(3):1098-1104.
- [6] 颜安.新疆土壤有机碳/无机碳空间分布特征及储量估算[D].北京:中国农业大学,2015.
- [7] 江叶枫,饶磊,郭熙,等.江西省耕地土壤有机碳空间变异的主控因素研究[J].土壤,2018,50(4):778-786.
- [8] 何铁光,俞月凤,蒙炎成,等.桂西北喀斯特区不同退化程度石灰土有机碳与养分剖面分布特征[J].水土保持研究,2019,26(4):13-18.
- [9] 李忠芳,唐政,姜翼来,等.我国南方桂东地区农田土壤养分特征及对有机碳驱动分析[J].中国土壤与肥料,2015(3):6-11.
- [10] 朱鹤,刘家明,陶慧,等.北京城市休闲商务区的时空分布特征与成因[J].地理学报,2015,70(8):1215-1228.
- [11] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [12] 宋振威,孙美莹,杨荣金,等.宁夏贺兰山东麓葡萄产业生态系统服务功能价值评估[J].应用生态学报,2019,30(3):979-985.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 金奇,吴琴,钟欣孜,等.鄱阳湖湿地水位梯度下不同植物群落类型土壤有机碳组分特征[J].生态学杂志,2017,36(5):1180-1187.
- [15] GREGORICH E G, ELLERT B H. Light fraction and macro organic matter in mineral soils[C]. Canada: Soil Sampling and Methods of Analysis, 1993.
- [16] 魏孝荣,邵明安,高建伦.黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J].环境科学,2008(10):2879-2884.
- [17] 罗由林,李启权,王昌全,等.川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J].应用生态学报,2015,26(1):177-185.
- [18] 徐薇薇,乔木.干旱区土壤有机碳含量与土壤理化性质相关分析[J].中国沙漠,2014,34(6):1558-156.
- [19] 庞圣江,杨保国,刘士玲,等.桂西北喀斯特山区4种森林表土土壤有机碳含量及其养分分布特征[J].中南林业科技大学学报,2018,38(4):60-64,71.

Analysis of Soil Organic Carbon Driving in the Eastern Foot of Helan Mountain Based on Geographic Detector

CHEN Feng, HE Jing, CUI Wenbin

(College of Resources and Environment, Ningxia University/Ningxia (China-Arab) Key Laboratory of Environmental Assessment and Resource Regulation in Arid Region, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract: Seven-year-old grapes at the eastern foot of Helan Mountain in Ningxia were used as the research object, and the relationship between total organic carbon, light organic carbon, recombinant organic carbon, high activity, middle activity and low activity organic carbon in soil and some physical and chemical properties of soil were analyzed in soil based on geo-detector, in order to study the relationship between soil organic carbon and its components and soil nutrients in arid and semi-arid areas. The results showed that the content of soil total organic carbon in the eastern foot of Helan Mountain was lower than the average level of China, the average value was $(3.93 \pm 2.49) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, the variation intensity was weak and moderate, and decreased vertically (downward-slightly upward-downward). Interactive detector showed that total potassium and available potassium are the most powerful interaction factors between light group and active organic carbon. Factor detector and Ecological risk detector shows that total nitrogen had a significant effect on the spatial distribution of soil total organic carbon and had the greatest contribution to the spatial distribution of soil total organic carbon, in order to provide a basis for comprehensive understanding of the contribution of soil organic carbon driving factors.

Keywords: soil organic carbon; geo-detector; driving force; eastern foot of Helan Mountain