DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.025

童珊, 曹广超, 张卓, 等. 土壤全碳全氮空间异质性及影响因素分析——以祁连山南坡黑河上游为例. 土壤, 2022, 54(5): 1064–1072.

土壤全碳全氮空间异质性及影响因素分析——以祁连山南坡黑河上游为例①

童 珊[1,2,3], 曹广超[2,3*], 张 卓[1,2,3], 刁二龙[1,2,3], 闫 欣[1,2,3]

(1 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008; 2 青海师范大学青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008; 3 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008)

摘 要: 为深入了解影响土壤养分的主控因素及影响因素之间的耦合作用, 以黑河为研究区, 采用野外采样、实验分析、地统计分析对研究区表层(0 ~ 20 cm)土壤全碳全氮空间异质性进行研究, 并利用地理探测器模型对在单因素、双因素作用下对土壤全碳全氮的影响及适用条件进行探究。结果表明: ①研究区土壤全碳、全氮含量均属于正态分布, 且根据第二次土壤普查分级标准, 均为第一级, 属于中等变异; ②土壤全碳、全氮含量插值模型均为指数模型, 由结构性因素与随机性因素共同作用, 总体呈现出东南向西北递减的趋势, 且全氮的插值精度(0.71)>全碳的插值精度(0.55); ③自变量对全氮的解释力大小前 3 位为: 有机质>容重>归一化植被指数, 自变量对全碳的解释力大小前 3 位为: 有机质>容重>电导率, 有机质与其他因素的交互作用大都在 0.6 以上; 土壤全氮及全碳含量最大值出现的区域土壤容重<0.6 g/cm^3、电导率 0.3 ~ 0.35 μS/cm、pH 7 ~ 8、有机质含量 100 ~ 150 g/kg、粒度 10 ~ 100 μm、年均气温 –1 ~ 1℃、年降水量 360 ~ 390 mm、地形湿度 6 ~ 9、坡度 15°~ 25°、植被指数 0.95 ~ 1、坡向为北方、DEM 2 500 ~ 3 500 m (高中山)。因此, 为提高土壤质量, 应根据其地形、气候、植被等因素进行分类治理。

关键词: 土壤全碳; 土壤全氮; 地统计分析; 地理探测器模型

中图分类号: S152.4; S156.6 **文献标志码:** A

Analysis of Spatial Heterogeneity and Influencing Factors of Soil Total Carbon and Nitrogen —Take the Upper Reaches of Heihe River on Southern Slope of Qilian Mountain as an Example

TONG Shan[1, 2, 3], CAO Guangchao[2, 3*], ZHANG Zhuo[1, 2, 3], DIAO Erlong[1, 2, 3], YAN Xin[1, 2, 3]

(1 *College of Geographical Sciences*, *Qinghai Normal University*, *Xining* 810008, *China*; 2 *Qinghai Normal University*, *Qinghai Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Process*, *Xining* 810008, *China*; 3 *Key Laboratory of Earth Surface Processes and Ecological Conservation of the Ministry of Education*, *Qinghai-Tibet Plateau*, *Xining* 810008, *China*)

Abstract: In order to further understand the main factors affecting soil nutrients and the coupling between the influencing factors, this paper takes the Heihe River Basin as the study area and uses field sampling, experimental analysis, and geostatistical analysis to analyze the total carbon (TC) and nitrogen (TN) of the topsoils (0–20 cm). The spatial heterogeneity is studied, and the single factor and dual factor effects and applicable conditions of TC and TN are explored using the geo-detector model. The results show that both TC and TN are belonged to the normal distribution with medium variation, belonged to the first level according to the grading standard of the 2nd national soil survey, in exponential interpolation models, and the interpolation are influenced by both the structural factors and random factors. The contents of TC and TN both show the decreasing trend from southeast to northwest, and the interpolation accuracy of TN is 0.71, higher than that of TC (0.55). The top three independent variables are soil organic matter(SOM) > bulk density(BD) >NDVI(normalized differential vegetation index) for TN explanatory and SOM > BD >EC(electrical conductivity) for TC explanatory, the interaction between SOM and other factors is mostly above 0.6. The areas where the maximum values of TN and TC contents of the soil appear are on the conditions of BD <0.6 g/cm^3, EC in 0.3–0.35 μS/cm, pH in

①基金项目: 青海省祁连山自然保护区管理局及祁连山国家公园长期科研基地祁连山国家公园(青海片区)湿地保护恢复及其生态服务功能评估监测项目(QHTX-2020-043-02)资助。

* 通讯作者(caoguangchao@qhnu.edu.cn)

作者简介: 童珊(1995—), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 研究方向为环境地表过程与生态响应。E-mail: tongshan523@163.com

7–8, SOM in 100–150 g/kg, particle size in 10–100 μm, TEM(average temperature) in –1–1 ℃, PER(annual precipitation) in 360–390 mm, TWI(terrain humidity index) in 6–9, slope in 15°–25°, NDVI in 0.95–1, aspect in north, and DEM in 2 500–3 500 m. It should be classified and managed according to the terrain, climate, vegetation and other factors for the improvement of soil quality.

Key words: Soil total carbon (TC); Soil total nitrogen (TN); Geostatistical analysis; Geodetector model

土壤是农业生产的基础，是人类赖以生存的基石，也是人类食物与生态环境安全的保障[1]。土壤全碳、全氮含量可以作为评价土壤肥力的重要指标[2]。对于土壤碳素的研究有助于了解全球碳循环趋势，进而有效地控制碳储存，减少温室气体的排放。土壤全氮是土壤氮素肥力指标，对农作物的生长具有重要作用。由于气候、植被等自然条件的多样性和人类活动等的综合影响，增加了土壤理化性质空间分异的复杂性[3-4]，而空间异质性现象的本质为土壤空间的自相关性[5]，研究表层土壤全碳全氮的空间自相关及环境响应机制，对深入了解大环境变化下的碳氮循环动态变化及生态修复具有不可忽视的作用。

虽有学者对黑河流域的土壤养分进行了研究[6-8]，但针对土壤水分[9]、有机质[10]、盐分[11]及呼吸速率[12]等的研究较多，对于土壤化学因素的研究目前较少，且对于影响机制的研究多采用多元分析方法、主成分分析法及相关性分析等，这些方法仅能体现单一因素对土壤养分的影响或变量间的相关性，不能全面地反映变量之间的相关性，结果较为片面[13]。应用地理探测器模型不仅可以全面地研究土壤养分变化的驱动因素，定量识别因子间的相互作用[14]，而且可以研究驱动因素之间对土壤养分变化的交互作用。基于此，本研究将通过地理探测器模型探究环境因子综合变化对土壤全碳全氮含量的影响。

黑河不仅是祁连山最具代表性的河流，而且是我国西北内陆干旱区第二大内陆河[15]。整个黑河源区不仅是祁连山国家公园的重要组成单元和重要水源补给区，而且对黑河上、中、下游地区经济社会发展和城乡居民生存环境起着决定性作用[16]。黑河上游海拔高差大，主要以山地为主，植被类型与土壤类型丰富，土壤养分具有明显的空间异质性。在此背景下，本研究以重要的水源涵养区——黑河源区为研究区，利用地统计分析方法结合地理探测器模型对土壤全碳全氮含量进行空间变化及响应机制研究，以为该区域的生态保护及环境治理提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区地处黑河上游祁连山区，地理坐标 98°05′35″ ~ 101°02′06″ E，37°25′16″ ~ 39°05′18″ N，总面积近 1.6×10^4 km^2[15]。根据流向，其源头可分为东支和西支：东支源于祁连县东部峨堡镇滩东的锦阳岭，称峨堡河；西支即称为黑河，起源于铁里干山和八一冰川一带，是黑河源区的干流，途经野牛沟乡和扎麻什乡等。该区气候属于高原大陆性气候区，年降水量为 340 ~ 400 mm，其中 6—9 月降水量占全年降水量的 78% ~ 89%，年蒸发量为 1 496.3 mm，年日照时数为 2 500 ~ 3 100 h，太阳辐射强烈，昼夜温差大，年平均气温为 –4.7 ~ 1.2℃，几乎无绝对无霜期[16]。

1.2　土样采集与测定

综合考虑研究区的植被、海拔、土壤等自然环境因子及交通可达性布设采样点(图 1)，2018 年 8 月对

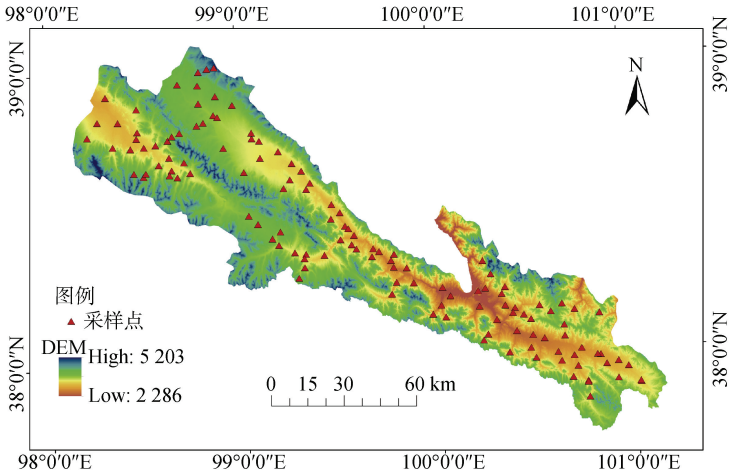


图 1　样点分布图

Fig. 1　Distribution of sample points

研究区进行采样，每个样地设立 20 m×20 m 样方，每个样方按照对角线采取 3 个重复样(包括环刀样 2 个)，采集样品深度为 0～20 cm，共采集 150 个样品，每个样品由 3 个样点土样混合而成。土样去除植物根系和残渣后装入贴有标签的自封袋称重，带回实验室风干。使用马尔文(Malvern)激光粒度仪测量土壤中值粒径；使用碳氮分析仪(Elementar Vario Max)测定土壤全碳(TC)和全氮(TN)；环刀样主要用来测定土壤容重(BD)；有机质(SOM)测定采用重铬酸钾油浴加热法测定；电导率(EC)用 EC 快速测定仪测定；pH 用 pH 计测定。

1.3 其他数据来源

气象数据：在中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn)下载国家台站监测数据，通过 Anusplin 软件进行插值，得到研究区 2018 年年降水量(PER)与年平均气温(TEM)数据；归一化植被指数(NDVI)数据：本文使用的植被遥感数据 MOD13Q1，来源于 NASA 网站(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/)，空间分辨率为 250 m×250 m，时间分辨率为 16 d，经过拼接、裁剪及最大合成法形成年 NDVI 数据；DEM 数据：来源于地理空间数据云平台(http://www. gscloud.cn)，空间分辨率为 90 m×90 m，经过计算得到海拔高度、坡度(Slope)、坡向(Aspect)、地形湿度(TWI)数据。

1.4 研究方法

本研究通过 ArcGIS10.2 软件提取点数据，利用 Excel 2013 软件对数据进行整理，利用平均值±3 倍标准差去除异常点，通过 GS+ Version 9 软件进行地统计分析，对因变量进行插值，利用地理探测器模型进行影响因素分析。

1.4.1 地统计方法 1)莫兰指数。莫兰指数反映研究区整体的空间模式，用于判断空间变量在区域内属于聚集分布还是孤立分布、研究属性值在空间位置上是否具有相关性[17]。

$$I=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}\cdot\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \tag{1}$$

式中：n 为参与分析的土壤样品数目；x_i 和 x_j 分别为样品 i 和 j 样品的观测值；$\bar{x}$ 为所有样品观测值的平均值；w_{ij} 为空间权重矩阵值。

2)半方差函数。为探讨土壤全碳全氮的空间变异结构性和随机性，利用地统计学中的半方差函数分析其空间异质性变化。

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}Z\left[\left(x_i\right)-Z\left(x_i+h\right)\right]^2 \tag{2}$$

式中：$\gamma(h)$为半方差函数；$N(h)$为间隔距离等于 h 的样本点的对数；$Z(x_i)$为空间位置点 x_i 处指标的实测值；$Z(x_i+h)$为空间位置点 x_i+h 处指标的实测值[18]。

3)克里格插值。

$$Z(x_0)=\sum_{i=1}^{n}\gamma_i Z\left(x_i\right) \tag{3}$$

式中：$Z(x_0)$为研究区未知样本点的土壤全碳或全氮含量(g/kg)；$Z(x_i)$为研究区未知样点周围已知样点的土壤全碳或全氮含量(g/kg)；γ_i 为第 i 个已知样点对未知样点的权重；n 为已知样点的个数[19]。

1.4.2 地理探测器 地理探测器是一种统计学方法，通过探测因变量空间分异性，揭示其背后驱动力及各因子的贡献率，能从庞大的空间数据库中提取有用的空间关联规则[20-21]，由因子探测器、生态探测器、风险探测器及因子交互作用探测器 4 部分组成。

1)因子探测器：用来分析影响因子的变化趋势对因变量的空间分异影响大小，用 q 值度量。其模型如下[22]：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}n_h\sigma_h^2}{n\sigma^2}=1-\frac{\mathrm{SSW}}{\mathrm{SST}} \tag{4}$$

式中：q 是度量空间分异性的指标；h=1,2,…, L，L 为分类数目；n_h 和 n 分别为层 h 和全区的样本单元数，σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的方差；SSW 和 SST 分别为层内方差之和 (within sum of square) 和全区总方差(total sum of squares)。q 的取值范围为 [0,1]，q 值越大，说明影响因子的解释力越强。

区域 Y 值方差的计算公式如下[23]：

$$\sigma^2=\frac{1}{n_{h-1}}\sum_{i=1}^{n_h}\left(Y_{h,i}-\overline{Y_h}\right)^2 \tag{5}$$

2)生态探测器：用于比较两因子对土壤全碳全氮空间分布的影响是否有显著差异，可判断两因子哪一个因子更具有影响力，以 F 统计来衡量[24]：

$$F=\frac{N_{x1}\times\left(N_{x2}-1\right)\times\mathrm{SSW}_{x1}}{N_{x2}\times\left(N_{x1}-1\right)\times\mathrm{SSW}_{x2}} \tag{6}$$

$$\mathrm{SSW}_{x1}=\sum_{h=1}^{L_1}n_h\sigma_h^2;\ \mathrm{SSW}_{x2}=\sum_{h=1}^{L_2}n_h\sigma_h^2 \tag{7}$$

式中：N_{x1} 及 N_{x2} 分别表示 2 个因子的样本数量；SSW_{x1}和 SSW_{x2}分别表示由 2 个因子形成分层的层内方差之和；L_1 和 L_2 分别表示变量 $x1$ 和 $x2$ 数目。

3)风险探测器：用于判断评价指标子区域间的属

性均值是否有显著差别，用 t 统计量来检验[25]。

$$t=\frac{\bar{Y}_{h=1}-\bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\mathrm{var}\left(Y_{h=1}\right)}{n_{h=1}}+\frac{\mathrm{var}\left(Y_{h=2}\right)}{n_{h=2}}\right]^{1/2}} \tag{8}$$

式中：Y_h 为子区域 h 内植被 NDVI 属性均值；n_h 为子区域 h 内样本数量；var 表示方差。

4)因子交互作用探测器：用于识别指标之间的交互作用，即两因子之间共同作用(增加或减弱)或独立作用对土壤全碳全氮空间分布的解释力[25]。交互作用类型见表 1。

根据地理探测器数据要求，对自变量进行离散化，NDVI 根据李晓香和陈媛丽[26]的研究分为 5 个等级；Slope 根据汤国安和宋佳[27]的研究分为 6 个等级；DEM 根据中国陆地高精度地貌类型的划分，分为 3 个等级；Aspect 根据实际情况进行划分，分为 10 级；SOM 划分为 4 个等级；其余因子均按照等间距进行划分，BD 划分为 5 个等级、EC 划分为 7 个等级、pH 划分为 3 个等级、粒度划分为 4 个等级、TEM 与 TWI 共划分为 5 个等级、PER 划分为 4 个等级。各指标等级划分的具体结果见表 2。

表 1　交互作用类型
Table 1　Interaction types

交互作用类型	q 值比较
非线性拮抗作用	$q(x1\cap x2)<\mathrm{Min}(q(x1), q(x2))$
单拮抗作用	$\mathrm{Min}(q(x1),q(x2))<q(x1\cap x2)<\mathrm{Max}(q(x1),q(x2))$
双协同作用	$\mathrm{Max}(q(x1),q(x2))<q(x1\cap x2)<q(x1)+q(x2)$
独立作用	$q(x1\cap x2)=q(x1)+q(x2)$
非线性协同作用	$q(x1\cap x2)>q(x1)+q(x2)$

表 2　各自变量等级划分
Table 2　Classification of each independent variables

自变量	等级划分
BD(g/cm^3)	<0.6、0.6 ~ 0.9、0.9 ~ 1.2、1.2 ~ 1.5、1.5 ~ 1.8
EC(μS/cm)	0.045 ~ 0.1、0.1 ~ 0.15、0.15 ~ 0.2、0.2 ~ 0.25、0.25 ~ 0.3、0.3 ~ 0.35、0.35 ~ 0.4
pH	6 ~ 7、7 ~ 8、8 ~ 9
粒度(μm)	2 ~ 10、10 ~ 100、100 ~ 1 000、>1 000
SOM(g/kg)	0 ~ 50、50 ~ 100、100 ~ 150、>150
TEM(℃)	–7 ~ –5、–5 ~ –3、–3 ~ –1、–1 ~ 1、1 ~ 3
PER(mm)	300 ~ 330、330 ~ 360、360 ~ 390、390 ~ 420
NDVI	<0.00001、0.00001 ~ 0.25、0.25 ~ 0.5、0.5 ~ 0.95、0.95 ~ 1
Aspect	北、西北、西、西南、南、东南、东、东北
Slope(°)	0 ~ 3、3 ~ 8、8 ~ 15、15 ~ 25、25 ~ 35、>35
DEM(m)	2 500 ~ 3 500 (高中山)、3 500 ~ 4 500 (中高山)、>4 500 (极高山)
TWI	3 ~ 6、6 ~ 9、9 ~ 12、12 ~ 15、15 ~ 18

2　结果与分析

2.1　土壤全碳全氮含量描述性统计

从表 3 中可以看出，TC 含量的范围在 8.38 ~ 112 g/kg，平均值为 48.35 g/kg，根据第二次土壤普查养分分级标准，TC 含量属于第一级；TN 含量的范围在 0.38 ~ 8.20 g/kg，平均值为 4.00 g/kg，根据第二次土壤普查养分分级标准，TN 含量属于第一级。偏度及峰度是反映数据正态分布的两个指标，TN 与 TC 含量的偏度均大于 0，峰度均小于 0，说明数据分布为右偏态，且较为平坦。从变异系数看，二者 10% ≤CV≤100%，属于中等变异，K-S 检验均在 1% 的检验水平下，说明适合克里格插值。

表 3　土壤全碳、全氮统计信息
Table 3　Statistical descriptions of soil total carbon and total nitrogen

指标	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	平均值 (g/kg)	标准差	偏度	峰度	K-S 检验	变异系数(%)
TC	8.38	112	48.35	20.42	0.57	–0.35	0.02	47.45
TN	0.38	8.20	4.00	1.85	0.42	–0.51	0.01	42.24

2.2　土壤全碳全氮含量地统计分析

块金值与基台值之比表示随机部分引起的空间变异占系统总变异的比例[28]。从表 4 中可以看出，TN 与 TC 含量的块金值/基台值比值在 25% ~ 75%，属于中等变异，由结构性因素与随机性因素共同作用。

表 4 土壤养分半方差函数理论模型及相关参数
Table 4 Theoretical models and parameters of soil nutrient half-variance function

指标	模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 (m)	$C_0/(C_0+C)$	决定系数 R^2
TN	指数	2.72	6.98	1 533 000	0.39	0.71
TC	指数	0.15	0.44	1 233 000	0.35	0.55

由图 2 可知，TC 与 TN 含量的空间自相关性随着自相关距离的增加逐渐减弱，TC 含量的自相关距离在 0 ~ 53 333.33 m，TN 含量的自相关距离在 0 ~ 70 366.67 m，其莫兰指数为正值，说明呈正相关，空间聚焦性较强；TC 含量的自相关距离在 53 333.33 ~ 106 666.67 m，TN 含量的自相关距离在 70 366.67 ~ 140 733.33 m 时，其莫兰指数在 0 值上下浮动，说明空间自相关性较弱；TC 含量的自相关距离在大于 106 666.67 m，TN 含量的自相关距离在大于 140 733.33 m 时，其莫兰指数小于 0，说明 TN 与 TC 含量数据点存在空间孤立性。

从图 3 中可以看出，TC 与 TN 含量空间分布差异明显，高值区主要分布在研究区的南部，低值区主要分布在研究区的北部顶端，中值区主要分布在研究区的中部及南部，呈梯度变化分布，均一性较好，TN 与 TC 含量呈现出东南向西北递减的趋势。

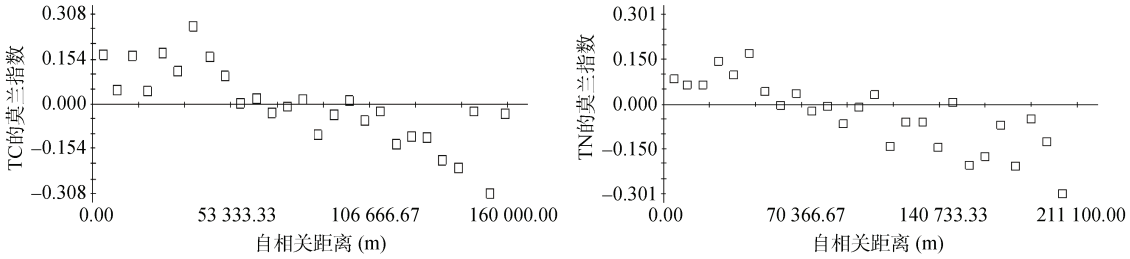


图 2 土壤养分自相关关系
Fig. 2 Autocorrelation of soil nutrients

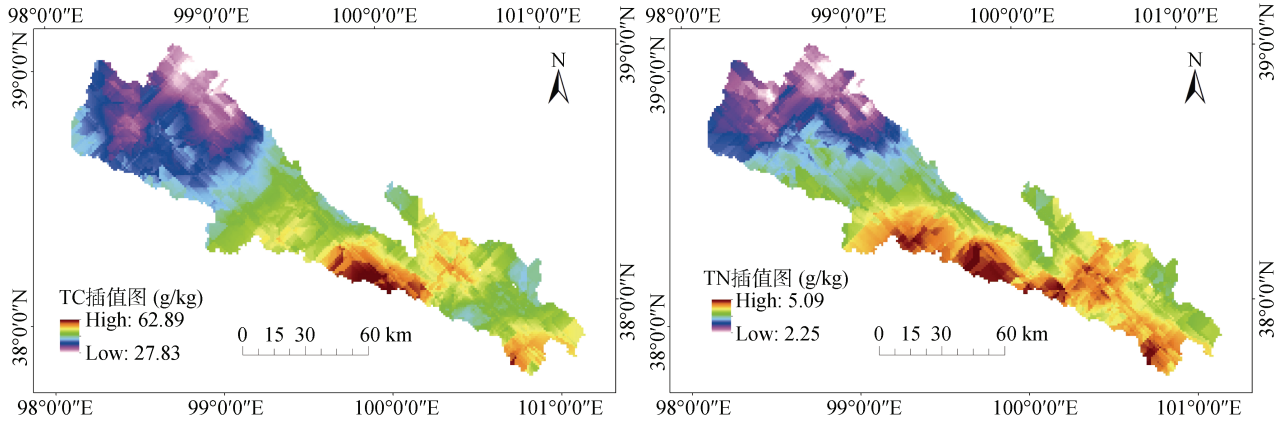


图 3 土壤全碳、全氮插值图
Fig. 3 Interpolation diagrams of soil total carbon and nitrogen

2.3 土壤全碳全氮含量的影响因素

利用因子探测对影响 TC 及 TN 含量的土壤属性、气象因子、植被因子、地形因子进行分析(表 5)，可以看出，除了 TWI 及 Slope 因子的 P 值大于 0.05，其余均小于 0.05，说明除了这两个因子，TN 及 TC 在其余因子分区的空间分布存在空间异质性且结果可信。自变量对 TN 含量的解释力大小排序为：SOM>BD>NDVI> EC>PER> Aspect >pH (DEM) >TEM>粒度；自变量对 TC 含量的解释力大小排序为：SOM > BD >EC> NDVI>PER> Aspect >TEM (DEM) >pH (粒度)。可见，土壤内部属性对于 TN 与 TC 含量影响最大，其次为植被，再次为气象，最后为地形。

利用交互作用探测器识别影响因子之间的交互作用，从表 6 中可以看出，任何两因素之间相互作用均大于单因素作用，且都为双因素增强；对于全氮，两因素交互作用解释程度大于 0.6 的因子对分别为 SOM∩BD 、SOM∩EC 、SOM∩pH 、SOM∩PER 、SOM∩NDVI、SOM∩Aspect；对于全碳，有机质与其他所有因子的交互作用均在 0.6 以上。

利用生态探测器探测 10 个影响因素对土壤 TN 及 TC 含量解释程度的显著性差异，从表 7 中可以看出，除了土壤内部属性对 TN 及 TC 含量的影响具有显著性差异，其他均无显著性差异。

表 5　土壤全碳、全氮的主要影响因素的 *q* 值

Table 5　*q* values of main influencing factors of soil total carbon and nitrogen

指标	解释力	BD	EC	pH	土壤粒度	TEM	PER	TWI	Slope	NDVI	Aspect	DEM	SOM
TC	*q* 值	0.43	0.26	0.06	0.06	0.08	0.15	0.01	0.06	0.19	0.14	0.08	0.63
	P 值	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.84	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
TN	*q* 值	0.38	0.17	0.06	0.04	0.05	0.16	0.02	0.05	0.19	0.12	0.06	0.58
	P 值	0.00	0.01	0.04	0.03	0.04	0.00	0.66	0.16	0.00	0.01	0.00	0.00

表 6　土壤全碳、全氮影响因子交互作用探测

Table 6　Interaction detection of soil total carbon and nitrogen influencing factors

指标		BD	EC	pH	土壤粒度	TEM	PER	NDVI	Aspect	DEM	SOM
TC	BD	0.43									
	EC	0.55	0.26								
	pH	0.47	0.31	0.06							
	粒度	0.47	0.33	0.15	0.06						
	TEM	0.48	0.33	0.14	0.15	0.08					
	PER	0.50	0.40	0.20	0.19	0.20	0.15				
	NDVI	0.51	0.43	0.25	0.26	0.25	0.26	0.19			
	Aspect	0.52	0.45	0.21	0.22	0.29	0.33	0.37	0.14		
	DEM	0.46	0.32	0.14	0.13	0.10	0.19	0.22	0.20	0.08	
	SOM	0.73	0.73	0.66	0.64	0.66	0.66	0.68	0.78	0.64	0.63
TN	BD	0.38									
	EC	0.47	0.17								
	pH	0.42	0.24	0.06							
	粒度	0.41	0.23	0.13	0.04						
	TEM	0.44	0.25	0.13	0.12	0.05					
	PER	0.47	0.33	0.21	0.18	0.20	0.16				
	NDVI	0.46	0.36	0.25	0.23	0.25	0.25	0.19			
	Aspect	0.48	0.39	0.21	0.19	0.28	0.31	0.35	0.12		
	DEM	0.40	0.22	0.13	0.09	0.08	0.19	0.21	0.17	0.06	
	SOM	0.66	0.64	0.61	0.58	0.59	0.61	0.62	0.74	0.59	0.58

表 7　全碳、全氮探测因子差异显著性(置信水平 95%)

Table 7　Significance of differences in total carbon and nitrogen detection factorss

指标		BD	EC	pH	土壤粒度	TEM	PER	NDVI	Aspect	DEM	SOM
TC	BD										
	EC	Y									
	PH	Y	Y								
	粒度	Y	Y	N							
	TEM	Y	Y	N	N						
	PER	Y	N	N	N	N					
	NDVI	Y	N	N	N	N	N				
	Aspect	Y	N	N	N	N	N	N			
	DEM	Y	Y	N	N	N	N	N	N		
	SOM	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
TN	BD										
	EC	Y									
	pH	Y	N								

续表 7

指标		BD	EC	pH	土壤粒度	TEM	PER	NDVI	Aspect	DEM	SOM
TN	粒度	Y	N	N							
	TEM	Y	N	N	N						
	PER	Y	N	N	N	N					
	NDVI	Y	N	N	Y	N	N				
	Aspect	Y	N	N	N	N	N	N			
	DEM	Y	N	N	N	N	N	N	N		
	SOM	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	

风险探测用于判断影响因子子区域间的属性均值是否有显著的差别，用于探索土壤肥力最好的区域，据此，本研究得出，土壤 TN 及 TC 含量平均最大值出现区域为 BD<0.6 g/cm^3，EC 在 0.3 ~ 0.35 μS/cm，pH 在 7 ~ 8，粒度在 10 ~ 100 μm，SOM 在 100 ~ 150 g/kg，DEM 在 2 500 ~ 3 500 m(高中山)，PER 在 360 ~ 390 mm，TEM 在 –1 ~ 1 ℃，NDVI 在 0.95 ~ 1，TWI 在 6 ~ 9，Slope 在 15° ~ 25°，Aspect 在北方。

3 讨论

3.1 土壤内部因素对土壤全碳全氮的影响

SOM 与土壤全碳全氮关系较为紧密，相关性高达 0.8 左右；除 SOM 外，对土壤全碳全氮解释力最强的因子为 BD，且与 TN、TC 呈负相关，BD 通过影响土壤的粒度，进而影响土壤的含碳量，BD 越大说明土壤孔度越小，土壤中含有的黏粒越多，土壤越紧实，不利于微生物活动，因此在 BD<0.6 g/cm^3、土壤粒度 10 ~ 100 μm 时，TN、TC 平均值最大；而 EC 可以间接地反映土壤含盐量，是植物和微生物活性的限制因素，影响土壤养分的转化，表征土壤酸化和次生盐渍化状况，同时也反映土壤的肥力状况。pH 与 TN、TC 呈负相关，这可能是由于在酸性的环境中，微生物对有机碳的分解会受到抑制[29]，研究区主要以中性或碱性土壤为主，因此，在 pH 7 ~ 8 范围内出现 TN、TC 平均值最大。

表 9 土壤全碳、全氮与土壤因子相关性

Table 9 Correlation of soil total carbon and total nitrogen with other soil factors

	SOM	BD	EC	pH	粒度
TN	0.79**	–0.66**	0.40**	–0.36**	–0.20**
TC	0.84**	–0.68**	0.50**	–0.34**	–0.26**

注：**表示 P<0.01 水平上显著相关。

3.2 植被对土壤全碳全氮的影响

植被的组成、分布及群落结构都会造成土壤养分的变异[30]，且地上生物量的大小直接影响土壤有机碳含量的高低，所以 NDVI 在 0.95 ~ 1 范围内出现 TN 与 TC 的平均最大值。研究区从南到北植被分布差异性较大，典型的植被类型有针叶林、阔叶林、针阔混交林及灌木林，而西北部地区海拔较高，主要以草甸、草原为主[31]，中部主要以草原及灌丛为主，东南部主要以林地及草原为主，林地主要以祁连圆柏及云杉为主，分布于坡度较陡的山坡上，由于其植被分布的差异性，导致了土壤养分的带状分布。

3.3 气象因素对土壤全碳全氮的影响

根据土壤养分影响因素的各类研究报告[32-33]可以看出，气候对土壤养分的影响占重要位置，尤其是表层土壤受气候因素的影响最大。本研究中，降雨对土壤养分的影响大于温度，研究区年降水量在 340 ~ 400 mm，年蒸发量为 1 496.3 mm，蒸发量是降水量的 4 倍左右。在强蒸发的作用下，水分成为了土壤养分变化的限制性因子，加大了土壤水分与土壤全碳全氮关系的紧密性[34]，因此降水与土壤养分的关系更为紧密。张华等[24]得出在祁连山国家公园，年降水量在 320.7 ~ 385.8 mm、年均温在 0.2 ~ 5.2℃ 时，最适宜植被生长，而本研究中年降水量在 360 ~ 390 mm、年均温在 –1 ~ 1 ℃范围内 TN 与 TC 的平均值最大，两者研究结果相符，范围的差异是由于指标的等级划分不同造成的。

3.4 地形对土壤全碳全氮的影响

地形对于土壤的发育至关重要，能够影响水热条件的空间分配，改变区域内的气候条件[35]。研究区主要以山地为主，山坡主要以林地为主，土壤较为肥沃，因此 Slope 在 15°~ 25°范围内 TN 与 TC 平均值最大，表明在地形条件中坡向对于土壤养分的影响最大，且北方(阴坡)土壤 TN 与 TC 的平均值最大，这与袁杰[15]对于祁连山南坡的研究结果一致，出现这一现象可能是由于阴坡蒸发小、气候阴冷潮湿，且土壤对水分的截留率较多，有较厚的枯枝落叶层，导致阴坡土壤相较阳坡土壤有机物质摄入来源多元化，相

应的土壤肥力更好。

4　结论

1)黑河源区土壤全碳与全氮含量的插值模型均为指数模型，插值的影响因素为结构性因素大于随机性因素，插值结果呈现出东南向西北递减的趋势，且呈梯度变化，这与黑河源区的植被地带性分布规律有密切关系，黑河源区林地主要分布在东南部而草甸主要分布在西北部与中部。

2)通过地理探测器分析可以看出，SOM、BD、EC 及 NDVI 是影响土壤全碳全氮含量变化的主控因素，可见，土壤内部因素的变化对于土壤全碳全氮变化起主要作用。

3)土壤 TN 及 TC 平均最大值出现的区域土壤 BD<0.6 g/cm^3，EC 在 0.3 ~ 0.35 μS/cm，pH 在 7 ~ 8，粒度在 10 ~ 100 μm，SOM 在 100 ~ 150 g/kg，DEM 在 2 500 ~ 3 500 m(高中山)，PER 在 360 ~ 390 mm，TEM 在 –1 ~ 1 ℃，NDVI 在 0.95 ~ 1，TWI 在 6 ~ 9，Slope 在 15° ~ 25°，Aspect 在北方。

参考文献：

[1] McFarlane K J, Schoenholtz S H, Powers R F, et al. Soil organic matter stability in intensively managed ponderosa pine stands in California[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 979–992.

[2] 朱显谟. 黄土区的土壤分布规律[J]. 科学通报, 1957, 2(15): 477–478.

[3] 赵宣, 韩霁昌, 王欢元, 等. 毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7446–7452.

[4] 张晓雅. 黑河中游湿地不同类型保护地植被特征与土壤性质关系研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.

[5] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区典型小流域表土有机质含量空间自相关格局及影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(2): 403–410.

[6] 白娜. 黑河中游湿地土壤化学性质空间分布特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.

[7] 白娜, 王立, 孔东升. 黑河自然保护区沼泽湿地土壤化学性质的空间分布特征研究[J]. 草业学报, 2017, 26(5): 15–28.

[8] 高进长, 苏永红, 席海洋, 等. 黑河下游河流沿岸土壤养分和盐分的研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 94–98, 102.

[9] 陈宏祥, 胡广录, 赵晨宇, 等. 黑河中游荒漠绿洲过渡带固沙植被土壤水分的分布特征[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 67–73.

[10] 马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 426–433.

[11] 赵玉, 冯起, 李会亚. 黑河下游土壤盐分分布特征[J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1196–1203.

[12] 牛瑞雪, 刘继亮, 胡彦萍, 等. 黑河中游不同土地覆被类型土壤呼吸及对水热因子的响应[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5): 961–969.

[13] 陈晓晓, 张永福. 基于地理探测器的干旱区绿洲土地利用变化影响因子[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(2): 167–173.

[14] 刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡不同土地利用方式下土壤碳氮含量及通径分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1346–1354.

[15] 袁杰. 祁连山黑河源区土壤储碳蓄水能力及潜力研究[D]. 西宁: 青海师范大学, 2019.

[16] 童珊. 基于 SVM 及 RF 算法的土壤全碳全氮建模方法对比研究——以黑河源区为例[D]. 西宁: 青海师范大学, 2020.

[17] 李丹丹. 基于 GIS 与地统计学的不同尺度下土壤重金属空间变异研究——以湖南石门雄黄矿区为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.

[18] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246–1266.

[19] 李理, 朱文博, 刘俊杰, 等. 宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 687–695.

[20] 尹振良, 冯起, 王凌阁, 等. 2000—2019 年中国西北地区植被覆盖变化及其影响因子[J]. 中国沙漠,2022,(04):1-11.

[21] 王劲峰. 地理探测器模型及其在环境和社会科学中的应用[R]. 上海: 同济大学建筑与城市规划学院, 2018.

[22] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 等. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4963–4975.

[23] 孟琪, 武志涛, 杜自强, 等. 基于地理探测器的区域植被覆盖度的定量影响——以京津风沙源区为例[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2): 826–836.

[24] 张华, 李明, 宋金岳, 等. 基于地理探测器的祁连山国家公园植被 NDVI 变化驱动因素分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2530–2540.

[25] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758–1776.

[26] 李晓香, 陈媛丽. 基于 NDVI 的鹤壁市植被覆盖动态分析研究[J]. 河南科技, 2014(7): 188.

[27] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 157–160, 192.

[28] 赵宣, 韩霁昌, 王欢元, 等. 毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7446–7452.

[29] 马素辉, 牟翠翠, 郭红, 等. 祁连山黑河上游多年冻土区不同植被类型土壤有机碳密度分布特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(3): 426–433.

[30] 袁杰, 曹广超, 杨登兴, 等. 祁连山黑河源区植被 NDVI 时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态科学, 2021, 40(5): 172–182.

[31] 张江平, 郭颖, 孙吉慧, 等. 贵州主要森林植被养分含量及其分配特征[J]. 北京林业大学学报, 37(4):48–55.
[32] 赵宣, 郝起礼, 孙婴婴. 典型毛乌素沙漠-黄土高原过渡带土壤盐渍化空间异质性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1761–1768.
[33] 丁亚鹏, 张俊华, 刘玉寒, 等. 基于GWR模型的伊河流域土壤有机碳空间分布特征及影响因素分析[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4876–4885.
[34] 刘玉寒. 基于 GWR 的伊河流域土壤碳氮空间特征及影响因素分析[D]. 开封: 河南大学, 2018.
[35] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 858–869.