

# 祁连山南坡农田土壤碳氮含量垂直分布特征及其影响因素

邱巡巡<sup>1,2,3</sup>, 曹广超<sup>2,3,4</sup>, 曹生奎<sup>1,2,3</sup>, 张卓<sup>1,2,3</sup>,  
程梦园<sup>1,2,3</sup>, 何启欣<sup>1,2,3</sup>, 高斯远<sup>1,2,3</sup>, 赵美亮<sup>1,2,3</sup>

(1.青海师范大学 地理科学学院, 青海 西宁 810008; 2.青海省自然地理与  
环境过程重点实验室, 青海 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,  
青海 西宁 810008; 4.青海省人民政府—北京师范大学 高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810008)

**摘要:** [目的] 分析农田生态系统土壤碳氮与土壤理化性质的关系, 为高寒地区合理利用土地资源提供理论借鉴。[方法] 在祁连山中段南坡选取具有代表性的农田样地共 19 个, 结合野外采样及室内试验, 运用回归、通径分析等方法对研究区农田土壤全碳含量(TC), 全氮含量(TN)与有机碳含量(SOC), 含水量(SWC), 土壤容重( $\rho_b$ ), 粒度(黏粒、粉砂、砂粒), pH 值等土壤理化性质的关系进行研究。[结果] ①研究区土壤全碳含量、全氮含量随土层的加深而减少, 有表聚现象, 平均含量分别为 35.47, 2.41 g/kg。②随着土层的加深, 土壤有机碳、含水量、黏粒和粉粒含量减少; 土壤容重、pH 值和砂粒含量增大。③土壤理化性质因子之间相互联系, 共同影响土壤碳氮含量。土壤全碳含量、全氮含量之间直接作用显著, 土壤容重对土壤全碳含量产生直接作用效应, 土壤含水量通过土壤全氮含量对土壤全碳含量产生间接正效应; 土壤粉粒、黏粒含量对土壤全氮含量产生直接作用效应, 土壤 pH 值通过土壤粉粒、黏粒含量对土壤全氮含量产生间接负效应。[结论] 祁连山南坡农田土壤比较肥沃, 其土壤全氮含量及有机质含量处于较高水平, 可为研究区植被生长提供较为充足的土壤养分。在当前耕作水平下, 土壤全氮含量及含水量的增加有利于土壤全碳含量的积累。土壤全碳含量、黏粒及含水量的增加有利于土壤全氮含量的积累。

**关键词:** 农田生态系统; 土壤理化特性; 线性回归分析; 通径分析; 祁连山南坡

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0366-07

中图分类号: S153

**文献参数:** 邱巡巡, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡农田土壤碳氮含量垂直分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 366-372. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.045; Qiu Xunxun, Cao Guangchao, Cao Shengkui, et al. Vertical distribution characteristics and influencing factors of soil carbon and nitrogen content in farmland on southern slope of Qilian Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 366-372.

## Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Soil Carbon and Nitrogen Content in Farmland on Southern Slope of Qilian Mountains

Qiu Xunxun<sup>1,2,3</sup>, Cao Guangchao<sup>2,3,4</sup>, Cao Shengkui<sup>1,2,3</sup>, Zhang Zhuo<sup>1,2,3</sup>,  
Cheng Mengyuan<sup>1,2,3</sup>, He Qixin<sup>1,2,3</sup>, Gao Siyuan<sup>1,2,3</sup>, Zhao Meiliang<sup>1,2,3</sup>

(1.School of Geography Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008, China;

2.Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Process, Qinghai Province, Xining,

Qinghai 810008, China; 3.Key Laboratory of Local Surface Process and Ecological Collection and Education

Department, Qinghai Plateau, Xining, Qinghai 810008, China; 4.Highlands Science and Sustainable Development

Research Institute, Qinghai Provincial People's Government—Beijing Normal University, Xining, Qinghai 810008, China)

**Abstract:** [Objective] The relationships between soil carbon and nitrogen in a farmland ecosystem and soil

收稿日期: 2021-12-27

修回日期: 2022-03-20

资助项目: 青海省自然科学基金项目“祁连山南坡生态功能区土壤—植被界面蓄水固碳功能及优化调控研究”(2018-ZJ-903); 青海省科学技术厅(2020-ZJ-Y06); 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(QHTX-2020-043-02)

第一作者: 邱巡巡(1997—), 女(汉族), 贵州省凤冈县人, 硕士研究生, 研究方向为自然地理与生态环境过程。Email: 1260469240@qq.com。

通信作者: 曹广超(1971—), 男(汉族), 山东省苍山县人, 教授, 博士生导师, 主要从事青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用研究。Email: caoguangchao@126.com。

physical and chemical properties were analyzed to provide a theoretical reference for the rational utilization of land resources in an alpine region. [Methods] Nineteen representative farmland sample plots were selected on a southern slope of the middle section of the Qilian Mountains. Total carbon (TC), total nitrogen content (TN), organic carbon content (SOC), and water content (SWC) of soils in the study plots were measured in the laboratory, and soil bulk density ( $\rho_b$ ), particle size (clay, silt, sand), pH value, and other physical and chemical properties were determined. [Results] ① TC and TN decreased with increasing soil depth, and the average contents of TC and TN were 35.47 g/kg and 2.41 g/kg, respectively. ② The contents of SOC, SWC, clay, and silt also decreased with increasing soil depth, and the contents of soil  $\rho_b$ , pH value, and sand increased. ③ Soil physical and chemical properties were related to each other and jointly affected soil carbon and nitrogen content. The direct interaction between soil carbon and nitrogen was significant. Soil  $\rho_b$  had a direct effect on soil TC. SWC had an indirect effect on soil TC by affecting soil TN. Soil silt and clay contents had a direct effect on soil TN. Soil pH value had an indirect effect on soil TN by affecting soil silt and clay contents. [Conclusion] Farmland soil on a southern slope of the Qilian Mountains was relatively fertile, and TN and organic matter content were at a high level that could provide sufficient soil nutrients for vegetation growth in the study area. Under the farming practices currently used, the increase in soil TN and SWC was conducive to the accumulation of soil TC content, and the increase of soil TC, clay, and SWC content was conducive to the accumulation of soil TN content.

**Keywords:** farmland ecosystem; soil physical and chemical properties; linear regression analysis; path analysis; south slope of Qilian Mountains

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其分解释放的  $\text{CO}_2$  约占陆地生态系统与大气交换的  $\text{CO}_2$  总量的  $2/3$ <sup>[1-2]</sup>,会对生态系统的稳定性产生重要的影响<sup>[3]</sup>。农田土壤是陆地生态系统中一类重要的组成部分,农田土壤碳库因其具有固碳周期短、蓄积量大的特点,是较短时间内人类干扰最频繁,受人类活动影响最大的碳库而受到学者的关注<sup>[4]</sup>。

近年来,随着祁连山国家公园的试点建设以及生态价值的提高,以祁连山脉为核心的地区的土壤研究成为诸多学者关注的焦点<sup>[5-6]</sup>。祁连山地区横跨甘肃和青海两省,本文中的祁连山南坡重点指的是祁连山脉的青海片区,该区域地形复杂,气候变化明显,土壤和植被类型多样,属于典型的高寒区,年均气温仅为  $-5.9\text{ }^\circ\text{C}$ 。由于该地区是以林地、草地、冰川和湿地等自然景观系统为主,众多研究者更多探讨祁连山青海云杉林、高寒草甸等不同植被类型的土壤碳氮的影响因素<sup>[7-8]</sup>,而鲜少涉及对农田生态系统的土壤碳氮影响因素的研究。实际上,在祁连县、门源盆地等缓坡地区也分布着大量的农田生态系统。农田土壤碳、氮作为土壤养分的重要组成部分,在改善土壤结构及其通气性,维持和改良土壤肥力以提高土壤生产力方面具有极大作用<sup>[9-10]</sup>。同时,土壤理化性质的差异会引起土壤碳氮的变化<sup>[11-12]</sup>。熊杏等<sup>[13]</sup>对南方典型丘陵区耕地的研究表明成土母质是引起研究区土壤全氮、有机碳空间变异的主要因素。郭月峰等<sup>[14]</sup>

研究认为土壤物理性质是影响土壤有机碳变化的重要因子。张旭冉等<sup>[15]</sup>也表示土壤有机碳与理化性质之间关系密切。因此,厘清高寒农田生态系统理化特性与土壤碳氮的关系,对于明晰当地农用地土壤肥力水平并采取科学合理的管理措施进行农业生产具有重要作用<sup>[16]</sup>。基于此,本研究以祁连山中段南坡农田为研究对象,测定其土壤全碳(TC),全氮(TN),有机碳(SOC),含水量(SWC),容重( $\rho_b$ ),粒度(黏粒、粉砂、砂粒),pH 值等理化指标,旨在探讨该地区农田生态系统土壤碳氮与土壤理化性质的关系,进而为高寒地区合理利用土地资源提供理论借鉴。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

祁连山南坡位于青海省东北缘,海拔高度 2 286~5 208 m,平均海拔 3 800 m,地理位置为  $98^\circ 08' 13''$ — $102^\circ 38' 16''$  E,  $37^\circ 03' 17''$ — $39^\circ 05' 56''$  N,总面积  $2.40 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,样地选在祁连山南坡祁连县、门源回族自治县耕地。研究区年日照时数约为 2 200~2 900 h,年气温差异大,极端最低气温  $-37.1\text{ }^\circ\text{C}$ ,极端最高气温为  $30.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,年均气温为  $-5.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,年内降水集中分布在 6—8 月,年均降水量 300~400 mm,气温和降水具有明显的水平和垂直梯度差异,区内作物生长季与降水季同期,适宜青稞、燕麦和油菜等农作物的生长。

### 1.2 样品采集与分析

2020 年 8 月在研究区内根据祁连县、门源回族

自治县的天气状况,选择前 3~5 d 无降雨的日期在海拔 2700~3 200 m 的青稞、油菜、燕麦 3 种不同农作物的农用地进行采样,共布设 19 个样地(祁连县 10 个,门源县 9 个)。在每个样地内,按照随机采样法选取 3 个 1 m×1 m 的取样点,并用直径为 5 cm 的土钻钻取 0—50 cm(0—5, 5—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50 cm)的土壤剖面土样,剔除植被残根、石砾等杂物后用密封袋密封带回实验室自然风干后过筛备用,共采集分析土壤样品 324 件。此外,在每个样点用环刀按上述分层取原状土样称其鲜重,后密封带回测定容重及含水量。

土壤全碳含量,全氮含量用元素分析仪(Costech ECS4 010/4024, USA)测定,土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定,土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定;土壤 pH 值采用土壤浸提法(土:水=1:2.5)测定<sup>[17]</sup>。

### 1.3 数据处理

试验数据采用 SPSS 26 进行统计、相关及通径分析。运用逐步回归分析方法建立土壤全碳含量和全氮含量与其他土壤理化因子的多元回归方程,根据回归分析结果对通过显著性检验的因子进行通径分析,得出各因子对全碳含量和全氮含量的影响程度和相对重要性。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)

进行差异显著性检验,用 Spearman 进行简单相关性分析。采用 Origin 2021 b 和 Excel 2010 绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 农田土壤理化性质的变化特征

由表 1 可知,研究区农田 0~50 cm 深度土壤全碳含量变化范围在 33.94~36.59 g/kg 之间,平均值为 35.47 g/kg。随着土层的增加,土壤全碳含量总体呈减小趋势。其耕作层(0—20 cm)土壤全碳含量占深度全碳总含量的 51.26%。研究区农田 0—50 cm 深度土壤全氮含量变化范围在 2.25~2.56 g/kg 之间,平均值为 2.41 g/kg,随着土层的增加,土壤全氮含量总体呈减小趋势。其耕作层(0—20 cm)土壤全氮含量占深度全氮总含量的 52.25%。土壤全碳、全氮含量均在土壤耕作层达到最大值,具有表聚现象。不同土层土壤全碳、全氮含量之间差异不显著( $p>0.05$ )。

研究区农田 0—50 cm 深度各土层土壤有机碳含量变化范围在 16.62~21.77 g/kg 之间,平均值为 18.6 g/kg。土壤平均含水量为 19.7%,随着土层加深,土壤含水量总体呈减少并逐渐趋于稳定趋势。土壤容重为 1.25 g/cm<sup>3</sup>,随着土层深度向下增加,土壤容重呈现增大的趋势。研究区土壤呈弱碱性,其 pH 值变化范围为 7.89~8.21 之间,平均值为 8.01,随土层深度的增加,土壤 pH 值表现为总体呈增大趋势,土壤碱性相应地增加。

表 1 祁连山南坡农田 0—50 cm 土层土壤理化性质描述性统计

土层/cm	全碳含量 TC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮含量 TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳 SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	含水量 SWC/%	容重 $\rho_w$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	pH 值	黏粒/%	粉砂/%	砂粒/%
0—5	36.47±9.39	2.56±1.17	20.34±7.41	22.07±6.18	1.22±0.14	7.94±0.19	12.68±2.91	62.47±11.2	26.55±13.8
5—10	36.59±9.37	2.55±1.09	21.77±8.27	19.78±5.7	1.23±0.17	7.94±0.19	12.99±3.24	61.83±10.73	24.82±13.74
10—20	36±9.14	2.44±1.09	18.97±5.89	19.99±5.61	1.25±0.15	7.99±0.17	12.36±2.72	60.73±11.09	26.31±13.57
20—30	35.2±9.31	2.36±1.00	17.09±6.93	18.72±5.79	1.26±0.16	8.1±0.16	12.56±3.37	58.96±12.48	26.39±16.05
30—40	33.94±9.24	2.25±1.02	16.70±7.85	18.66±5.75	1.25±0.17	8.06±0.16	11.84±3.42	59.04±13.07	28.63±16.54
40—50	34.56±11.44	2.28±1.20	16.62±6.12	18.92±5.43	1.29±0.14	8.03±0.15	11.74±3.01	60.95±11.73	29.21±14.9
平均值	35.47±9.50	2.41±1.08	18.6±7.23	19.7±5.74	1.25±0.15	8.01±0.18	12.37±3.08	60.66±11.51	26.96±14.5
F 值	0.28	0.23	1.62	0.91	0.05	2.48	0.45	0.19	0.21
p 值	0.92	0.95	0.16	0.48	0.99	0.04	0.81	0.97	0.96

土壤的机械组成变化直接影响着作物对土壤养分的吸收,因此,土壤粒度是研究土壤环境的基础<sup>[18]</sup>,也是探究土壤有机碳变化重要的影响因子。本研究将土壤粒度分为黏粒(<4 μm)、粉粒(4~63 μm)和砂粒(>63 μm)3 部分<sup>[19]</sup>。结合表 1 与农田土壤类型“砂粒—粉砂—黏粒”三角网格图(图 1)解中可知,研究区农田土壤颗粒组成中粉粒含量比例最高,达

60.66%;其次为砂粒含量,为 26.96%;而黏砂含量比例较小,为 12.37%。

研究区农田土壤以砂质壤土、砂质黏壤土和砂质黏土为主,机械组成较粗。从不同土层来看,随着土层深度的增加,土壤黏粒含量总体呈减少趋势,土壤粉砂含量呈先减少后增加趋势,土壤砂粒含量总体呈增大趋势。

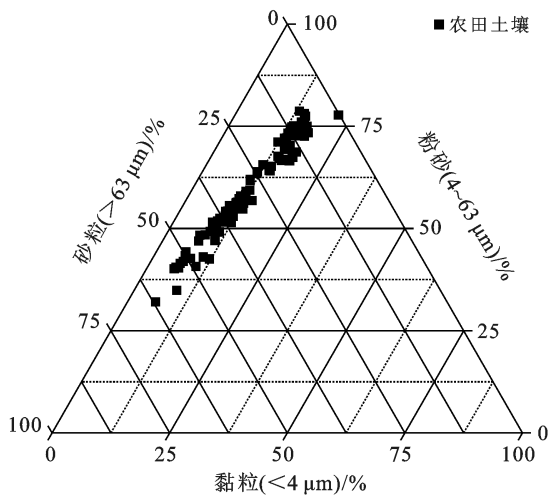


图 1 祁连山南坡农田 50 cm 土层土壤粒级划分

## 2.2 土壤全碳、全氮含量与其影响因子的关系

2.2.1 土壤全碳、全氮含量与其影响因子的逐步回归分析 通过逐步回归分析(表 2)建立起土壤全碳含量(TC),全氮含量(TN)分别与其他理化因子之间的多元回归方程,土壤  $TC = 59.284 + 4.908 \text{ TN} - 32.036 \rho_b + 0.244 \text{ SWC}$ ,  $TN = 10.502 + 0.066 \text{ TC} - 1.196 \text{ pH} - 0.052 \text{ Silt} + 1.31 \text{ Clay} + 0.035 \text{ SWC}$ ,其中,回归方程

中的系数为直接通径系数。由方程可知,土壤全氮含量、容重及含水量对土壤全碳含量影响显著( $p < 0.05$ )。土壤全碳含量、pH 值、粉砂含量、黏粒含量及含水量对土壤全氮含量影响显著( $p < 0.05$ )。为进一步探究土壤理化性质对土壤全碳含量、全氮含量的直接与间接联系,选取上述与土壤全碳含量有显著相关性的土壤全氮含量、土壤容重及土壤含水量这 3 个指标与土壤全碳含量做通径分析,通径计算方法参照宋小园等<sup>[20]</sup>研究。选取与土壤全氮含量有显著相关性的土壤全碳含量、pH 值、粉粒含量、黏粒含量及含水量这 5 个指标与土壤全氮含量做通径分析。

2.2.2 土壤全碳含量和全氮含量与其影响因子的通径分析 由表 3 和图 2 可知,在影响土壤全碳含量的显著性因子中,与土壤全碳含量的直接通径系数按绝对值大小排序为:土壤全氮含量(0.54) > 土壤容重(-0.43) > 土壤含水量(0.15)。土壤全氮含量对土壤全碳含量的直接通径系数最大,且表现为正效应;土壤容重对土壤全碳含量产生直接负效应。土壤含水量对土壤全碳含量的间接通径系数(0.24)大于其直接通径系数(0.15),表明土壤含水量主要通过土壤全氮含量而对土壤全碳含量产生间接正效应。

表 2 祁连山南坡农田土壤全碳、全氮含量回归系数输出结果

元素	模型	非标准化参数		标准化参数	t	P
		B	Std	Beta		
土壤全碳含量	常量	59.28	6.16		9.63	0.00
	全氮含量	4.91	0.62	0.54	7.93	0.00
	土壤容重	-32.04	4.63	-0.43	-6.92	0.00
	含水量	0.24	0.1	0.15	2.43	0.02
土壤全氮含量	常量	10.5	2.85		3.69	0.00
	全氮含量	0.07	0.01	0.6	10.52	0.00
	pH 值	-1.2	0.33	-0.21	-3.61	0.00
	粉砂含量	-0.05	0.01	-0.56	-6.30	0.00
	黏粒含量	0.13	0.03	0.39	4.30	0.00
	含水量	0.04	0.01	0.2	3.76	0.00

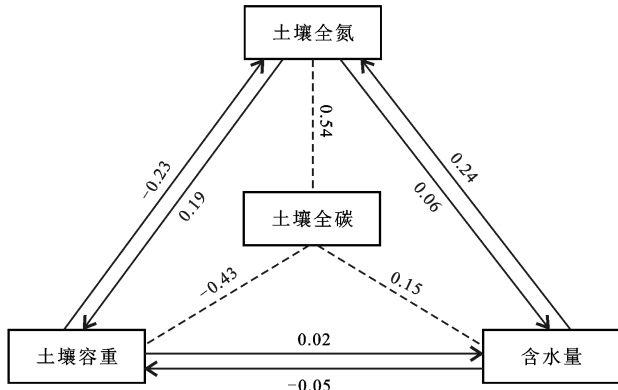
注: B 代表回归系数; Std 为标准错误; t 是对回归系数的显著性检验, p 为 0.05 的显著性水平。

表 3 祁连山南坡农田土壤全碳含量与理化性质因子的通径决策系数

决策系数	土壤全氮含量	土壤容重	土壤含水量
$R^2$	0.56	0.37	0.08

2.2.3 土壤理化因子对土壤全氮含量影响的通径分析 由表 4 和图 3 可知,在影响土壤全氮含量的显著性因子中,与土壤全氮含量的直接通径系数按绝对值大小排序为:土壤全碳含量(0.6) > 粉砂(-0.56) > 黏粒(0.39) > pH 值(-0.21) > 含水量(0.2)。土壤全碳

含量对土壤全氮含量的直接通径系数最大,且表现为正效应;其次为土壤粉砂含量,表现为直接负效应;土壤黏粒对土壤全氮含量表现为直接正效应。土壤 pH 值对土壤全氮含量的间接通径系数(-0.36)大于其直接通径系数(-0.21),表明土壤 pH 值通过其他因子而对土壤全氮含量产生间接负效应;土壤含水量对土壤全氮含量的间接通径系数(0.24)大于其直接通径系数(0.2),表明土壤含水量通过其他因子而对土壤全氮含量产生间接正效应。



注:虚线表示各因子对土壤全碳含量的直接影响,即直接途径系数;实线箭头表示各因子通过另一个因子对土壤全碳含量的间接影响,即间接途径系数,下同。

图 2 祁连山南坡农田土壤全碳含量与理化性质因子的途径系数

表 4 祁连山南坡农田土壤全氮含量与理化因子的途径决策系数

决策系数	土壤全碳含量	pH 值	粉砂	黏粒	含水量
$R^2$	0.59	0.2	-0.17	-0.08	0.14

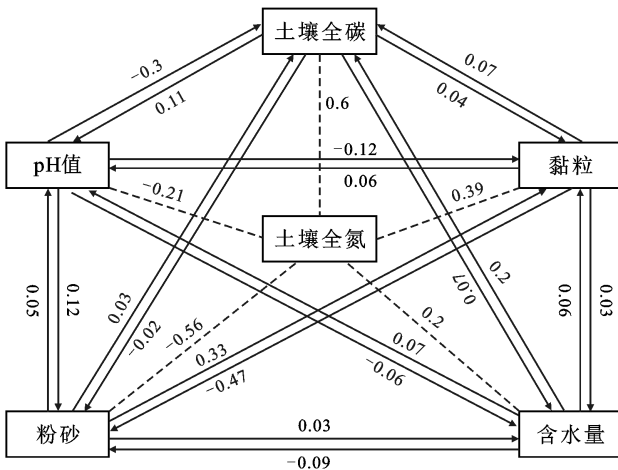


图 3 祁连山南坡农田土壤全氮含量与理化因子的途径系数

### 3 讨论

高寒农田是中国重要的耕地资源之一,与中国东北、华北等地区不同的自然特色是地势高、气候寒,且只有在地势较为缓平、水热条件相对较好的河谷等地带才适合农作物的生长<sup>[21]</sup>,具有维持生态脆弱区粮食安全、生态安全及社会安定的作用。本研究结果表明,研究区 50 cm 土层深度土壤全碳含量和全氮含量分别为 35.47, 2.41 g/kg, 根据全国土壤氮素含量分级标准<sup>[22]</sup>, 全氮含量大于 2 g/kg 表明研究区土壤氮含量较高; 研究区 50 cm 土壤有机碳含量为 18.6 g/kg,

按照目前沿用的 van Bemmelen 因数 1.724 作为有机碳转换为有机质的转换系数, 该研究区农田土壤有机质的均值约为 32.07 g/kg, 参照全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[23]</sup>, 其有机质含量处于高等水平, 表明研究区农田土壤比较肥沃。土壤全碳含量、全氮含量随土层的加深总体均呈减小趋势, 说明研究区农田土壤全碳含量, 全氮含量具有表聚现象, 这与郭月峰等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。究其原因是在表层土壤具有良好的通气及水热条件, 有利于在土壤微生物的作用下将聚集在表层的土壤枯枝落叶及腐烂根系等有机物分解, 增加土壤碳氮含量, 而深层土壤因长时间不翻耕而与外界物质交换贫乏, 养分不易积累<sup>[24-25]</sup>。此外, 很多林地、草地土壤碳氮随土层深度的加深也呈现出相同的变化规律<sup>[26-27]</sup>。随着土层加深, 土壤含水量总体呈减少并逐渐趋于稳定趋势, 可能是由于降水过程中产生的重力水通常在表层土壤达到饱和的状态下才会继续向底层迁移, 但表层土壤水分易通过降水、下渗等途径得失, 中间层与底层则相对稳定, 因而相差不大<sup>[14]</sup>。土壤表层含水量会大于底层土壤含水量这一结果的主要原因是采样时研究区正处于年降水集中月份, 受不定时降水影响导致。随着土层深度向下增加, 土壤容重呈现增大的趋势, 表明表层土壤较疏松, 这与农地作物耕作以及作物杂草枯落物的积累与分解有关, 由于植物根系改变了土壤结构, 使得土壤孔隙度增大, 土壤空气量增多导致土壤容重降低<sup>[28]</sup>。这与郭月峰等<sup>[14]</sup>在内蒙古赤峰市黄花甸子流域梯田的研究结果一致。研究区土壤呈弱碱性, 符合西北土壤大多呈碱性的特征。

土壤全碳含量、全氮含量作为土壤评价土壤质量的敏感指标<sup>[29]</sup>, 受气候、地形、土壤理化性质等自然条件和人类活动的综合影响<sup>[30]</sup>, 且存在各种因子间的相互作用<sup>[31]</sup>。本研究中, 土壤全碳含量、全氮含量互为显著影响因子, 且为正相关关系, 这与刁二龙等<sup>[32]</sup>、张少凤等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。这是因为土壤中的氮素主要来源于植物残体的归还量以及生物固氮, 而其输出主要是土壤有机质的分解<sup>[34]</sup>, 因此, 在长时间的积累下, 土壤碳氮含量间具有高度协同作用<sup>[35]</sup>。此外, 通过逐步线性回归及通径分析结果表明, 土壤容重及含水量对土壤全碳含量影响显著, 土壤 pH 值、粉粒含量、黏粒含量及含水量对土壤全氮含量影响显著。在土壤全碳含量的显著影响因子中, 土壤容重对土壤全碳含量起直接影响效应, 且两者呈负相关关系, 这是因为容重大的土壤相对结板且通透性差, 土壤保水保肥性差导致有机质含量少<sup>[36]</sup>, 从而直接影响土壤全碳含量。在本研究土壤全氮含量的显著影响因子中,

土壤黏粒、粉砂含量对土壤全氮含量起直接影响效应,pH值通过影响其他因子而间接对土壤全氮含量产生影响。土壤全氮含量与土壤黏粒含量之间呈正相关关系,与土壤粉砂含量之间呈负相关关系,这与郭月峰等<sup>[14]</sup>和马渝欣等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。贾海霞等<sup>[38]</sup>表示,土壤黏粒可抑制有机质被微生物分解,减少微生物细胞代谢死亡,保持土壤营养物质的稳定。土壤黏粒也可通过黏粒胶体吸附及形成土壤有机无机复合体实现对有机碳的物理保护<sup>[39]</sup>,而粉砂含量在一定范围内对土壤水分有效性、土壤透气性产生影响,相对保水保肥能力较差。此外,土壤含水量对土壤全碳含量、全氮含量均通过影响其他因子而产生间接影响,且均为正效应。元晓春等<sup>[40]</sup>表示,土壤含水量会通过影响土壤蛋白酶活性改变土壤氮含量,同时本研究结果表明土壤碳氮间有高度的协同关系。因此,土壤含水量会通过影响土壤中酶活性而间接影响土壤碳氮含量。

## 4 结论

本研究以祁连山南坡农田土壤为研究对象,探究其50 cm深度土壤的土壤全碳含量、全氮含量及其与其他理化因子之间的关系。

(1) 研究区50 cm土层土壤全碳含量、全氮含量在50 cm土层垂直分布上具有表聚现象,耕作层(0—20 cm)土壤全碳含量。全氮含量占50 cm深度总含量的51.26%和52.25%。研究区土壤氮含量和有机质含量处于高等水平,土壤较为肥沃。

(2) 土壤理化性质之间存在相互作用,共同影响土壤全碳含量、全氮含量。其中,土壤全氮、全碳含量相互直接作用最大,且均为正效应。此外,土壤容重对土壤全碳含量产生直接负效应,土壤含水量对土壤全碳含量产生间接正效应;土壤粉砂含量对土壤全氮含量产生直接负效应;土壤黏粒对土壤全氮含量产生直接正效应;土壤pH值对土壤全氮含量产生间接负效应;土壤含水量对土壤全氮含量产生间接正效应。

### [参 考 文 献]

- [1] Van Groenigen K J, Qi Xuan, Osenberg C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO<sub>2</sub> limits soil carbon storage [J]. *Science*, 2014, 344 (6183):508-509.
- [2] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 1982, 298 (5870):156-159.
- [3] 王棣,耿增超,余雕,等.秦岭典型林分土壤有机碳储量及碳氮垂直分布[J].*生态学报*,2015,35(16):5421-5429.
- [4] 徐丽,于贵瑞,何念鹏.1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J].*地理学报*,2018,73(11):2150-2167.
- [5] 高超.东祁连山不同退化程度高寒草甸草原土壤有机质特性及其对草地生产力的影响[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学,2007.
- [6] 杨成德,龙瑞军,陈秀蓉,等.东祁连山高寒草甸土壤微生物量及其与土壤物理因子相关性特征[J].*草业学报*,2007,16(4):62-68.
- [7] 申新山,魏志玲,向宇宸,等.不同海拔梯度高寒草甸土基本理化指标及氮素的变化动态[J].*中国水土保持*,2020(10):57-59.
- [8] 赵维俊,刘贤德,金铭,等.祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J].*土壤学报*,2016,53(2):477-489.
- [9] 刘林馨,王健,杨晓杰,等.大兴安岭不同森林群落植被多样性对土壤有机碳密度的影响[J].*生态环境学报*,2018,27(9):1610-1616.
- [10] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].*生态学报*,2011,31(18):5207-5216.
- [11] 吴江琪,马维伟,李广,等.黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(4):133-138.
- [12] 何洪盛,田青,王理德,等.青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J].*干旱区研究*,2021,38(1):223-232.
- [13] 熊杏,熊清华,郭熙,等.南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J].*植物营养与肥料学报*,2020,26(9):1656-1668.
- [14] 郭月峰,祁伟,姚云峰,等.小流域梯田土壤有机碳与土壤物理性质的关系研究[J].*生态环境学报*,2020,29(4):748-756.
- [15] 张旭冉,张卫青,乌日查呼,等.克氏针茅草原区有机碳与土壤理化性质的关系[J].*干旱区资源与环境*,2020,34(8):194-199.
- [16] 孟和,郭月峰,张美丽,等.小流域梯田土壤有机碳含量及其固碳潜力[J].*江苏农业科学*,2019,47(4):237-241.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 闫玉春,唐海萍,张新时,等.基于土壤粒度分析的草原风蚀特征探讨[J].*中国沙漠*,2010,30(6):1263-1268.
- [19] 袁杰,曹生奎,曹广超,等.祁连山南坡不同植被类型土壤粒度特征[J].*水土保持通报*,2019,39(2):76-82.
- [20] 宋小园,朱仲元,刘艳伟,等.通径分析在SPSS逐步线性回归中的实现[J].*干旱区研究*,2016,33(1):108-113.
- [21] 杨文辉,李月梅,韩燕.高寒区保护性耕作对油菜田土壤物理性状的影响[J].*安徽农业科学*,2010,38(35):20048-20049.

- [22] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476.
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [24] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山中段青海云杉林土壤肥力质量评价研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1368-1377.
- [25] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2930-2935.
- [26] 尤海舟, 毕君, 王超, 等. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 432-437.
- [27] 周启龙, 多吉顿珠, 陈少锋, 等. 西藏北部不同草地类型土壤碳、氮、磷的变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 251-255.
- [28] 何金军, 魏江生, 左合君, 等. 集宁一二连浩特铁路干线防护林土壤的理化特性[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 151-156.
- [29] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 58-67.
- [30] Spain A V. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils [J]. Soil Research, 1990, 28(6): 825.
- [31] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls [J]. Geoderma, 1996, 74(1/2): 65-105.
- [32] 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.
- [33] 张少凤. 锡林郭勒羊草草原不同利用方式下群落与土壤碳氮特征研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [34] 韩磊, 庄涛, 周慧华, 等. 小清河滨岸带土壤碳氮变化及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 28-34.
- [35] 朱凤武, 徐彩瑶, 濮俊杰, 等. 苏北滩涂围垦区土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(12): 77-83.
- [36] 刘永忠, 李齐霞, 孙万荣, 等. 气候干旱与作物干旱指标体系[J]. 山西农业科学, 2005, 33(3): 50-53.
- [37] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1153-1159.
- [38] 贾海霞, 汪霞, 李佳, 等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5106-5116.
- [39] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [40] 元晓春, 林惠瑛, 曾泉鑫, 等. 武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1560-1570.

(上接第 365 页)

- [35] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 等. 我国森林碳汇核算的计量模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194-200.
- [36] 徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 142-152.
- [37] 滕永忠, 白保勋, 陈东海, 等. 河南省中北部不同土地利用类型净碳汇及其价值[J]. 河南农业科学, 2019, 48(9): 60-66.
- [38] 周勇, 赵伟. 西安市土地利用结构碳排放核算及低碳优化研究[J]. 生态经济, 2018, 34(5): 21-25.
- [39] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955-1961.
- [40] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [41] Zhou Xiaolu, Lei Xiangdong, Liu Caixia, et al. Re-estimating the changes and ranges of forest biomass carbon in China during the past 40 years [J]. Forest Ecosystems, 2019, 6: 51.
- [42] 李璐, 董捷, 徐磊, 等. 功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区: 以武汉城市圈为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 1003-1015.