

# 黑河上游冰沟流域4种土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系

秦嘉海, 张 勇, 赵芸晨, 王治江, 高海宁, 赵 静

(河西学院农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000)

**摘要:** 为了探讨黑河上游冰沟流域不同土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系, 为黑河上游冰沟流域水源涵养研究提供科学依据, 采用野外采样, 室内分析方法, 研究了4种土壤有机碳分布特征及其与土壤特性的关系。结果表明: 4种土壤有机碳含量和密度在整个土壤剖面上均表现为: 森林灰褐土 > 高山灌丛草甸土 > 高山草甸土 > 山地栗钙土, 且垂直分布均随土壤深度增加而减少, 说明黑河上游冰沟流域的森林灰褐土比其它土壤更有利于土壤有机碳储存和积累。森林灰褐土0~10 cm土壤有机碳密度为  $4.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 略高于我国森林土壤0~10 cm土壤平均碳密度 ( $4.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 说明黑河上游冰沟流域的森林灰褐土区雨量充沛, 林下植被丰富, 凋落物现存量充足。4种土壤0~10 cm土层有机碳含量是整个土壤剖面土壤有机碳含量的30.69%~37.99%, 有机碳密度是整个土壤剖面有机碳密度的29.31%~36.77%, 说明黑河上游冰沟流域土壤有机碳含量和有机碳密度在表层具有很强的表聚性, 不合理的人为活动引发的水土流失极易造成土壤有机碳储量的减少, 应增加黑河上游冰沟流域植被覆盖度, 保护生态环境, 减少水土流失。4种土壤有机碳、全氮、CEC、田间持水量、团聚体在整个土壤剖面上均随土层深度增加而降低, 而土壤容重、pH值在整个土壤剖面上均随土层深度增加而增大。经回归统计分析, 4种土壤有机碳含量与土壤田间持水量、团聚体、全氮、CEC之间呈显著的正相关关系, 与土壤容重、pH之间呈显著的负相关关系。这种变化规律与多数学者研究结果基本一致。

**关键词:** 黑河上游; 冰沟流域; 土壤; 有机碳; 土壤特性

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)05-0200-07

## Characteristics of organic carbon and soil properties in Binggou valley at upstream of Heihe river

QIN Jia-hai, ZHANG Yong, ZHAO Yun-chen, WANG Zhi-jiang, GAO Hai-ning, ZHAO Jing

(School of Agriculture and Biotechnology, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China)

**Abstract:** Based on the method of field sampling and laboratory analysis, the relationship between distribution of organic carbon and soil properties was investigated for four kinds of soil in Binggou Valley at the upstream of Heihe River, so as to provide a scientific basis for local water conservation. The results showed that the content and density of organic carbon in whole profile of the four tested soils were consistently ordered as: gray brown forest soil > alpine scrub meadow soil > alpine meadow soil > mountain chestnut soil, and they decreased with the increase of soil depth, which indicated that the gray brown forest soil was more beneficial to the storage and accumulation of organic carbon than other soils in Binggou Valley. The density of organic carbon in 0~10 cm depth of gray brown forest soil was  $4.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , being slightly higher than the average value ( $4.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) in 0~10 cm depth of forest soil in China, which indicated that there was a relatively abundant litter biomass in the gray brown forest soil in Binggou Valley because of the plentiful rainfall and the good understory vegetation. The organic carbon content in 0~10 cm of the four soils was 30.69%~37.99% of total organic carbon content in the whole soil profile, and the organic carbon density in 0~10 cm was 29.31%~36.77% of total organic carbon density in the whole soil profile, which illustrated that the soil organic carbon was largely concentrated in the surface soil in Binggou Valley, and its storage capacity was easily lowered by unreasonable

收稿日期: 2012-09-28

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目“黑河流域生态水分样带调查”(91025002/D010106)

作者简介: 秦嘉海(1954—), 男, 甘肃省张掖市人, 教授, 主要从事水土保持学研究。

通信作者: 张 勇(1963—), 男, 甘肃省民乐县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事植物生态学和水土保持学研究。E-mail: qinjiahai123@163.com。

human activities as a result of soil and water erosion. Therefore, the vegetation coverage should be improved so as to protect the ecological environment and to reduce soil and water erosion in this region. With the increase of depth in profile of the four soils, the organic carbon content, total N content, CEC, field water capacity and aggregate percentage tended to decrease, while the soil bulk density and pH tended to rise. The regression statistical analysis showed the organic carbon content in the four soils was positively correlated with field water capacity, aggregate percentage, total N content and CEC, but was negatively correlated with soil bulk density and pH, being basically consistent with the results of many researchers.

**Keywords:** upstream of Heihe River; Binggou Valley; soil organic carbon (SOC); soil properties

陆地土壤是全球最大的碳库,总碳储量约为2 500 Pg,分别是大气碳库的3.3倍和生物碳库的4.5倍,其中土壤有机碳储量约为1 550 Pg,占陆地生态系统碳库的2/3<sup>[1]</sup>,而森林土壤碳储量占全球土壤碳储量的73%<sup>[2]</sup>。土壤有机碳是全球碳循环的重要组成部分,其含量和积累量直接影响全球碳平衡<sup>[3]</sup>,近年来,有关土壤有机碳分布特征及其影响因素研究报道的资料较多,王建林,阚泽忠,黎艳明,王建林,高俊琴,刘伟,蔡体久,孙文义,甘卓亭,丁访军,孙维侠等在贡嘎南山,成都经济区,粤北,念青唐古拉山,若尔盖高原,黄土塬区,小兴安岭,三江源区,黄土高原,黔中喀斯特地区,东北地区进行了土壤有机碳分布特征及其影响因素的研究<sup>[4-14]</sup>。目前,黑河上游用水量急剧增加,水资源供需矛盾日趋加剧,使得黑河上游生态环境更加恶化,森林面积急剧萎缩,有关黑河上游冰沟流域不同土壤有机碳分布特征与土壤特性的关系未见文献报道,本文以黑河上游冰沟流域的4种土壤为研究对象,旨在研究不同土壤类型有机碳分布特征与土壤特性的关系,为黑河上游冰沟流域水源涵养研究提供科学依据。

## 1 研究地点概况与研究方法

### 1.1 研究地点概况

研究地点位于青海省祁连县黑河上游冰沟流域,东经100°08'35"~100°13'01",北纬38°04'19"~38°34'35",海拔高度2 552~3 624 m,年降水量90.2~467.8 mm,年均蒸发量1 051.7 mm,年平均相对湿度60%,日照时间2 600 h。土壤类型是高山草甸土、亚高山灌丛草甸土、森林灰褐土和山地栗钙土<sup>[15]</sup>。针叶林树种有:青海云杉(*Picea crassifolia*)、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*);阔叶林树种有:山杨(*Populus davidiana*)、高山柳(*Salicaceae*)、杯腺柳(*Salix cupularis* Rehd);灌木林树种有:沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、肋果沙棘(*Hippophae neurocarpa* S. W. Liu)、银露梅(*Potentilla grabra*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品采集方法 2011年7月在青海省祁连县黑河上游的冰沟流域,选择具有代表性的森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土4种土壤类型进行调查和取样。按照典型选择的方法,在4种土壤类型样地中分别设置20 m×20 m的样品采集区,每个样品采集区从地表开始向下挖掘3个土壤剖面,每个剖面点按照0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm间距自下而上逐层采集土样各3 kg,用4分法带回1 kg混合土样室内化验分析,每个剖面点自下而上用环刀采集原状土,测定土壤容重和团聚体,样品采集区基本情况见表1。

1.2.2 测定项目及方法 土壤容重采用环刀法;>0.25 mm团聚体采用约尔得法;>2 mm石砾采用干筛法;CEC(阳离子交换量)采用NH<sub>4</sub>OAc—NH<sub>4</sub>Cl法;pH采用电位法(5:1水土比浸提);田间持水量采用威尔科克斯法;土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—外加热法:土壤有机碳密度计算公式为:

$$SOC = T \times \theta \times C \times (1 - \delta\%) / 100$$

式中,SOC为土壤有机碳密度(kg·m<sup>-2</sup>);T为土层厚度(cm);θ为土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>);C为土壤有机碳平均含量(g·kg<sup>-1</sup>);δ为直径>2 mm石砾含量(%);全氮采用全自动凯氏定氮仪法<sup>[16]</sup>。

1.2.3 数据处理 采用Excel2003和SPSS统计软件进行数据统计分析,不同土层土壤特性的差异显著性采用多重比较,LSR检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤有机碳含量及分布特征

土壤有机碳是表征土壤肥力的重要指标<sup>[17-18]</sup>,同一地区不同土壤类型因植被类型和枯落物积累量等不同,从而影响土壤有机碳含量。从表2资料可以看出,森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土0~50 cm土层土壤有机碳含量分别为33.97~120.07、25.81~96.37、20.01~

82.82 g·kg<sup>-1</sup>和 10.71 ~ 29.23 g·kg<sup>-1</sup>, 平均值表现为: 森林灰褐土 > 高山灌丛草甸土 > 高山草甸土 > 山地栗钙土, 森林灰褐土 0 ~ 50 cm 土层有机碳均值为 76.22 g·kg<sup>-1</sup>, 是高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土的 1.41、1.75 和 4 倍, 这主要是 4 种土壤地表植被类型和枯落物积累量不同<sup>[19-20]</sup>。4 种土壤 0 ~ 10 cm 土层有机碳含量是整个土壤剖面土壤有机碳含量的 30.69% ~ 37.99%, 说明土壤有机碳含量在表层具有很强的表聚性, 主要是由于植物

根系集中分布在土壤表层, 凋落物和腐殖质以及微生物的分解对土壤有机碳的贡献主要作用在地表, 且随土层深度增加而减弱, 因而表层土壤有机碳含量高<sup>[21]</sup>。另外, 4 种土壤不同层次土壤有机碳含量均随着土壤剖面垂直深度的增加而减少, 但不同土壤类型减少程度不同, 且在相同土层深度, 不同土壤类型有机碳含量差异亦较大。其原因是随着土层深度的增加, 枯落物和根系数量减少, 从而导致土壤有机碳含量下降<sup>[19-20]</sup>(表 2)。

表 1 样品采集区情况

Table 1 Situation of sample collection area

土壤类型 Soil types	高山草甸土 Alpine meadow soil	高山灌丛草甸土 Alpine scrub meadow soil	森林灰褐土 Gray brown forest soil	山地栗钙土 Mountain chestnut soil
坡度 Slope/(°)	23	24	25	21
海拔高度 Altitude/m	3724	3533	2900	2552
经度 Longitude	100°13'01"	100°12'57"	100°11'24"	100°08'35"
纬度 Latitude	38°34'35"	38°04'19"	38°06'59.5"	38°15'46"
植被群落 Vegetation community	苔草 + 嵩草 <i>Carex</i> L. + <i>Kobresia</i> Willd.	金露梅 + 银露梅 + 肋果沙棘 <i>Potentilla fruticosa</i> + <i>Potentilla</i> <i>glabra</i> Lodd. + <i>Hippophae</i> <i>rhamnoides</i> Linn.	苔藓 + 青海云杉 + 金露梅 <i>Bryophytes</i> + <i>Picea</i> <i>crassifolia</i> Kom + <i>Potentilla fruticosa</i>	针茅 + 早熟禾 + 火绒草 + 芨芨草 <i>Stipa capillata</i> Linn. + <i>Poa annua</i> + <i>Leontopodium</i> + <i>Achnatherum splendens</i>
枯落物积累厚度 Thickness of litters/cm	0.86	2.90	3.20	0.20
枯落物积累干质量 Dry weight of litters (t·hm <sup>-2</sup> )	13.04	40.97	48.52	2.03
郁闭度 Canopy density	—	0.70	0.85	—
成土岩石 Soil-forming rocks	石灰岩、砂岩、板岩 Limestone, sandstone, flagstone	石灰岩、砂岩、板岩 Limestone, sandstone, flagstone	石灰岩、砂岩、板岩 Limestone, sandstone, flagstone	石灰岩、砂岩、板岩 Limestone, sandstone, flagstone
成土母质 Soil parent materials	坡积物 Slope sediments	坡积物 Slope sediments	坡积物 Slope sediments	坡积物 Slope sediments
土壤质地 Soil texture	壤质土 Loamy soil	壤质土 Loamy soil	壤质土 Loamy soil	壤质土 Loamy soil
土壤结构 Soil structure	碎块状 Fragmental	碎块状 Fragmental	碎块状 Fragmental	碎块状 Fragmental

表 2 不同林地土壤有机碳含量/(g·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Content of organic carbon in different forest soils

土壤类型 Soil types	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 50 cm	合计 Total	平均值 Average
高山草甸土 Alpine meadow soil	82.82aA	56.37bB	35.45cC	23.33dD	20.01eD	217.98	43.60
高山灌丛草甸土 Alpine scrub meadow soil	96.37aA	68.15bB	48.13cC	30.99dD	25.81eE	269.45	53.89
森林灰褐土 Gray brown forest soil	120.07aA	99.26bB	79.61cC	48.19dD	33.97eE	381.10	76.22
山地栗钙土 Mountain chestnut soil	29.23aA	24.16bB	19.39cC	11.74dD	10.71dD	95.23	19.04

注: 同行数据大写字母不同表示  $LSR_{0.01}$ , 小写字母不同表示  $LSR_{0.05}$  差异显著水平, 表 3 同。

Note: Different capital and lowercase letters in same rows mean significant difference at  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ , respectively, the same as Table 3.

## 2.2 不同土壤有机碳密度及分布特征

从表3资料可以看出,森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土0~50 cm土层有机碳密度分别为2.49~5.10、1.98~5.31、1.52~5.24 kg·m<sup>-2</sup>和0.73~2.16 kg·m<sup>-2</sup>,平均值表现为森林灰褐土>高山灌丛草甸土>高山草甸土>山地栗钙土,其中,森林灰褐土有机碳密度均值为4.54 kg·m<sup>-2</sup>,是高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙的1.33、1.81和3.49倍,究其原因,一是4种土壤树种和植被类型不同;二是4种土壤受人为干扰、水土流

失的影响程度不同;三是4种土壤有机质含量和土壤容重等因素的差异所致。另外,4种土壤剖面有机碳密度沿土壤剖面垂直分布均随土层深度增加而降低,这种变化规律与王淑芳研究结果相一致<sup>[22]</sup>。另外,4种土壤0~10 cm土层有机碳密度是整个土壤剖面有机碳密度的29.31%~36.77%,说明土壤有机碳密度在表层具有很强的表聚性,这主要是由于植被根系和地表凋落物对土壤表层有机碳的积累发挥了很强的作用(表3)。

表3 不同土壤有机碳密度/(kg·m<sup>-2</sup>)  
Table 3 Density of organic carbon in different forest soils

土壤类型 Soil types	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~50 cm	合计 Total	平均值 Average
高山草甸土 Alpine meadow soil	5.24aA	3.34bB	2.42cBC	1.73dCD	1.52deDE	14.25	2.85
高山灌丛草甸土 Alpine scrub meadow soil	5.31aA	4.11bAB	3.28cBC	2.29dCD	1.98eDE	16.95	3.39
森林灰褐土 Gray brown forest soil	6.79aA	5.10bB	4.89cBC	3.45dCD	2.49eDE	22.70	4.54
山地栗钙土 Mountain chestnut soil	2.16aA	1.66bAB	1.27cBC	0.78dCD	0.73deDE	6.50	1.30

## 2.3 不同土壤有机碳与土壤特性的关系

2.3.1 不同土壤容重与有机碳的关系 4种土壤剖面容重均值表现为:森林灰褐土<高山灌丛草甸土<高山草甸土<山地栗钙土(表4),森林灰褐土与高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土比较,土壤剖面容重分别降低了0.89%、3.44%和5.08%,究其原因是不同土壤生境条件、枯落物积累量和植物根系分布等因素的影响,导致其土壤容重存在一定差异;另一方面,4种土壤0~50 cm剖面容重均随着土层的加深而增大,各土层之间土壤容重差异达到显著和极显著水平(表4),这是由于土壤容重在剖面上的变化与该土壤的孔隙度、林木根系的生长状况有关。将森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土有机碳与土壤容重进行回归分析,得到的回归方程分别为: $y = 1.4692 - 0.0056x$ 、 $y = 1.4964 - 0.0068x$ 、 $y = 1.4870 - 0.0075x$ 、 $y = 1.3132 - 0.0074x$ ,相关系数(R)分别为:-0.9918、-0.9737、-0.9395、-0.9186,说明4种土壤有机碳与土壤容重之间呈显著的负相关关系,这种变化规律与曹丽花、刘合满、赵世伟研究结果相一致<sup>[23]</sup>。

2.3.2 不同土壤田间持水量与有机碳的关系 森

林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm土壤田间持水量变动在8.01%~58.14%之间,其剖面平均值分别为36.25%、27.96%、25.60%和22.15%,4种土壤剖面田间持水量均值表现为:森林灰褐土>高山灌丛草甸土>高山草甸土>山地栗钙土(表4),森林灰褐土与高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土比较,土壤田间持水量分别增加了1.30、1.42倍和1.64倍,这种变化规律与不同土壤类型枯落物积累量和含水量有关。4种土壤剖面田间持水量均随着土层的加深而减少,各土层土壤田间持水量的差异达到显著和极显著水平。将森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土有机碳与田间持水量进行回归分析,得到的回归方程分别为: $y = 6.1142 + 0.4835x$ 、 $y = 5.7640 + 0.4122x$ 、 $y = 6.4128 + 0.4402x$ 、 $y = 3.9390 + 0.6820x$ ,相关系数(R)分别为:0.9789、0.9656、0.9716、0.9796,说明土壤有机碳含量与田间持水量之间呈显著的正相关关系,这种变化规律与孙慧兰、李卫红、杨余辉等研究结果相一致<sup>[24]</sup>。

表 4 不同土壤剖面有机碳和土壤特性的变化特征

Table 4 Changes of organic carbon and soil properties in different soil profiles

土壤类型 Soil types	采样深度 Sampling depth /cm	有机碳 Organic carbon /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	容重 Bulk density /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	田间持水量 Field water capacity /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	>0.25mm 团聚体 >0.25mm aggregates /%	全氮 Total nitrogen /( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	CEC /( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH
高山草甸土 Alpine meadow soil	0~10	82.82aA	0.93dD	41.76aA	30.89aA	5.32aA	23.88aA	7.14cA
	10~20	56.37bB	0.96dD	32.01bB	27.11bB	3.62bB	23.21aA	7.22bA
	20~30	35.45cC	1.18cC	24.10cC	25.51cB	2.27cB	20.08bB	7.24bA
	30~40	23.33dD	1.32bB	19.23dD	22.45dC	1.49dC	18.03cC	7.28aA
	40~50	20.01eD	1.40aA	10.90eE	20.09cC	1.28dC	17.41dC	7.30aA
0~50 cm 均值 0~50 cm mean		43.60	1.16	25.60	25.21	2.79	20.52	7.24
高山灌丛草甸土 Alpine scrub meadow soil	0~10	96.37aA	0.88eD	43.05aA	39.71aA	6.19aA	25.74aA	7.12bA
	10~20	68.15bB	0.96dD	36.24bB	34.86bB	4.37bB	25.32aA	7.14bA
	20~30	48.13cC	1.15cC	28.46cC	32.79cB	3.09cB	23.78bB	7.16bA
	30~40	30.99dD	1.28bB	20.12dD	28.87dC	1.99dC	20.95cC	7.20aA
	40~50	25.81eE	1.36aA	12.04eE	25.41cC	1.65dC	17.51dD	7.22aA
0~50 cm 均值 0~50 cm mean		53.89	1.13	27.96	32.33	3.46	22.66	7.17
森林灰褐土 Gray brown forest soil	0~10	120.07aA	0.81dC	58.14aA	40.64aA	7.71aA	29.21aA	6.58eB
	10~20	99.26bB	0.88dC	49.46bB	35.55bB	6.38bAB	27.12bB	6.62dB
	20~30	79.61cC	1.01cB	32.42cC	32.57cC	5.11cBC	25.51cC	6.96cB
	30~40	48.19dD	1.23bA	26.58dD	30.71dC	3.09dD	22.90dD	7.10bA
	40~50	33.97eE	1.26aA	14.64eE	28.79cC	2.12eDE	20.18eD	7.15aA
0~50 cm 均值 0~50 cm mean		76.22	1.12	36.25	33.65	4.88	24.98	6.88
山地栗钙土 Mountain chestnut soil	0~10	29.23aA	1.11eC	37.40aA	24.27aA	3.41aA	18.57aA	7.28dA
	10~20	24.16bB	1.13cdC	28.65bB	21.30bB	2.82bB	18.05aA	7.30cA
	20~30	19.39cC	1.15cC	21.32cC	20.04bB	2.26bcB	15.62bB	7.32cA
	30~40	11.74dD	1.20bB	15.36dD	17.64cC	1.37dC	14.02bB	7.36bA
	40~50	10.71dD	1.27aA	8.01eE	17.36cC	1.25deC	13.54cC	7.41aA
0~50 cm 均值 0~50 cm mean		19.04	1.18	22.15	20.12	2.22	15.96	7.33

注:同列数据大写字母不同表示  $LSR_{0.01}$ ,小写字母不同表示  $LSR_{0.05}$ 差异显著水平。

Note: Different capital and lowercase letters in same columns mean significant difference at  $P < 0.01$  and  $P < 0.05$ , respectively.

2.3.3 不同土壤团聚体与有机碳的关系 森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm 土壤团聚体变动在 17.36%~40.64% 之间,其剖面平均值分别为 33.65%、32.33%、25.21% 和 20.12%。4 种土壤剖面团聚体均值表现为:森林灰褐土 > 高山灌丛草甸土 > 高山草甸土 > 山地栗钙土,森林灰褐土与高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土比较,土壤团聚体分别增加了 1.04、1.33 倍和 1.67 倍,究其原因,针叶林枯落物积累量大,这些枯落物在分解时产生多糖类、脂肪、树脂、蜡脂等胶结物质,促进了土壤团聚体的形成<sup>[25]</sup>。4 种土壤剖面团聚体均随着

土层的加深而降低,各土层团聚体的差异达到显著和极显著水平。将森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土有机碳与土壤团聚体进行回归分析,得到的回归方程分别为:  $y = 24.0506 + 0.1259x$ 、 $y = 22.3584 + 0.1849x$ 、 $y = 18.4944 + 0.1540x$ 、 $y = 13.3882 + 0.3535x$ ,相关系数 ( $R$ ) 分别为:0.9645、0.9742、0.9642、0.9878,说明土壤有机碳含量与土壤团聚体之间呈显著的正相关关系(表 4)。

2.3.4 不同土壤全氮与有机碳的关系 森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm 全氮变动在

1.25~7.71 g·kg<sup>-1</sup>之间,其剖面平均值分别为4.88、3.46、2.79 g·kg<sup>-1</sup>和2.22 g·kg<sup>-1</sup>。4种土壤剖面全氮含量均值表现为:森林灰褐土>高山灌丛草甸土>高山草甸土>山地栗钙土(表4)。森林灰褐土与高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土比较,土壤全氮分别增加了1.41、1.75和2.20倍,这种变化规律与土壤有机碳变化规律相一致,说明土壤全氮含量与土壤有机碳有一定的关系。4种土壤剖面全氮含量均随土壤深度的增加而逐渐降低,这是由于土壤全氮在剖面上的变化与该土壤的植被根系生长状况和土壤有机碳含量有关。将森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土有机碳与土壤全氮进行回归分析,得到的回归方程分别为: $y = 0.0554 + 0.0647x$ 、 $y = 0.0056 + 0.0643x$ 、 $y = 0.0514 + 0.1073x$ 、 $y = 0.00013 + 0.1166x$ ,相关系数( $R$ )分别为:0.9898、0.9976、0.9677、0.9999。这种变化规律与张鹏,陈年来,张涛研究结果相一致<sup>[26]</sup>。

2.3.5 不同土壤 CEC 与有机碳的关系 森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm 土壤 CEC 变动在 13.54~29.21 cmol·kg<sup>-1</sup>之间,其剖面平均值分别为 24.98、22.66、20.53 cmol·kg<sup>-1</sup>和 15.96 cmol·kg<sup>-1</sup>。4种土壤剖面 CEC 均值表现为:森林灰褐土>高山灌丛草甸土>高山草甸土>山地栗钙土(表4),森林灰褐土与高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土比较,土壤 CEC 分别增加了1.10、1.22和1.57倍,究其原因,是针叶林枯落物积累量多,这些枯落物在土壤微生物的作用下合成了土壤腐殖质,土壤腐殖质带负电荷<sup>[27]</sup>,吸附了土壤中的阳离子,因而增大了土壤的 CEC。4种土壤剖面 CEC 均随着土层的加深而降低,各土层土壤 CEC 差异达到显著和极显著水平。将森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土有机碳与土壤 CEC 进行回归分析,得到的回归方程分别为: $y = 17.4512 + 0.0988x$ 、 $y = 17.0991 + 0.1032x$ 、 $y = 15.8428 + 0.1073x$ 、 $y = 10.5906 + 0.2816x$ ,相关系数( $R$ )分别为:0.9906、0.8693、0.9543、0.9828,说明土壤有机碳含量与土壤 CEC 之间呈显著的正相关关系。

2.3.6 不同土壤 pH 与有机碳的关系 森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm 土壤 pH 值变动在 6.58~7.41 之间,其剖面平均值分别为 6.88、7.17、7.24 和 7.33。4种土壤剖面 pH 均值表现为:森林灰褐土<高山灌丛草甸土<高山草甸土<山地栗钙土(表4)。森林灰褐土与高山灌丛草甸土、高

山草甸土和山地栗钙土比较,土壤 pH 值分别降低了4.05、4.97和6.14百分点,究其原因,是针叶林枯落物积累量多,枯落物在土壤微生物分解过程中产生了有机酸,因而降低了土壤 pH。4种土壤剖面 pH 值均随着土层的加深而增大,各土层土壤 pH 值的差异显著性,经 LSR 检验达到显著水平。将森林灰褐土、高山灌丛草甸土、高山草甸土、山地栗钙土有机碳与土壤 pH 值进行回归分析,得到的回归方程分别为: $y = 7.4336 - 0.0072x$ 、 $y = 7.2416 - 0.0014x$ 、 $y = 7.3380 - 0.0023x$ 、 $y = 7.4509 - 0.0061x$ ,相关系数( $R$ )分别为:-0.9616、-0.9545、-0.9828、-0.9427,说明土壤有机碳含量与土壤 pH 值之间呈显著的负相关关系。这种变化规律与刘伟,陈积民,高阳,等研究结果相一致<sup>[28]</sup>。

### 3 结 论

1) 4种土壤有机碳含量和密度在整个土壤剖面上(0~50 cm)均表现为:森林灰褐土>高山灌丛草甸土>高山草甸土>山地栗钙土,且垂直分布均随土壤深度增加而减少,但减少的程度不同。说明同一地区不同土壤有机碳的储存和积累不同。在黑河上游的冰沟流域,森林灰褐土比高山灌丛草甸土、高山草甸土和山地栗钙土更有利于土壤有机碳储存和积累。

2) 森林灰褐土 0~10 cm 土壤有机碳密度 4.54 kg·m<sup>-2</sup>,高于我国森林土壤 0~10 cm 土壤平均碳密度(4.24 kg·m<sup>-2</sup>)<sup>[29]</sup>,说明黑河上游冰沟流域的森林灰褐土区雨量充沛、林下植被丰富、凋落物现存量充足。

3) 4种土壤 0~10 cm 土层有机碳含量和有机碳密度均大于其它土层,充分说明了黑河上游冰沟流域土壤有机碳表现出很强的表聚性。这意味着不合理的人为活动破坏地表而引发的水土流失极易造成土壤有机碳储量的减少。因此,应促进黑河上游冰沟流域植被恢复,避免不合理的人为干扰活动,增加植被覆盖,保护生态环境,减少水土流失。

4) 4种土壤有机碳、全氮、CEC、田间持水量、团聚体在整个土壤剖面上均随土层深度增加而降低,而土壤容重、pH 值在整个土壤剖面上均随土层深度增加而增大,与多数研究结论相一致<sup>[30-31]</sup>。经回归统计分析,4种土壤有机碳含量与土壤田间持水量、团聚体、全氮、CEC 之间呈显著的正相关关系,与土壤容重、pH 之间呈显著的负相关关系。这种变化规律与冯瑞章、高旭升、孙飞达、张法伟、颜淑云研究结果相吻合<sup>[32-36]</sup>。

## 参考文献:

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304:1623-1627.
- [2] Dixon R K, Solomon A M, Brown S. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. *Science*, 1994, 263:185-190.
- [3] Corre M D, Schnabel R R, Shaffer J A. Evaluation of soil organic carbon under forests, cool-season grasses and warm-season grasses in the northeastern US[J]. *Soil biology and Biochemistry*, 2000, 31(11): 1531-1539.
- [4] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 贡嘎南山-拉轨岗日山南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2):346-349.
- [5] 阚泽忠, 金立新, 李忠惠, 等. 成都经济区不同地貌景观区土壤有机碳分布特征及储量估算[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(10): 1126-1132.
- [6] 黎艳明, 周毅, 陈会智. 粤北次生常绿阔叶林土壤有机碳分布特征研究[J]. *广东林业科技*, 2011, 27(4):6-11.
- [7] 王建林, 欧阳华, 王忠红, 等. 念青唐古拉山东南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及影响因素[J]. *地理科学*, 2009, 29(3):385-390.
- [8] 高俊琴, 雷光春, 李丽, 等. 若尔盖高原三种湿地土壤有机碳分布特征[J]. *湿地科学*, 2010, 8(4):327-330.
- [9] 刘伟, 程积民, 陈芙蓉, 等. 黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量[J]. *草地学报*, 2011, 19(3):425-431.
- [10] 蔡体久, 辛国辉, 张阳武, 等. 小兴安岭泥炭藓湿地土壤有机碳分布特征[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(5):109-112.
- [11] 孙文义, 邵全琴, 刘纪远, 等. 三江源典型高寒草地坡面土壤有机碳变化特征及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(12): 2072-2083.
- [12] 甘卓亭, 张掌权, 陈静, 等. 黄土塬区苹果园土壤有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2010, 30(8):2135-2140.
- [13] 丁访军, 潘忠松, 周凤娇, 等. 黔中喀斯特地区 3 种林型土壤有机碳含量及垂直分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 161.
- [14] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2):298-330.
- [15] 秦嘉海, 吕彪. *河西土壤*[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2001: 29-32.
- [16] 张万儒. *森林土壤分析方法*[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 56-68.
- [17] 罗海波, 刘方, 刘元生, 等. 喀斯特石漠化地区不同植被群落的土壤有机碳变化[J]. *林业科学*, 2009, 45(9):24-28.
- [18] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1):99-105.
- [19] Lee C S, You Y H, Robinson G R. Secondary succession and natural habitat restoration in abandoned fields of central Korea[J]. *Restoration Ecology*, 2002, 10(2):306-314.
- [20] Anderson H. Microbial eco-physiological indicator to assess soil quality[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2003, 98(1/3): 285-293.
- [21] 黄从德, 张健, 杨万勤, 等. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征[J]. *生态学报*, 2009, 29(3):1217-1225.
- [22] 王淑芳, 王效科, 张千千, 等. 密云水库上游流域不同林分土壤有机碳分布特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(11):2558-2562.
- [23] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 退化高寒草甸土壤有机碳分布特征及与土壤理化性质的关系[J]. *草业科学*, 2011, 28(8):1411-1415.
- [24] 孙慧兰, 李卫红, 杨余辉, 等. 伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布[J]. *地理科学*, 2012, 32(5):603-607.
- [25] 黄昌勇. *土壤学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999:80-85.
- [26] 张鹏, 陈年来, 张涛. 黑河上游山地青海云杉林土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(3):445-450.
- [27] 王阴槐. *土壤肥料学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992:33-34.
- [28] 刘伟, 陈积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1):68-76.
- [29] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5):687-699.
- [30] Hutsch B W, Augustin J, Merbach W. Plant rhizodeposition an important source for carbon turnover in soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2002, 165:397-407.
- [31] 蔡晓布, 周进. 退化高寒草原土壤有机碳时空变化及其与土壤物理性质的关系[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(11):2639-2645.
- [32] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(2): 263-269.
- [33] 高旭升, 田种存, 郝学宁, 等. 三江源区高寒草原草地不同退化程度土壤养分变化[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(5):37-40.
- [34] 孙飞达, 龙瑞军, 蒋文兰, 等. 三江源区不同鼠洞密度下高寒草甸植物群落生物量和土壤容重特性研究[J]. *草业学报*, 2008, 17(5):111-116.
- [35] 张法伟, 李英年, 汪诗平, 等. 青藏高原高寒草甸土壤有机质、全氮和全磷含量对不同土地利用格局的响应[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(3):323-326.
- [36] 颜淑云, 周志宇, 秦彧, 等. 玛曲高寒草地不同利用方式下土壤氮素含量特征[J]. *草业学报*, 2010, 19(2):153-159.

## (上接第 116 页)

- [4] Sampson. Frequency and distribution of self-incompatibility alleles in *Raphanus raphanistrum*[J]. *Genetica*, 1967, 56(2):241-251.
- [5] 刘后利. 油菜的遗传和育种[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985:203-230.
- [6] 王关林. *植物基因工程原理*[M]. 北京: 科学出版社, 2002:747-749.
- [7] 孙万仓, 范惠玲, 孟亚雄, 等. 白菜型油菜自交亲和性变异分析[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(2):107-109.
- [8] FAN Huiling, SUN Wancang. Analysis of self-compatibility in *Sinapis Alba Boiss* [C]//Proceedings of the 12th International Rapeseed Congress. Wuhan, China: Science Press, 2007:368-370.
- [9] 徐家炳. 大白菜自交不亲和系 S 等位基因分析[J]. *中国蔬菜*, 1995, (3):1-4.
- [10] 朱利泉, 王晓佳. 自交不亲和植物 S-位点特异糖蛋白[J]. *生命的化学*, 1998, 18(3):13-15.