

青海湖流域六类土壤表土有机碳黑碳含量特征及其储量

胡卫国^{1,2}, 曹军骥¹, 韩永明¹

(1. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 根据青海湖流域土壤类型图采集了 49 个表土样品, 研究了这些样品的有机碳和黑碳的含量特征及其储量。研究得出: 六类土壤的有机碳含量都比较高, 说明青海湖流域土壤的储碳能力比较强; 总体来说, 六类土壤的黑碳含量都不高, 但是焦炭的含量是相当高的, 而烟炱的含量较低; 焦炭和黑碳的相关性极高, 说明焦炭是黑碳的主要组成部分, 并且说明二者具有相同的来源; 由于焦炭主要是由生物质燃烧生成的, 故而这六类土壤的黑碳也多是生物质燃烧生成的; 六类土壤总面积为 18416.15 km² (占流域土壤总面积的 78%), 有机碳总储量为 119.56 × 10⁶ t, 黑碳总储量为 4.36 × 10⁶ t。

关键词: 青海湖流域; 表土; 黑碳; 有机碳; 储量

中图分类号: S153.1; X14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2010)03-0213-06

The characteristic of organic carbon and black carbon content and its storage in six types topsoil of Qinghai Lake basin of China

HU Wei-guo^{1,2}, CAO Jun-ji¹, HAN Yong-ming¹

(1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the map of soil type of Qinghai Lake basin, 49 topsoil samples were collected to study the organic carbon and black carbon concentrations and reserves. Research obtained: organic carbon content was higher in six types of soil, which indicated that the carbon storage of the soil of Qinghai Lake basin was stronger; Overall, black carbon content was not high, but the content of charcoal was very high, and lower levels of soot; there was a high correlation between charcoal and black carbon, indicating that charcoal was the major component of black carbon, and that both had the same source; the charcoal was mainly produced from biomass burning. And therefore, these soil black carbon were mostly generated from biomass burning; the total area of these six types of soil was 18416.15 km² (accounting for 78% of the total soil area of Qinghai Lake basin), and its organic carbon storage was 119.56 × 10⁶ t, black carbon storage was 4.36 × 10⁶ t.

Key Words: Qinghai Lake basin; topsoil; black carbon; total organic carbon; storage

土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分, 全球约有 1500 Gt 碳是以有机质形态储存于地球土壤中, 土壤碳库储量约是大气碳库的 2 倍 (金峰等, 2000), 植被碳库的 3 倍 (Post et al, 1990)。陆

地生态系统碳循环 (于贵瑞, 2003; Post et al, 1990; Eswaran et al, 1993; 陈庆强等, 1998; Bohn, 1982) 因与全球变化密切相关而成为当前的研究热点, 而碳循环和氮循环密切相关 (李天杰等,

收稿日期: 2010-11-15

基金项目: 国家科技支撑计划 (2007BAC30B01)

通讯作者: 胡卫国, E-mail: tail.3@163.com

2004)。青藏高原草地发育的土壤富含有机质,土壤碳密度明显高于其他地域土壤(王绍强和周成虎,1999)。近年来,许多研究表明,青藏高原气温不断升高,由于冻土热力敏感性大,因此高原冻土具有很大的碳、氮等温室气体的排放潜力(康兴成,1996)。

黑碳(black carbon,简称BC)是化石燃料或生物体不完全燃烧产生的一种非纯净碳的混合物(Goldberg,1985;Kuhlbusch,1998),由于测量方法的不同又称为元素碳(Element Carbon,简称EC),广泛分布于大气、土壤、沉积物、水体和冰、雪等环境中(Kuhlbusch,1998;Preston and Schmidt,2006)。黑碳作为燃烧产物的连续统一体,主要主要由两类物质组成,分别是焦炭(Charcoal)和烟炱(Soot)(Preston and Schmidt,2006;Schmidt,2001;Masiello,2004)。焦炭定义为有机物质加热和直接高温裂解形成的含碳燃烧残留物;烟炱定义为高温燃烧形成的气态前体物,经过凝缩过程形成的高度浓缩、难降解的球型碳颗粒。焦炭由于直径(范围以1~100 μm 为主)比较大,属于短距离传输,可以反映局地生态系统的燃烧状况,而烟炱的粒径在微米和亚微米之间,属于长距离输送,在大气中可悬浮多达几个月(Masiello,2004);由于黑碳的高度芳香化结构,难降解,能在土壤和沉积物中积累起来(Schmidt and Noack,

2000),因此会影响碳循环(Kuhlbusch,1998)和土壤碳的生物和化学应用性(Schmidt and Noack,2000)。

青海湖流域处于比较特殊的地理和生态单元。研究青海湖流域土壤有机碳、黑碳含量特征及其储量,是全球碳循环研究中不可缺少的重要部分。同时,有机碳、黑碳储量的估算对于评价流域生态系统,以及为今后合理利用土地资源、提高土壤质量起着决策指导作用。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据青海湖流域土壤类型图,采集了49个土壤表土样品,采样点如图1所示。由于交通不便,因此只采集了六类土壤样品,分别是栗钙土(10个)、草甸土(10个)、风沙土(10个)、沼泽土(10个)、黑毡土(6个)和草毡土(3个)。

1.2 实验方法

采集的土壤样品烘干后在玛瑙研钵内研磨,然后过200目筛,以减少粒度对实验的影响。取土样0.3~0.5 g,加1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸7.5 mL,室温下静置24 h,然后离心(4000转,6分钟),离心三次直到溶液呈中性,倒掉上层清液,烘干,烘干后用锡舟包30~80 mg样品。包好的样品采用Vario EL III

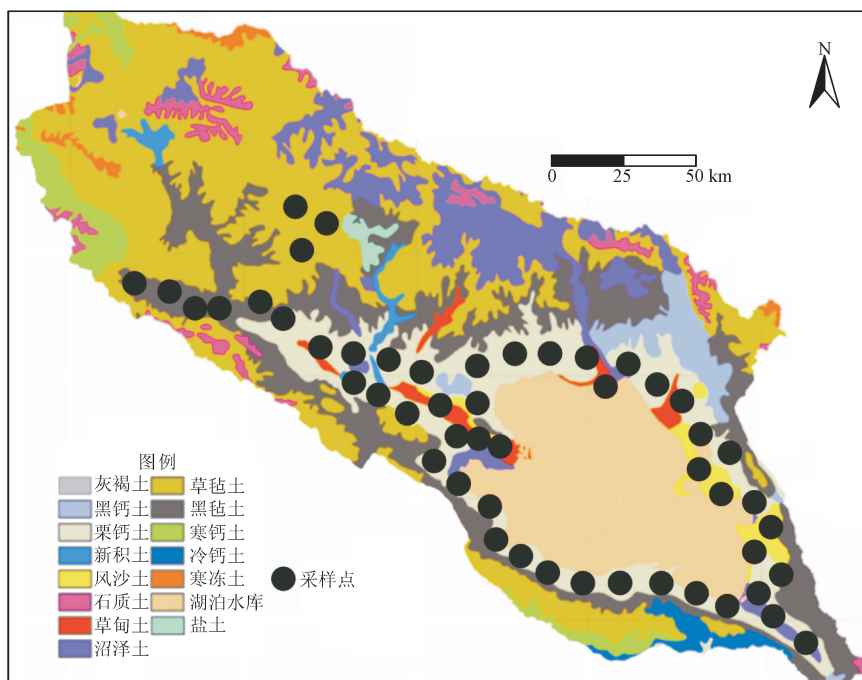


图1 土壤类型和采样点

Fig.1 Soil types and the distribution of samples

元素分析仪分析测定总有机碳。

黑碳含量的测定是采用遵守 IMPROVE-A 协议 (Chow et al, 2007) 的热光碳分析仪 (TOR) 方法确定的, 方法的详细描述见 (Han et al, 2007)。Han et al (2007) 定义焦炭 Char-EC=EC1-POC, Soot-EC=EC2+EC3, EC=EC1+EC2+EC3-POC。

碳分析仪每天都用已知的 CH_4 气体进行校准 (Chow et al, 1993) 每 10 个样品做 1 个重复, 重复样品之间的差异对于 BC、Char-EC 和 Soot-EC 都小于 10%。

1.3 土壤有机碳密度和碳储量估算

(1) 土壤有机碳密度计算模型 (Guo and Gifford, 2002) 如下:

$$C_t = BD \times C_c \% \times D$$

C_t 为土壤碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), $C_c\%$ 为有机碳含量 (%), BD 土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 土壤容重数据取自《青海土壤》(青海省农业资源区划办公室, 1997), D 为土层厚度 (cm)。

土壤有机碳储量计算如下:

$$\text{SOC} = C_t \times S$$

C_t 为土壤碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), S 为各类土壤的面积。

(2) 土壤黑碳密度和黑碳储量也按以上模式计算。

2 结果与讨论

2.1 有机碳和黑碳含量特征

2.1.1 总有机碳

由表 1 可知, 栗钙土的总有机碳含量变化范围为 $5.12 \sim 58.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $34.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。草甸土和草毡土的总有机碳含量变化范围分别为 $17.07 \sim 46.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $30.13 \sim 43.13 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值分别为 $31.40 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $35.18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。就平均值而言, 栗钙土、草甸土和草毡土这三种土壤的总有机碳含量比较接近, 含量较高。这是由于栗钙土牧草生长旺盛, 由于草根以密集的须根群大量渗入土体, 因此其有机质积累很明显, 因而有机碳含量也相当高。草甸土作为湿成土纲的土类, 水分含量高, 有机质含量丰富 (朱鹤健和何宜庚, 1992), 草毡土作为青藏高原的主要土壤类型, 其表层根系交织, 土壤有机质丰富, 粗有机质多 (青海省农业资源区划办公室, 1997), 故而这三种土壤的总有机碳含量都较高。沼泽土由于其有机质积累强烈, 所以有

表 1 青海湖流域六种土类有机碳黑碳含量特征
Table 1 The Characteristic of organic Carbon and black Carbon Content in six types Topsoil

Component		栗钙土	草甸土	风沙土	沼泽土	黑毡土	草毡土
总有机碳 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	范围	5.12~58.59	17.07~46.15	3.97~42.87	21.89~148.70	6.42~31.74	30.13~43.13
	平均值	34.63	31.40	16.43	51.71	20.47	35.18
有机碳 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	范围	6.86~42.35	10.79~30.75	1.97~23.12	10.20~63.52	3.43~20.64	18.99~26.15
	平均值	23.69	18.93	9.46	28.54	12.30	22.11
黑碳 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	范围	0.47~2.80	0.35~7.60	0.21~1.07	1.27~11.33	0.27~1.91	0.78~1.75
	平均值	1.31	2.37	0.54	3.27	0.82	1.18
焦炭 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	范围	0.23~2.63	0.17~7.36	0.05~0.66	1.09~10.83	0.14~1.41	0.55~1.54
	平均值	1.07	2.12	0.34	2.96	0.50	0.95
烟炱 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	范围	0.17~0.30	0.18~0.37	0.10~0.41	0.18~0.51	0.13~0.50	0.22~0.24
	平均值	0.24	0.25	0.20	0.31	0.32	0.23
BC/TOC (%)	范围	0.82~35.97	2.05~16.47	1.06~9.96	4.35~9.25	2.41~6.30	2.57~4.06
	平均值	7.44	6.90	4.38	6.12	4.19	3.26
Charcoal/BC (%)	范围	48.49~94.08	47.72~96.85	23.66~75.05	79.77~95.52	33.01~73.84	70.86~87.67
	平均值	74.34	82.33	58.41	87.19	54.99	78.39
Soot/BC (%)	范围	5.92~51.51	3.15~52.28	24.95~76.34	4.48~20.23	26.16~66.99	12.33~29.14
	平均值	25.66	17.67	41.59	12.81	45.01	21.61

机碳含量最高(朱鹤健和何宜庚, 1992), 其总有机碳变化范围是 $21.89\sim 148.70\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值达到 $51.71\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。风沙土由于其生境条件差, 在风蚀和沙丘搬运和堆积的作用下, 植被生长困难, 植物种类单调, 生长稀疏, 覆盖度低(青海省农业资源区划办公室, 1997), 因而总有机碳含量较低, 其总有机碳变化范围在 $3.97\sim 42.87\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $16.43\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。黑毡土由于其腐殖质累积作用强于风沙土, 所以其总有机碳含量比风沙土高, 但低于沼泽土、草甸土、草毡土和栗钙土, 其总有机碳含量在 $6.42\sim 31.74\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $20.47\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.1.2 有机碳

如表1, 这六种土壤有机碳含量高低与总有机碳含量的高低相似。栗钙土、草毡土、草甸土这三种土壤有机碳含量接近, 它们的变化范围分别为 $6.86\sim 42.35\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $18.99\sim 26.15\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $10.79\sim 30.75\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 它们的均值分别为 $23.69\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $22.11\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $18.93\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。沼泽土有机碳含量还是最高, 其变化范围在 $10.20\sim 63.52\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $28.54\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。风沙土最低, 变化范围在 $1.97\sim 23.12\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $9.46\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.1.3 黑碳

总体来说, 六种土壤的黑碳含量都不高。黑碳含量最高的是沼泽土, 平均值 $3.27\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 变化范围 $1.27\sim 11.33\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。这与有机碳含量的高低是一致的, 说明沼泽土不仅有机碳含量高, 黑碳含量也高。同时这与沼泽土有机质积累程度高是一致的。黑碳含量居第二位的是草甸土, 平均值 $2.37\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 变化范围 $0.35\sim 7.60\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。黑碳含量居第三位的是栗钙土, 平均值 $1.31\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 变化范围 $0.47\sim 2.80\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。草毡土的黑碳含量居第四位, 平均值 $1.18\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 变化范围 $0.78\sim 1.75\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。含量最低的是风沙土, 平均值 $0.54\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 变化范围 $0.21\sim 1.07\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。黑毡土的黑碳含量居第五, 变化范围 $0.27\sim 1.91\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值 $0.82\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。从表1可知, 黑碳含量与总有机碳含量有一定的相关性, 即黑碳含量高的土壤, 总有机碳含量也高(González-Pérez et al, 2004; Czimczik et al, 2003; Siddhartha et al, 2002; Schmidt et al, 1999)。

2.1.4 焦炭和烟炱

由表1可知, 六种土壤焦炭的含量是相当高的, 而烟炱的含量较低。这与其来源是一致的, 因为焦炭为生物质来源而烟炱多为化石燃料来源。青海湖

流域由于处于高寒地带, 工业不发达, 交通不便, 化石燃料来源较少, 主要为生物质燃烧生成的黑碳。焦炭的含量大小排列为: 沼泽土 ($2.96\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 草甸土 ($2.12\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 栗钙土 ($1.07\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 草毡土 ($0.95\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 黑毡土 ($0.50\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$) > 风沙土 ($0.34\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)。烟炱的含量比较接近, 六类土壤平均值为 $0.28\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

2.1.5 BC/TOC、Charcoal/BC 和 Soot/BC

BC/TOC 反映黑碳在总有机碳中所占的比例。由表1可知, 这六种土类 BC/TOC 的值都不高, 基本都在 5% 左右, 说明这六类土壤黑碳在总有机碳中所占的比例都比较低。

Charcoal/BC 用来说明焦炭在黑碳中所占的比例。从表1可得, 这六类土壤中 Charcoal/BC 的比值都很高, 最高的达 87.19% (沼泽土), 最低的也达到 54.99% (黑毡土), 反映了这六类土壤焦炭在黑碳中所占的比例都很高。

Soot/BC 表示烟炱在黑碳中所占的比例。同样从表1中可知, 这六类土壤中 Soot/BC 的值都比较低。最低的只有 12.81% (沼泽土), 最高的是黑毡土 (45.01%)。

2.2 总有机碳、有机碳、黑碳、焦炭和烟炱的相关性

六类土壤中总有机碳和有机碳的相关性都很好(见表2), 说明有机碳是总有机碳的重要组成部分。焦炭和黑碳的相关性极高。最小的(风沙土)也达到 0.970, 草毡土和沼泽土甚至高达 1.00, 说明焦炭是黑碳的主要组成部分, 并且说明二者具有相同的来源。由于焦炭主要是由生物质燃烧生成的, 而这六类土壤的黑碳也多是由生物质燃烧生成的。TOC 与 BC 的相关性除了栗钙土、风沙土不好外, 其余都比较好。这说明在其余四类土壤中 BC 与 TOC 具有相同的来源, 而在风沙土和栗钙土中则可能部分 BC 来源不同于 TOC。烟炱与黑碳的相关性, 只在风沙土(0.793)、沼泽土(0.781)和黑毡土(0.875)相对较高, 说明这三类土壤中烟炱与黑碳具有相同的来源。焦炭和烟炱的相关性只有沼泽土较高, 其余都不好, 可能说明沼泽土中烟炱很大部分来源于生物质燃烧。

2.3 碳储量和黑碳储量

据王绍强和周成虎(1999)研究, 中国陆地生态系统土壤有机碳总量为 $1001.8\times 10^8\text{ t}$, 而本研究所得的青海湖流域六类土壤有机碳储量(如表3所

表2 六类土壤 TOC、OC、BC、Charcoal 和 Soot 的相关性

Table 2 The correlation of TOC、OC、BC、Charcoal and Soot

栗钙土相关性						草甸土相关性				
Types	TOC	OC	BC	Charcoal	Soot	TOC	OC	BC	Charcoal	Soot
TOC	1	0.650*	-0.235	-0.247	0.364	1	0.898**	0.702*	0.687*	0.533
OC		1	-0.54	-0.086	0.611		1	0.510	0.484	0.793**
BC			1	0.999**	-0.623			1	0.999**	0.156
Charcoal				1	-0.655*				1	0.121
Soot					1					1

风沙土相关性						沼泽土相关性				
Types	TOC	OC	BC	Charcoal	Soot	TOC	OC	BC	Charcoal	Soot
TOC	1	0.995**	0.096	0.080	0.110	1	0.958**	0.961**	0.961**	0.733*
OC		1	0.143	0.120	0.160		1	0.915**	0.913**	0.766**
BC			1	0.970**	0.793**			1	1.000**	0.781**
Charcoal				1	0.623				1	0.769**

黑毡土相关性						草毡土相关性				
Types	TOC	OC	BC	Charcoal	Soot	TOC	OC	BC	Charcoal	Soot
TOC	1	0.986**	0.698	0.689	0.624	1	0.989	0.997	0.998*	-0.764
OC		1	0.780	0.784	0.645		1	0.998*	0.997	-0.660
BC			1	0.992**	0.875*			1	1.000**	-0.710
Charcoal				1	0.051				1	0.489
Soot					1					1

* 显著性水平为 0.05 (双尾检验); ** 显著性水平为 0.01 (双尾检验)。

示) 为 119.56×10^6 t。计算可得本研究中六类土壤的碳储量占中国陆地生态系统土壤碳总量的 0.12% (六类土壤总面积为 18416.15 km^2 , 占流域土壤总面积的 78%, 占中国陆地生态系统土壤总面积的 0.19%), 可见青海湖流域土壤有机碳储量是比较大的。有机碳密度最高的是栗钙土达到 $8.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 由于其容重和有机碳含量都比较高, 所以有机碳密度相应就高。这与栗钙土地区牧草生长旺盛有着很大的关系。有机碳密度最低的是黑毡土, 只有 $3.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,

这是由于其容重较小, 只有 $0.89 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 同时其有机碳含量也相对较小 ($20.47 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 导致其有机碳密度低。其余土类的有机碳密度大小依次为: 草甸土 > 沼泽土 > 草毡土 > 风沙土。六类土壤黑碳总储量为 4.36×10^6 t。黑碳密度最大的是草甸土达到 $0.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 这是由于草甸土的容重和黑碳含量都比较高导致的。黑碳密度最小的是黑毡土, 只有 $0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其余土类黑碳密度大小依次为: 沼泽土 > 栗钙土 > 草毡土 > 风沙土。

表3 六类土壤表土有机碳和黑碳储量

Table 3 The storage of organic carbon and black carbon in six types topsoil

土壤类型	面积 * (km^2)	容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	有机碳储量 (10^6 t)	黑碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	黑碳储量 (10^6 t)
栗钙土	2273.05	1.22	8.45	19.21	0.32	0.73
草甸土	332.25	1.27	7.98	2.65	0.60	0.20
风沙土	222.83	1.58	5.19	1.16	0.17	0.04
沼泽土	734.14	0.63	6.51	4.78	0.41	0.30
黑毡土	470.53	0.88	3.60	1.70	0.14	0.07
草毡土	14383.35	0.89	6.26	90.07	0.21	3.02
总计	18416.15			119.56		4.36

* 据刘吉峰和李世杰 (2006)

3 结论

(1) 六类土壤的有机碳含量都比较高, 说明青海湖流域土壤的储碳能力比较强。总体来说, 六种土壤的黑碳含量都不高, 但是焦炭的含量是相当高的, 而烟炱的含量较低。同时, 六类土壤黑碳在总有机碳中所占的比例都比较低, 焦炭在黑碳中所占的比例都很高, 烟炱在黑碳中所占的比例也比较低。

(2) 六类土壤中总有机碳和有机碳的相关性都很好, 说明有机碳是总有机碳的重要组成部分。焦炭和黑碳的相关性极高, 说明焦炭是黑碳的主要组成部分, 并且说明二者具有相同的来源。由于焦炭主要是由生物质燃烧生成的, 故而这六类土壤的黑碳也多是由生物质燃烧生成的。

(3) 六类土壤总面积为 18416.15 km² (占流域土壤总面积的 78%), 有机碳总储量为 119.56×10⁶ t, 黑碳总储量为 4.36×10⁶ t。

参考文献

- 陈庆强, 沈承德, 易惟熙, 等. 1998. 土壤碳循环研究进展 [J]. *地球科学进展*, 13(6): 555-563.
- 金峰, 杨浩, 赵其国. 2000. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展 [J]. *土壤*, 32(1): 11-17.
- 康兴成. 1996. 青藏高原地区近 40 年来气候变化的特征 [J]. *冰川冻土*, 18(增刊): 281-288.
- 李天杰, 宁大同, 薛纪渝, 许嘉琳, 杨居荣编著. 2004. 环境地质学原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 299-313.
- 刘吉峰, 李世杰. 2006. 青海湖流域土壤可蚀性 K 值研究 [J]. *干旱区地理*, 29(3): 321-326.
- 青海省农业资源区划办公室. 1997. 青海土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 299-322.
- 王绍强, 周成虎. 1999. 中国陆地土壤有机碳库估算 [J]. *地理研究*, 18(4): 349-356.
- 于贵瑞. 2003. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 1-460.
- 朱鹤健, 何宜庚. 1992. 土壤地理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 199-209.
- Bohn H L. 1982. Estimate of organic carbon in world soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 46: 1118-1119.
- Chow J C, Watson J G, Chen L-W A, et al. 2007. The IMPROVE_A temperature protocol for thermal/optical carbon analysis: maintaining consistency with a long-term database[J]. *J. Air Waste Manage Assoc*, 57: 1014-1023.
- Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, et al. 1993. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U.S. air quality studies[J]. *Atmos Environ*, 27: 1185-1201.
- Czimczik C I, Preston C M, Schmidt M W I, et al. 2003. How surface fire in Siberian Scots pine forests affects soil organic carbon in the forest floor: Stocks, molecular structure, and conversion to black carbon (charcoal)[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 17: 1020.
- Eswaran H, van Den Berg E, Reich P. 1993. Organic carbon in soils of the world[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 57: 192-194.
- Goldberg E D. 1985. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution[M]. New York: John Wiley.
- González-Pérez J A, González-Vila F J, Almendros G, et al. 2004. The effect of fire on soil organic matter—a review[J]. *Environment International*, 30(6): 855-870.
- Guo L B, Gifford R M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 8: 345-360.
- Han Y M, Cao J J, An Z S, et al. 2007. Evaluation of the thermal/optical reflectance method for quantification of elemental carbon in sediments[J]. *Chemosphere*, 69: 569-574.
- Kuhlbusch T A J. 1998. Black carbon and the carbon cycle[J]. *Science*, 280: 1903-1904.
- Masiello C A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry[J]. *Marine Chemistry*, 92: 201-213.
- Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. 1990. The Global Carbon Cycle[J]. *American Scientist*, 78: 310-326.
- Preston C M, Schmidt M W I. 2006. Black (pyrogenic) carbon: a synthesis of current knowledge and uncertainties with special consideration of boreal regions[J]. *Biogeosciences*, 23(4): 397-420.
- Schmidt M W I, Noack A G. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, Distribution, implication, and current challenges[J]. *Global biogeochemical cycles*, 14(3): 777-793.
- Schmidt M W I, Skjemstad J O, Czimczik C I, et al. 2001. Comparative analysis of black carbon in soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(1): 163-167.
- Schmidt M W I, Skjemstad J O, Gehrt A, et al. 1999. Charred organic carbon in German chernozemic soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 50: 351-365.
- Siddhartha M, Thomas S, Bianchi B A, et al. 2002. Black carbon from the Mississippi river: quantities, sources, and potential implications for the global carbon cycle[J]. *Environmental Science & Technology*, 36(11): 2296-2302.