

# 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布<sup>\*</sup>

田玉强<sup>1,2</sup> 欧阳华<sup>1†</sup> 徐兴良<sup>1</sup> 宋明华<sup>1</sup> 周才平<sup>1</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 采用全国第二次土壤普查数据结合作者的实测数据, 利用 1 100 万土壤数据库对青藏高原土壤有机质层、土壤矿质层及整个剖面的土壤有机碳密度和土壤有机碳储量分别进行了估算。结果表明: 青藏高原的平均土壤有机碳密度约为  $C 7.2 \text{ kg m}^{-2}$ , 较前人的  $C 8.01 \sim 19.05 \text{ kg m}^{-2}$  全国平均土壤有机碳密度偏低。青藏高原总的土壤有机碳储量约为  $18.37 \text{ Pg}$ , 其中有机质层土壤有机碳储量约占 38.14%, 矿质层土壤有机碳储量则占 61.86%。

**关键词** 青藏高原; 土壤有机碳储量; 土壤有机碳密度; 分布

**中图分类号** S153.6; S159.2 **文献标识码** A

土壤是陆地生态系统一切生命的载体。土壤有机碳 (SOC) 库约占整个陆地生态系统碳库的  $2/3$ <sup>[1]</sup>, 约为植物碳库的 3 倍, 大气碳库的 2 倍, 可以说是全球碳循环中最为重要的组成部分<sup>[1~3]</sup>。SOC 库的微小变化都会引起大气中  $\text{CO}_2$  浓度的极大变化<sup>[4,5]</sup>, 因此目前关于 SOC 库的研究已经成为全球气候变化研究的热点问题<sup>[1,6~9]</sup>。

青藏高原平均海拔在 4 000 m 以上, 地域辽阔, 从东往西跨大约 31 个经度, 从南往北跨大约 13 个纬度, 面积约占全国陆地总面积的 26.8%<sup>[10,11]</sup>。高海拔、低温的地理气候特征<sup>[10,11]</sup>使得青藏高原的植被和土壤对全球气候变化显得极为敏感, 因此被称为全球变化研究的“敏感区”。正是这种独特的自然地理环境使得青藏高原在全球变化研究中占有特殊地位, 为研究不同地理、气候条件下的生态系统对全球气候变化的响应机制提供了理想场所。所以该地区一直是全球地学、生态学等科学工作者所关注的热点地区之一。

土壤碳循环研究主要包括两个方面: 一方面是有关土壤碳周转的研究, 另一方面是有关土壤碳储量的研究<sup>[1,6,7]</sup>。由于受到研究手段的限制, 地下土壤碳循环的研究一度发展缓慢。随着全球气候变化的加剧, 科学家们已经充分认识到精确估算地下

SOC 储量的重要意义<sup>[1,6~9]</sup>。然而到目前为止, 关于整个青藏高原的 SOC 储量估算问题一直都没有得到充分重视和详细研究。尽管在全国尺度<sup>[12~22]</sup>和区域尺度上<sup>[23~33]</sup>已经开展了相关研究, 但是就青藏高原这一独特地域单元而言, 该地区的土壤有机碳密度 (SOC<sub>D</sub>) 以及 SOC 储量分布状况仍不是很清楚。对于未来全球变暖是否将对青藏高原的 SOC 储量产生影响, 以及这种影响存在的规模和程度如何等问题的解答, 都亟需我们对青藏高原的 SOC 储量分布进一步做出更为精确的研究。本研究基于青藏高原地区的全国第二次土壤普查数据以及最新的 1 100 万土壤数据库, 结合实测数据对青藏高原 SOC 储量及 SOC<sub>D</sub> 分布进行了较为深入研究, 以期为进一步青藏高原区域尺度的碳循环研究提供数据和支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究中, 土壤数据来自全国第二次土壤普查数据中的青藏高原地区的 283 个典型骨干剖面 (《中国土种志 (5~6 卷)》和《西藏自治区土种志》)<sup>[34,35]</sup>; 土壤容重数据由作者 2004 年 7~8 月沿

<sup>\*</sup> 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3 - SW - 339 - 04)、国家重点基础研究发展规划项目 (2005CB422005) 资助

<sup>†</sup> 通讯作者: E-mail: ohua@igsrr.ac.cn

作者简介: 田玉强 (1974 ~), 男, 山东日照人, 博士研究生, 主要从事陆地生态系统格局与过程研究。E-mail: tyq276811@163.com

收稿日期: 2007 - 01 - 18; 收到修改稿日期: 2007 - 04 - 06

青藏公路采集的 23 个样点 69 个土壤剖面的 312 个土壤样品的实测数据 (待发表) 反演所得; 土种面积数据来自文献 [34, 35], 土壤亚类、土壤类型的面积数据来自最新的 1 100 万土壤数据库 (中国科学院资源环境数据中心提供, 制图基本单元为土壤亚类); 青藏高原的边界范围采用目前应用较多的边界 [36]。

1.2 研究方法

1.2.1 SOCD 的计算 本研究中土种土壤剖面的 SOCD 计算公式 [20] 如下:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n 0.58 \times M_i \times T_i \times \rho_i \times (1 - C_i) / 10 \quad (1)$$

式中, 0.58 为 Bommelen 换算系数; SOCD 为土种的土壤剖面土壤有机碳密度 ( $C \text{ kg m}^{-2}$ );  $M_i$  为第  $i$  层土壤有机质百分含量 (%);  $T_i$  为第  $i$  土层厚度 (cm);  $\rho_i$  为第  $i$  土层土壤容重 ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $C_i$  为第  $i$  层土壤  $> 2 \text{ mm}$  石砾百分含量 (%);  $n$  为土层数目;  $i$  为第  $i$  土层。

1.2.2 土壤容重的计算 全国第二次土壤普查数据 [34, 35] 基本没有包含土壤容重信息, 所以本文中计算土种 SOCD 所需要的土壤容重数据, 全部来自作者于 2004 年 7~8 月实测 312 个土样的 SOC 含量与土壤容重之间建立的函数关系 (图 1)。通过将土壤剖面数据中已有的 SOC 含量代入下式获得土壤容重值。函数关系如下:

$$\rho = 1.4055 \times e^{-0.1039 \times SOC} \quad (2)$$

式中, SOC 为土壤有机碳百分含量 (%), 含义同式

(1),  $R^2 = 0.4435, p < 0.01$ 。

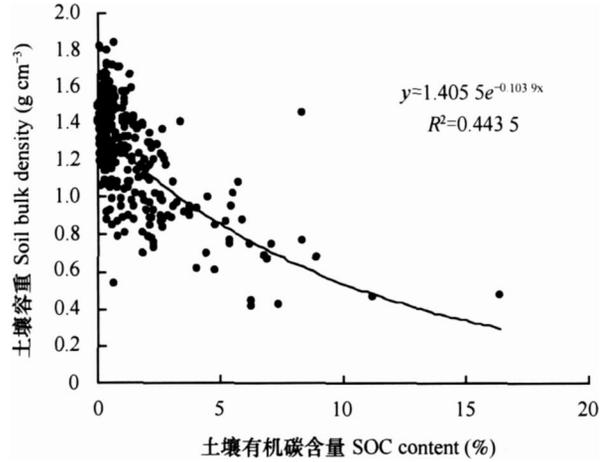


图 1 青藏高原土壤容重与土壤有机碳含量间经验关系  
Fig. 1 Empirical relation between soil bulk density and SOC content

1.2.3 SOC 储量的估算 本研究估算 SOC 储量的具体方法:

首先计算不同土种每个土层的 SOCD, 然后分别计算不同土种有机质层和矿质层的 SOCD, 最后将有机质层和矿质层 SOCD 相加得到土种整个剖面的 SOCD。然后以《中国土种志》和《西藏自治区土种志》上查得的每个土种面积为权重, 求得每个土壤亚类的 SOCD。然后再以从 1 100 万土壤数据库获得的土壤亚类面积为权重求得土类 SOCD。最后再用从 1 100 万土壤数据库上获得的土类面积分别乘以相应土类的 SOCD 即求得整个青藏高原的 SOC 储量。SOCD 计算流程见图 2:



图 2 土壤有机碳密度计算流程图

Fig 2 Flow diagram for calculating soil organic carbon density

本研究在估算青藏高原 SOCD 和 SOC 储量时, 在以下诸方面做了改进:

(1) 缺失土壤容重数据的土壤剖面, 利用作者实测数据建立的函数关系来获得土壤容重值。

(2) 土壤图是最新 1 100 万土壤数据库, 精度较以前学者使用的 1 400 万土壤图有显著增高。

(3) 采用目前青藏高原研究中应用较多的边界

范围 [36] 作为青藏高原边界, 较以前更为明确。

(4) 按发生层将土壤剖面分成有机质层 (A 层) 和矿质层 (B + C 层) 分别计算 SOCD, 然后将两者累加得到整个剖面 (A + B + C 层) SOCD。

(5) 估算 SOC 储量时, 将城区、岩石、湖泊、水库、江河、内沙、冰川雪被等  $11.54 \times 10^6 \text{ hm}^2$  非土壤类型地域扣除在估算范围以外。

## 2 结果与讨论

### 2.1 青藏高原土壤有机碳密度的分布特征

青藏高原自然地域类型复杂多样,不同地域

间的水热条件差异极大,土壤发育多种多样<sup>[37,38]</sup>。根据作者查阅的有效土壤剖面资料<sup>[34,35]</sup>,结合1 100万土壤数据库统计得出:青藏高原地区共分布有12个土纲,45个土类和136个土壤亚类(图3,表1)。

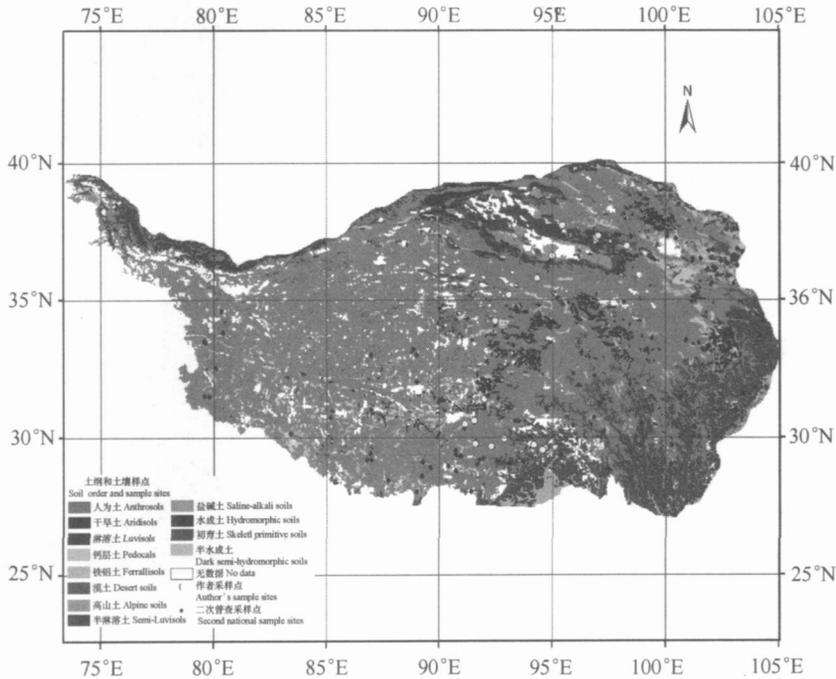


图 3 青藏高原土纲及土壤样点分布图

Fig. 3 Distribution of soil orders and soil sample sites on the Qinghai - Tibet Plateau

图 3中的土壤样点包括作者查阅相关资料<sup>[34,35]</sup>获得的有效土壤剖面以及作者 2004年采集的土壤剖面。青藏高原地区,高山土纲的分布面积最大,达到  $185.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,是青藏高原的一个特有土纲。淋溶土纲和初育土纲分布面积次之,面积分别为  $16.54 \times 10^6$ 和  $13.62 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,淋溶土纲分布在青藏高原东南及东部地区,初育土纲呈斑块状分布在整个高原上。人为土纲分布面积最小,只有  $0.69 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,大都分布在青藏高原东部人类活动密集的地区(图 3)。

就分布在整个青藏高原地区的 136个土壤亚类的 SOCD分布范围而言,有机质层 SOCD主要介于  $C 0.13 \sim 16.98 \text{ kg m}^{-2}$ 之间;矿质层 SOCD主要介于  $C 0.29 \sim 29.53 \text{ kg m}^{-2}$ 之间;整个剖面 SOCD主要介于  $C 0.44 \sim 34.03 \text{ kg m}^{-2}$ 之间。有机质层频数最大的 SOCD大都集中分布在  $C 1 \sim 5 \text{ kg m}^{-2}$ 之间;矿质层频数最大的 SOCD大都分布在  $C 2 \sim 10 \text{ kg m}^{-2}$ 之间;整个剖面内频数最大的 SOCD大都

集中分布在  $C 1 \sim 19 \text{ kg m}^{-2}$ 之间(图 4)。

就有机质层土类的 SOCD高低而言,SOCD最高的是山地草甸土土类的  $C 17.0 \text{ kg m}^{-2}$ ,其次是黑土、石灰(岩)土、黑钙土、黑毡土、灰褐土和棕色针叶林土等,SOCD大都高于  $C 5.50 \text{ kg m}^{-2}$ ;而有机质层 SOCD最低的土类依次是灰棕漠土、冷漠土、风沙土、寒漠土和漠境盐土等,大都低于  $C 0.55 \text{ kg m}^{-2}$ (表 1)。

就有机质层 SOCD的水平分布而言,SOCD高于  $C 4.00 \text{ kg m}^{-2}$ 的土类大都分布在青藏高原东南部(图 5a),该地区降水较多,植被生物量较高,气温常年较低,有利于 SOC的累积。而 SOCD较低的土类多分布在青藏高原的西北荒漠地带<sup>[39]</sup>(图 5a)。荒漠地带降水少<sup>(1)</sup>,不适宜植被生长,植被生物量少,地上凋落物输入少<sup>[39]</sup>,土壤中 SOC累积较少,导致 SOCD偏低。有机质层的 SOCD分布总体上符合高原降水由东南向西北逐渐减少的规律<sup>(1)</sup>。

矿质层 SOCD较高的土类多分布在青藏高原北

(1)马林. 青藏高原降水概况. 1960

部的环青海湖地区、中部的三江源地区、东部的若尔盖沼泽湿地地区、唐古拉山脉以南环内陆湖的周围地带以及藏东南的山地针叶林地带(图 5b)。这些地域的水分条件较好,多有湿地和沼泽等植被分布,譬如沼泽化草甸<sup>[39]</sup>,植被生存环境常年渍水,加上低温,极不利于土壤有机质的分解,因此发育在该环境内的沼泽土、泥炭土和黑土等 SOC<sub>D</sub>就特别高;分布于青藏高原东南部的漂灰土、棕色针叶林土以及黄棕壤等土类的 SOC<sub>D</sub>,由于地上生物量输入较高,降水较多而使得 SOC<sub>D</sub>同样偏高。而 SOC<sub>D</sub>较低的土类多分布在高原西北部的荒漠地带<sup>[39]</sup>,譬如柴达木地区、阿里地区等,以及高原西部的边缘地带(图 5b)。这些地域降水稀少,植被生长较差,造成土壤有机质输入偏少,是其 SOC<sub>D</sub>较低的主要原因。

整个剖面内, SOC<sub>D</sub>最高的土类是黑土,达到  $C\ 31.3\ kg\ m^{-2}$ ,其次是漂灰土、泥炭土、棕色针叶林土、山地草甸土和沼泽土等,大都高于  $C\ 21.0\ kg\ m^{-2}$ ;而 SOC<sub>D</sub>较低的土类依次为灰棕漠土、棕漠土、风沙土、冷漠土和漠境盐土,大都在  $C\ 1.30\ kg\ m^{-2}$  以下,而漠境盐土 SOC<sub>D</sub> 仅有  $C\ 0.73\ kg\ m^{-2}$ ,为青藏高原地区最低(表 1)。SOC<sub>D</sub>较高的土类多分布在青藏高原北部的环青海湖地带、东部的若尔盖沼泽湿地地带、中部的三江源地区,唐古拉山脉以南湖泊分布较多的地区以及藏东南降水丰沛的森林地带(图 5c)。而 SOC<sub>D</sub>较低的土类多分布在青藏高原西部以及西北部的荒漠地带(图 5c)。降水稀少,植被覆盖度低,生物量低下,是该地区 SOC<sub>D</sub>较低的主要原因。青藏高原整个剖面的 SOC<sub>D</sub>总体上由东南向西北逐渐减少(图 5c),与该区降水从东南向西北减少的趋势相同<sup>(1)</sup>,植被也由森林、灌丛、草甸、草原向荒漠过渡<sup>[39]</sup>。

## 2.2 青藏高原土壤有机碳储量

在有机质层中,草毡土土类的 SOC 储量最高,达到  $209.4 \times 10^{10}\ kg$ ,其  $45.71 \times 10^6\ km^2$  的分布面积是其 SOC 储量最高的主要原因。黑毡土土类的碳储量为  $130.1 \times 10^{10}\ kg$ ,分布面积为  $22.05 \times 10^6\ km^2$ ,其 SOC 储量仅次于草毡土土类而居第二位;其次是寒钙土土类,为  $121.9 \times 10^{10}\ kg$ 。而该层 SOC 储量较低的土类依次是冷漠土、漠境盐土、漂灰土和林灌草甸土等,其中林灌草甸土土类的 SOC 储量最低,仅为  $0.01 \times 10^{10}\ kg$ (表 1)。

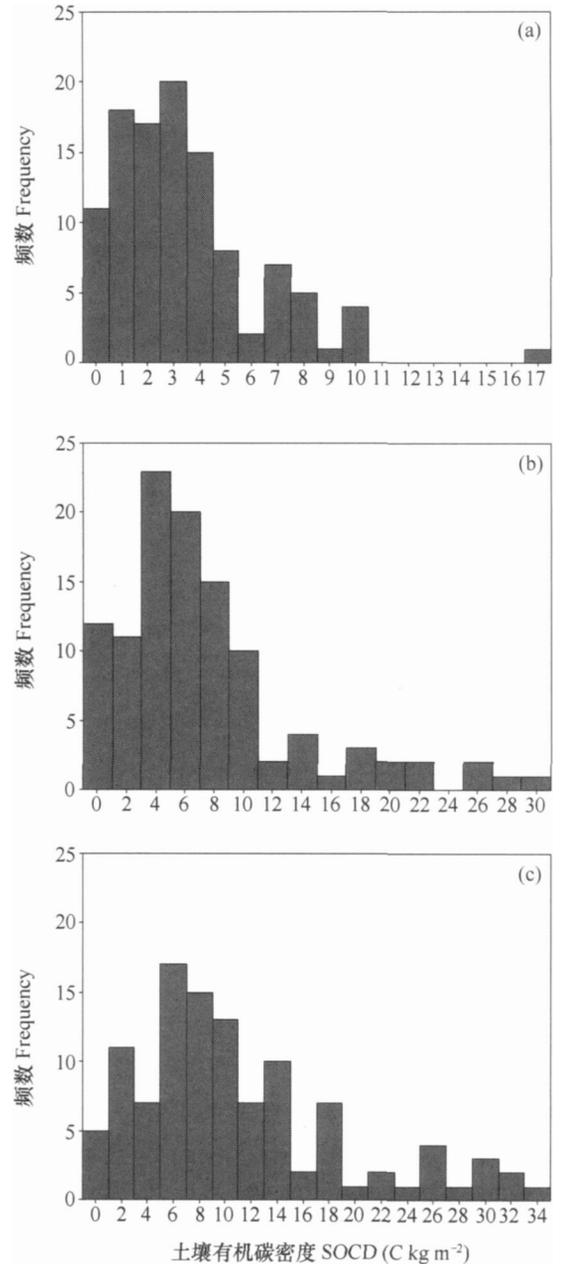


图 4 136个土壤亚类的土壤有机碳密度频数分布

Fig. 4 Frequency distribution of soil organic carbon densities in 136 soil subgroups

(a)有机质层 Organic horizon; (b)矿质层 Mineral horizon;  
(c)剖面 Whole profile

在矿质层中, SOC 储量最高的土类是草毡土,储量达到  $250.0 \times 10^{10}\ kg$ ,寒钙土土类以  $244.2 \times 10^{10}\ kg$  的储量居第二位,黑毡土土类的储量为  $104.3 \times 10^{10}\ kg$ 居第三位; SOC 储量较少的土类依次为山地草甸土、灰漠土、冷漠土、红黏土和林灌草甸土等,其中林灌草甸土土类的 SOC 储量只有  $0.02 \times 10^{10}\ kg$ ,为该层 SOC 储量最低值。

表 1 青藏高原土壤有机碳密度及有机碳储量估算

Table 1 Estimates of soil organic carbon density and storage on the Qinghai-Tibet Plateau

土类 Soil group	亚类数 Subgroup number	剖面数 Profile number	面积 Area (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	土壤有机碳密度 SOCD (C kg m <sup>-2</sup> )			土壤有机碳储量 SOC storage (10 <sup>10</sup> kg)		
				有机质层 Organic horizon	矿物质层 Mineral horizon	剖面 Profile	有机质层 Organic horizon	矿物质层 Mineral horizon	剖面 Profile
棕色针叶林土	2	2	1.73	5.67	20.73	26.40	9.78	35.80	45.58
漂灰土	1	1	0.01	2.67	27.60	30.27	0.03	0.29	0.32
黄棕壤	3	5	2.39	4.83	10.53	15.36	11.54	25.18	36.72
棕壤	3	4	4.50	2.87	5.45	8.32	12.91	24.50	37.41
暗棕壤	4	8	7.87	4.33	9.03	13.36	34.12	71.06	105.2
褐土	5	9	2.90	2.93	7.21	10.14	8.48	20.87	29.35
灰褐土	4	9	2.91	5.88	13.73	19.61	17.10	39.90	57.00
黑土	2	2	0.14	9.78	21.51	31.29	1.34	2.94	4.28
黑钙土	4	7	0.96	6.13	11.77	17.90	5.88	11.28	17.16
栗钙土	5	23	3.63	3.31	9.50	12.80	12.01	34.48	46.49
黑垆土 <sup>(11)</sup>	1	4	0.13	2.96	9.64	12.60	0.40	1.30	1.70
棕钙土 <sup>(12)</sup>	4	6	5.29	0.72	3.59	4.31	3.83	18.99	22.82
灰钙土 <sup>(13)</sup>	4	10	0.60	2.21	4.78	6.99	1.32	2.87	4.19
灰漠土 <sup>(14)</sup>	2	3	0.03	6.32	5.54	3.16	0.20	0.17	0.37
灰棕漠土 <sup>(15)</sup>	4	7	4.76	0.54	0.72	1.26	2.57	3.44	6.01
棕漠土 <sup>(16)</sup>	4	4	1.66	0.56	0.60	1.16	0.92	1.00	1.92
黄绵土 <sup>(17)</sup>	1	1	0.14	0.95	4.87	5.82	0.14	0.69	0.83
红黏土 <sup>(18)</sup>	1	1	0.04	3.00	2.50	5.50	0.13	0.11	0.24
新积土 <sup>(19)</sup>	2	10	0.75	2.07	4.85	6.92	1.56	3.66	5.22
风沙土 <sup>(20)</sup>	3	10	4.41	0.25	0.86	1.11	1.11	3.80	4.91
石灰(岩)土 <sup>(21)</sup>	5	5	0.28	7.17	11.84	19.01	2.01	3.33	5.34
紫色土 <sup>(22)</sup>	4	4	0.21	1.66	2.14	3.80	0.35	0.45	0.80
草甸土 <sup>(23)</sup>	5	20	4.24	5.08	6.01	11.09	21.53	25.47	47.0
山地草甸土 <sup>(24)</sup>	2	2	0.03	16.98	6.97	23.95	0.48	0.20	0.68
林灌草甸土 <sup>(25)</sup>	1	1	0.01	1.83	3.69	5.52	0.01	0.02	0.03
潮土 <sup>(26)</sup>	4	4	0.11	2.58	5.84	8.42	0.28	0.63	0.91
沼泽土 <sup>(27)</sup>	5	8	4.68	4.30	17.57	21.86	20.12	82.22	102.3
泥炭土 <sup>(28)</sup>	2	2	0.36	2.76	26.94	29.70	1.00	9.80	10.80
草甸盐土 <sup>(29)</sup>	4	4	2.23	1.34	5.66	7.01	2.99	12.61	15.60
漠境盐土 <sup>(30)</sup>	1	1	0.58	0.13	0.60	0.73	0.08	0.35	0.43
寒原盐土 <sup>(31)</sup>	3	4	0.90	0.81	2.69	3.49	0.73	2.43	3.16
水稻土 <sup>(32)</sup>	6	8	0.17	2.84	4.33	7.17	0.50	0.76	1.26
灌淤土 <sup>(33)</sup>	2	7	0.09	2.69	10.38	13.07	0.25	0.98	1.23
灌漠土 <sup>(34)</sup>	4	4	0.42	2.55	5.39	7.94	1.08	2.29	3.37
草毡土 <sup>(35)</sup>	4	19	45.71	4.58	5.47	10.05	209.4	250.0	459.3
黑毡土 <sup>(36)</sup>	4	16	22.05	5.90	4.75	10.65	130.1	104.8	234.9
寒钙土 <sup>(37)</sup>	4	9	73.05	1.67	3.34	5.01	121.9	244.2	366.1
冷钙土 <sup>(38)</sup>	4	13	12.53	1.54	3.81	5.35	19.29	47.77	67.06
冷棕钙土 <sup>(39)</sup>	2	15	0.84	2.40	5.84	8.23	2.01	4.90	6.91
寒漠土 <sup>(40)</sup>	1	1	2.66	0.21	1.68	1.89	0.57	4.46	5.03
冷漠土 <sup>(41)</sup>	1	1	0.28	0.46	0.52	0.97	0.13	0.14	0.27
寒冻土 <sup>(42)</sup>	1	1	28.06	1.13	0.86	1.99	31.65	24.26	55.91
砖红壤 <sup>(43)</sup>	1	1	0.25	5.30	9.39	14.70	1.33	2.36	3.69
红壤 <sup>(44)</sup>	5	5	0.34	4.45	8.92	13.37	1.53	3.08	4.61
黄壤 <sup>(45)</sup>	2	2	1.65	3.70	3.99	7.69	6.10	6.58	12.68
总计 Total	136	283	255.1				700.7	1136	1837

注:赤红壤、石质土、燥红土、黄褐土、粗骨土等土类缺乏典型剖面数据,故未包含在本研究中。Note: Brown coniferous forest soils, Brown earths, Yellow-brown earths, Brown earths, Dark-brown earths, Cinnamon soils, Grey-cinnamon soils, Black soils, Chemozems, Castanozems, (11)Dark loessial soils, (12)Brown pedocals, (13)Sierozems, (14)Gray desert soils, (15)Gray-brown desert soils, (16)Brown desert soils, (17)Cultivated loessial soils, (18)Red clay soils, (19)Alluvial soils, (20)Aeolian soils, (21)Limestone soils, (22)Purple soils, (23)Meadow soils, (24)Mountain meadow soils, (25)Shrub-by meadow soils, (26)Fluvo-aquic soils, (27)Bog soils, (28)Peat soils, (29)Meadow solonchaks, (30)Desert solonchaks, (31)Frigid plateau solonchaks, (32)Paddy soils, (33)Cumulated irrigated soils, (34)Irrigated desert soils, (35)Felly soils, (36)Dark felly soils, (37)Frigid calcic soils, (38)Cold calcic soils, (39)Cold brown calcic soils, (40)Frigid desert soils, (41)Cold desert soils, (42)Frigid frozen soils, (43)Latols, (44)Red earths, (45)Yellow earths. The soil Groups of Lateritic red earths and Litho soils and Torrid red soils and Yellow-cinnamon soils and Skeletal soils are not included in this study for lack of soil profiles.

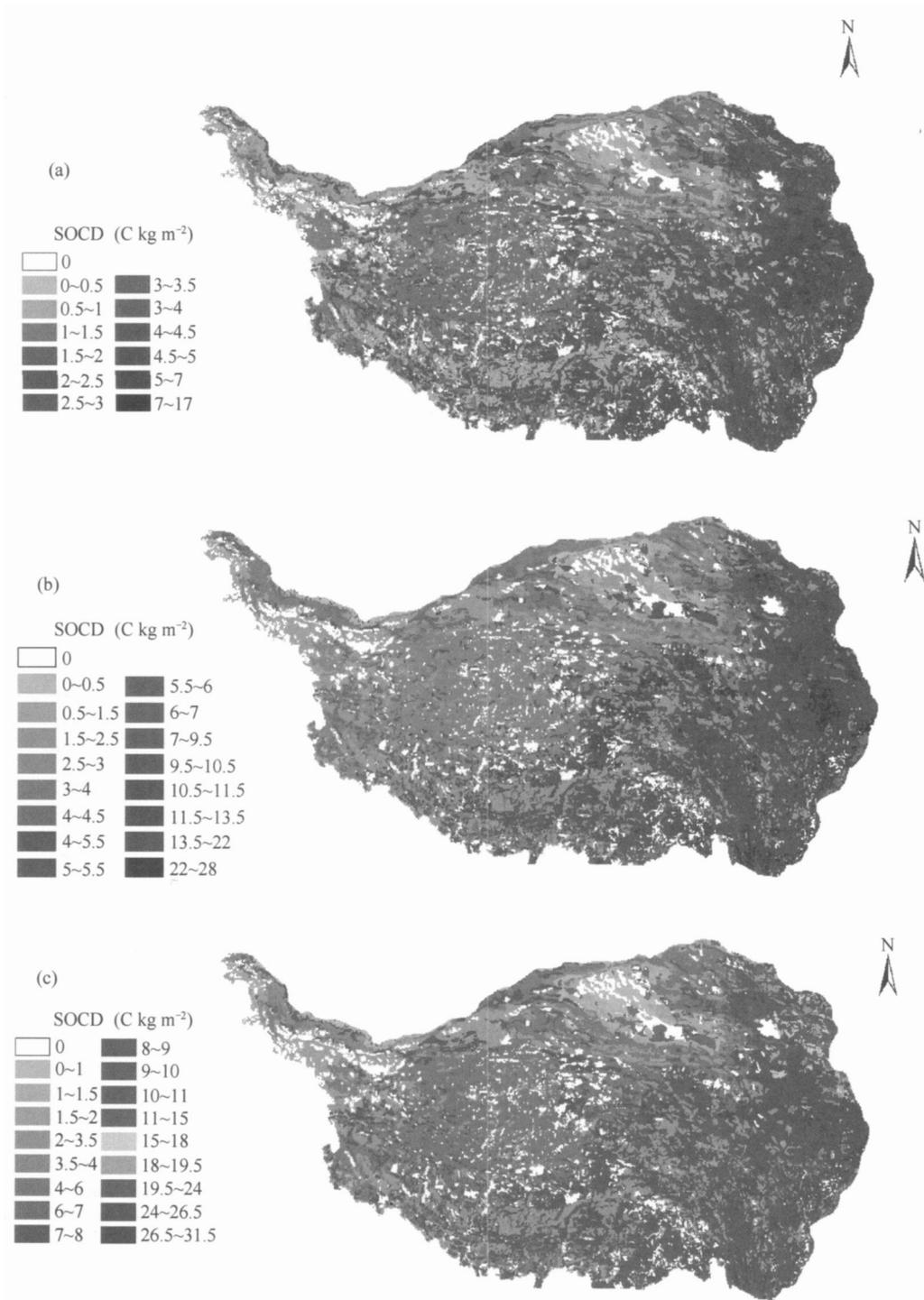


图 5 青藏高原土壤有机碳密度空间分布图

Fig 5 Spatial distribution of soil organic carbon densities on the Qinghai-Tibet Plateau

(a)有机质层 Organic horizon; (b)矿质层 Mineral horizon; (c)剖面 Whole profile

从整个剖面来看，SOC储量最大的土类为草毡土，高达  $459 \times 10^{10}$  kg，寒钙土和黑毡土土类的储量分别为  $366.1 \times 10^{10}$  kg和  $234.9 \times 10^{10}$  kg，居第二和第三位；林灌草甸土土类的碳储量最少，仅为  $0.03 \times 10^{10}$  kg(表 1)。

整个青藏高原有机质层所有土类 SOC储量累加起来为有机质层的总 SOC储量，约为 7.01 Pg，矿质层中所有土类的 SOC储量累加起来为矿质层的总 SOC储量，约为 11.36 Pg，青藏高原总 SOC储量是有机质层和矿质层 SOC储量的总和，约为

18.37 Pg,其中有机质层 SOC储量约占总 SOC储量的 38.14%,而矿质层 SOC储量约占总 SOC储量的 61.86%。

### 2.3 与已有研究结果的比较

受研究手段的限制,目前土壤仍然是陆地碳循环研究中最不充分的部分,关于 SOC储量的估算误差也较大。不同学者由于所采用数据的来源、样本容量、土壤属性,以及所采用土壤图比例尺、土壤深度标准和估算方法等存在不同<sup>[40~42]</sup>,常常致使估算结果存在明显的差异,进而导致不确定性的出现。例如,国内学者利用全国土壤普查数据估算全国 SOC储量约在 28.6~185.7 Pg之间<sup>[12~22]</sup>,而利用模型估算全国 SOC储量约为 82.7~119.8 Pg<sup>[14,15]</sup>,可见这种估算不确定性的存在。

迄今为止,从未有过关于整个青藏高原 SOC储量估算的专门研究。大都仅局限于在全国尺度上对青藏高原 SOC储量的粗略估算<sup>[12,20]</sup>,或仅局限于青藏高原某一植被类型<sup>[31,32]</sup>或和某一区域<sup>[33]</sup>的估算。方精云等<sup>[12]</sup>在对全国碳储量的估算中,将青藏高原 SOC储量大约估算为 38.40 Pg;而吴海滨等<sup>[20]</sup>估算全国 SOC储量时,利用气候带范围粗略将青藏高原 SOC储量估算为 19.23 Pg。在某一植被类型内,王根绪等<sup>[32]</sup>将青藏高原草地 SOC储量估算为 33.5 Pg,同时将青藏高原 SOC储量粗略估算为 49.00 Pg;陶贞等<sup>[31]</sup>利用 4 个典型高寒草甸土壤剖面,将青藏高原高寒草甸 SOC储量估算为 21.52 Pg,而本研究青藏高原 SOC储量 18.37 Pg的估算结果除了跟吴海滨等<sup>[20]</sup>的估算非常接近外,均低于其他结果;青藏高原平均 SOC D C 7.20 kg m<sup>-2</sup>的估算值,较 C 8.01~19.05 kg m<sup>-2</sup>的全国 SOC D 值偏低<sup>[12,14~22]</sup>。尽管青藏高原占国土面积近 1/4,但是该区内大面积的无植被荒漠地带是导致其 SOC D 较全国水平偏低的主要原因<sup>[20,39]</sup>。另外,还有以下原因造成本研究的估算偏低:

1)计算 SOC D 时,土壤容重值是由作者实测土壤容重与 SOC含量的回归关系反演得到的。根据回归方程,SOC含量跟土壤容重呈负相关(式(2)),表层 SOC含量高的土层,土壤容重值就偏低。而前人的估算采用固定的 1.4 g m<sup>-3</sup>容重值<sup>[16]</sup>以及采用土类平均容重值<sup>[18,19,22]</sup>等都会高估表层 SOC含量较高土层的土壤容重值,而造成前人的估算偏高。

2)本研究 SOC D 的计算流程与前人不同:首先计算土种的 SOC D,然后用面积加权计算获得土壤亚类、土类的 SOC D,利用土类 SOC D 乘以其分布面

积计算得到青藏高原 SOC储量。不同于以前的研究<sup>[18,19,22]</sup>采用土壤亚类或土类平均 SOC含量、平均土壤容重以及平均土壤厚度等指标来估算 SOC储量。

3)本研究估算 SOC储量时,采用的青藏高原范围较以前更为明确<sup>[36]</sup>。范围不同所包含的土壤亚类、土类以及土壤剖面数目存在差别,估算结果就会有差异。

4)计算土壤 SOC D 时,本研究采用按发生层的土壤剖面实际深度。而以前的研究<sup>[12,18,19,22]</sup>多采用土壤剖面的平均深度或统一的延伸深度等。

尽管估算结果之间还存在一定的差别,但是依据本研究青藏高原 SOC储量至少在 18.00 Pg以上。若以全球 SOC储量 1 500 Pg<sup>[7]</sup>为标准,本研究的青藏高原 SOC储量约占全球陆地生态系统 SOC储量的 1.22%;若以吴海滨等<sup>[20]</sup>估算全国 70.31 Pg的 SOC储量为标准,那么青藏高原 SOC储量约占全国 SOC储量的 26.13%。这个比例很清晰地表明青藏高原 SOC储量在全球和区域尺度碳循环研究中的重要地位。

低温下土壤呼吸对温度具有更高的敏感性<sup>[43,44]</sup>;全球变暖,储存在高寒区域的 SOC较温暖区域的 SOC更容易丢失<sup>[45,46]</sup>。青藏高原低温的气候特征及其巨大的 SOC储量,尤其是该区有机质层 SOC储量约占全国总有机质层 SOC储量的 21.54%<sup>[20]</sup>,再加上其对气候变化的极度敏感性,这些都是该区土壤碳循环研究在未来全球变化研究中重要地位的体现。

所以在将来的碳循环研究中,一方面必须关注该区 SOC库对全球变暖的响应;另一方面,由于本研究仅对青藏高原 SOC储量做了初步估算,并未考虑冻土中所储存的大量 SOC,而青藏高原分布有大量的多年冻土,全球变暖极有可能引起多年冻土中活性有机质的加速分解。因此未来该区碳循环研究,必须加强对冻土的关注。

## 3 结 论

1)有机质层内,SOC D 最高的土类是山地草甸土,最低的是漠境盐土;矿质层内,SOC D 最高的土类是漂灰土,最低的是冷漠土;整个剖面内,SOC D 最高的土类是黑土,最低的是漠境盐土。整个青藏高原地区内,高 SOC D 多分布在降水较多的地域,而干旱的荒漠地带则 SOC D 较低。

2)青藏高原 SOC 储量最高的土类依次是草毡土、寒钙土和黑毡土;而 SOC 储量最低的土类是林灌草甸土。土类的分布面积是影响其 SOC 储量分布的重要因素。

3)青藏高原平均 SOCD 约为  $C 7.20 \text{ kg m}^{-2}$ , 较前人  $C 8.01 \sim 19.05 \text{ kg m}^{-2}$  的全国 SOCD 偏低。青藏高原总 SOC 储量约为 18.37 Pg, 其中有机质层 SOC 储量约占总储量的 38.14%, 达到 7.01 Pg; 而矿质层 SOC 储量则占总 SOC 储量的 61.86%, 约为 11.36 Pg

## 参考文献

- [ 1 ] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soil Nature, 1990, 348: 232 ~ 234
- [ 2 ] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al* Soil carbon pools and life zones Nature, 1982, 298: 156 ~ 159
- [ 3 ] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, *et al* The global carbon cycle American Scientist, 1990, 78: 310 ~ 326
- [ 4 ] Amundson R. The carbon budget in soils Annual Review Earth Planetary Science, 2001, 29: 535 ~ 562
- [ 5 ] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems—A soil science perspective Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 104: 399 ~ 417
- [ 6 ] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soil of the world European Journal of Soil Science, 1996, 47: 151 ~ 163
- [ 7 ] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 1 118 ~ 1 119
- [ 8 ] Buringh P. Organic carbon in soil of the world *In*: Woodwell G W, ed The Role of Terrestrial Vegetation in the Global Carbon Cycle: Measurement by Remote Sensing Wiley, U K SCOPE, 1984. 9 ~ 109
- [ 9 ] Eswaran H E, van den Berg E V, Reich P. Organic carbon in soil of the world Soil Science Society of America Journal, 1993, 57: 192 ~ 194
- [ 10 ] 李炳元. 青藏高原的范围. 地理研究, 1987, 6(3): 57 ~ 63. Li B Y. The boundary and area of the Tibetan Plateau in China ( In Chinese). Geographical Research, 1987, 6(3): 57 ~ 63
- [ 11 ] 张锦锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1 ~ 8. Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China ( In Chinese). Geographical Research, 2002, 21(1): 1 ~ 8
- [ 12 ] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库. 见: 王庚辰, 温玉璞主编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 109 ~ 128. Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Carbon pool of terrestrial ecosystem in China. *In*: Wang G C, Wen Y P. eds Monitoring of Greenhouse Gas Concentration and Emission and Relevant Processes ( In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 1996. 109 ~ 128
- [ 13 ] 康德梦, 张孟威, 陈利定. 中国环境中碳、氮元素变化与大气温室效应的系统分析. 见: 叶笃正, 陈泮勤主编. 中国的全球变化与研究. 北京: 地震出版社, 1992. 225 ~ 229. Kang D M, Zhang M W, Chen L D. The systematic analysis of atmospheric warming effect and the carbon and nitrogen elements varying in environment of China. *In*: Ye D Z, Chen P Q. eds The Study of Global Change in China ( In Chinese). Beijing: Earthquake Press, 1992. 225 ~ 229
- [ 14 ] 李可让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学 (D辑), 2003, 33(1): 72 ~ 80. Li K R, Wang S Q, Cao M K. The carbon storage in vegetation and soil of China ( In Chinese). Science in China (Series D), 2003, 33(1): 72 ~ 80
- [ 15 ] Ni J. Carbon storage in terrestrial ecosystems of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. Climate Change, 2001, 49: 339 ~ 358
- [ 16 ] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. 科技通报, 1999, 15(5): 330 ~ 332. Pan G X. Study on carbon reservoir in soils of China ( In Chinese). Bulletin of Science and Technology, 1999, 15(5): 330 ~ 332
- [ 17 ] 王绍强, 周成虎, 李可让, 等. 中国土壤有机碳库及其空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55(5): 533 ~ 544. Wang S Q, Zhou C H, Li K R, *et al* Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China ( In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2000, 55(5): 533 ~ 544
- [ 18 ] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理研究, 1999, 18(3): 238 ~ 244. Wang S Q, Zhou C H, Luo C W. Studying carbon storage spatial distribution of terrestrial natural vegetation in China ( In Chinese). Geographic Research, 1999, 18(3): 238 ~ 244
- [ 19 ] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算. 地理研究, 1999, 18(4): 349 ~ 356. Wang S Q, Zhou C H. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China ( In Chinese). Geographic Research, 1999, 18(4): 349 ~ 356
- [ 20 ] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China Global Biogeochemical Cycle, 2003, 17(2): 1 ~ 11
- [ 21 ] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2 279 ~ 2 283. Yu D S, Shi X Z, Sun W X, *et al* Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1 1 000 000 soil database ( In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2 279 ~ 2 283
- [ 22 ] 周成虎, 周启鸣, 王绍强. 中国土壤有机碳空间分布的分析与估算. 人类环境杂志, 2003, 32(1): 6 ~ 12. Zhou C H, Zhou Q M, Wang S Q. Estimating and analyzing the spatial distribution of soil organic carbon in China ( In Chinese). Ambio, 2003, 32(1): 6 ~ 12
- [ 23 ] 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征. 应用生态学报, 2003, 14(5): 699 ~ 704. Chen Q M, Wang S Q, Yu G R. Characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia ( In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 699 ~ 704
- [ 24 ] Cheng X F, Shi X Z, Yu D S, *et al* Using GIS spatial distribution to Predict soil organic carbon in subtropical China Pedosphere, 2004, 14(4): 425 ~ 431

- [25] 甘海华,吴顺辉,范秀丹. 广东土壤有机碳储量及空间分布特征. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1 499 ~ 1 502. Gan H H, Wu S H, Fan X D. Reserves and spatial distribution characteristics of soil organic carbon in Guangdong Province ( In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1 499 ~ 1 502
- [26] 李忠,孙波,赵其国. 我国东部土壤有机碳的密度和储量. 农业环境保护, 2001, 20(6): 385 ~ 389. Li Z, Sun B, Zhao Q G. Density and storage of soil organic carbon in East China ( In Chinese). Agro-Environmental Protection, 2001, 20(6): 385 ~ 389
- [27] 刘国华,傅伯杰,吴钢,等. 环渤海地区土壤有机碳库及其空间分布格局的研究. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1 489 ~ 1 493. Liu G H, Fu B J, Wu G, *et al* Soil organic carbon pool and its spatial distribution patten in the Circum Bohai Region ( In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(9): 1 489 ~ 1 493
- [28] 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. 土壤学报, 2004, 41(2): 298 ~ 300. Sun W X, Shi X Z, Yu D S, *et al* Estimation of soil organic carbon density and storage of Northern East China ( In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 298 ~ 300
- [29] 孙维侠,史学正,于东升. 土壤有机碳的剖面分布特征及其密度的估算方法研究. 土壤, 2003, 35(3): 236 ~ 241. Sun W X, Shi X Z, Yu D S. Distribution patten and density calculation of soil organic carbon in profile ( In Chinese). Soils, 2003, 35(3): 236 ~ 241
- [30] 孙维侠,史学正,于东升,等. 基于 1 100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究——以中国东北三省为例. 地理科学, 2004, 24(5): 568 ~ 572. Sun W X, Shi X Z, Yu D S, *et al* Estimation of soil organic carbon storage based on 1:1M soil database of China—A case in Northeast China ( In Chinese). Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(5): 568 ~ 572
- [31] 陶贞,沈承德,高全洲,等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. 地理学报, 2006, 61(7): 720 ~ 728. Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, *et al* Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau ( In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2006, 61(7): 720 ~ 728
- [32] 王根绪,程国栋,沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693 ~ 700. Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Soil organic carbon pool of grassland on the Tibetan Plateau and its global implication ( In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 693 ~ 700
- [33] 曾永年,冯兆东,曹广超,等. 黄河源区高寒草地土壤有机碳储量及其分布特征. 地理学报, 2004, 59(4): 497 ~ 504. Zeng Y N, Feng Z D, Cao G C, *et al* The soil organic carbon storage and its spatial distribution of alpine grassland in the source region of the Yellow River ( In Chinese). Acta Geographica Sinica, 2004, 59(4): 497 ~ 504
- [34] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(5~6卷). 北京: 中国农业出版社, 1995. National Soil Survey Office. Chinese Soil Genus Records (Volume 5 ~ Volume 6) ( In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1995
- [35] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土种志. 北京: 科学出版社, 1994. Bureau of Land Administration of Tibet Autonomous Region. Soil Type Records in Tibet Autonomous Region ( In Chinese). Beijing: Science Press, 1994
- [36] 中国科学院地理研究所主编. 青藏高原地图集. 北京: 科学出版社, 1990. Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences ed The Atlas of Tibetan Plateau ( In Chinese). Beijing: Science Press, 1990
- [37] 郑度,张荣祖,杨勤业. 试论青藏高原的自然地带. 地理学报, 1979, 34(1): 1 ~ 11. Zheng D, Zhang R Z, Yang Q Y. On the natural zone in the Qinghai-Xizang Plateau ( In Chinese). Acta Geographica Sinica, 1979, 34(1): 1 ~ 11
- [38] 郑度. 青藏高原自然地域系统研究. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 336 ~ 341. Zheng D. The study of the natural zone system on the Tibetan Plateau ( In Chinese). Science in China (Series D), 1996, 26(4): 336 ~ 341
- [39] 中国科学院植物研究所, 中国科学院长春地理研究所主编. 西藏植被. 北京: 科学出版社, 1988. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Institute of Changchun Geography, Chinese Academy of Sciences eds The Vegetation on the Tibetan Plateau ( In Chinese). Beijing: Science Press, 1988
- [40] 金峰,杨浩,蔡祖聪,等. 土壤有机碳密度及贮量的统计研究. 土壤学报, 2001, 38(4): 522 ~ 528. Jin F, Yang H, Cai Z C, *et al* Calculation of density and reservoir of organic carbon in soils ( In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(4): 522 ~ 528
- [41] 金峰,杨浩,赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, 32(1): 11 ~ 17. Jin F, Yang H, Zhao Q G. The proceeding of the study on the soil organic carbon storage and influencing factors ( In Chinese). Soils, 2000, 32(1): 11 ~ 17
- [42] 王绍强,朱松丽,周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征. 地理研究, 2001, 20(2): 161 ~ 169. Wang S Q, Zhu S L, Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China ( In Chinese). Geographic Research, 2001, 20(2): 161 ~ 169
- [43] Dalias P, Anderson J M, Botmer P, *et al* Temperature responses of carbon mineralization in conifer forest soils from different regional climates incubated under standard laboratory conditions. Global Change Biology, 2001, 7: 181 ~ 192
- [44] Janssens I A, Pilegaard K. Large seasonal changes in  $Q_{10}$  of soil respiration in a beech forest. Global Change Biology, 2003, 9: 911 ~ 918
- [45] Kirschbaum M U F. A modeling study of the effects of changes in atmospheric  $CO_2$  concentration, temperature and atmospheric nitrogen input on soil organic carbon storage. Tellus, 1993, 45: 321 ~ 334
- [46] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic matter act as a positive or negative feedback on global warming? Biogeochemistry, 2000, 48: 21 ~ 51

## DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF SOIL ORGANIC CARBON STORAGE AND DENSITY ON THE QINGHAI-TIBET PLATEAU

Tian Yuqiang<sup>1,2</sup> Ouyang Hua<sup>1†</sup> Xu Xingliang<sup>1</sup> Song Minghua<sup>1</sup> Zhou Caiping<sup>1</sup>

(1 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

(2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract** Based on the 1:1 000 000 scale soil database of the Qinghai-Tibet Plateau, the data from the second national soil survey and the data measured by the author, soil organic carbon storages and densities in the organic horizon, mineral horizon, and whole profile of the soil in the Qinghai-Tibet Plateau were estimated. It was shown that the average soil organic carbon density was estimated around  $C 7.2 \text{ kg m}^{-2}$ , a little lower compared with the national average soil organic carbon density,  $C 8.01 \sim 19.05 \text{ kg m}^{-2}$  obtained by the previous researches, and the soil organic carbon storage about  $18.37 \text{ Pg}$ , of which 38.14% was stored in the organic horizon, and 61.86% in the mineral horizon.

**Key words** Qinghai-Tibet Plateau; Soil organic carbon storage; Soil organic carbon density; Distribution