

西藏地区土壤表层和全剖面背景 有机碳库及其空间分布

范 宇,刘世全*,张世熔,邓良基

(四川农业大学 资源环境学院,四川 雅安 625014)

摘要:根据西藏 2607 个土壤剖面资料和 1 200 万土壤图的数字化处理,按地区以制图单元土壤亚类为基础估算土壤有机碳密度(SOCD)和储量(SOCR),并探讨其空间分布特征。结果表明:(1)西藏地区的 SOCD 平均为 7.48 kg m^{-2} ,并随土壤类型而变化,以山地铁铝土最高(29.2 kg m^{-2}),其后依次是山地淋溶土(16.6 kg m^{-2})、高山草甸型土壤(12.2 kg m^{-2})、山地半淋溶土(9.2 kg m^{-2})、高山草原型土壤(3.7 kg m^{-2})等,而以寒冻土(1.6 kg m^{-2})和高山荒漠土(1.3 kg m^{-2})为最低。同时土壤表层(0~20cm)的 SOCD 平均为 4.27 kg m^{-2} ,占全剖面总量的 57%,反映西藏地区土壤有机碳库(SOCP)对环境变化具有较高的敏感性。(2)西藏 SOCD 具有独特的水平地带分布,即自藏东南向西北逐次降低,由此可大体分为高()、中()、低()、极低()4 个碳密度带,其平均 SOCD 分别为 21、10、4、 $<2 \text{ kg m}^{-2}$;各带 SOCD 又有不同的垂直分布,总趋势是由复杂到简单,但均以最高位置的寒冻土极低碳密度为终点。(3)西藏 SOCR 总计为 8.23 Pg,占全国 SOCR 总量的 9.14%。各地 SOCR 分布极不平衡:就各碳密度带的 SOCR 相对比例(占西藏全区总量%)而言,、、、带分别为 25%、50%、22%、3%,其中、带合计的土壤面积仅占 45%,而 SOCR 却占 75%,因而是西藏 SOCP 的主体;而反映土壤储碳能力的丰度指数(R)则分别为 2.82、1.37、0.53、0.23。就各地区的 SOCR 而言,以那曲地区最大(2.19Pg),拉萨地区最小(0.31Pg);而 R 值则是林芝>山南>拉萨>昌都>日喀则>那曲>阿里。这些结果将为全球变化研究与区域环境评价提供有力的支撑。

关键词:西藏;土壤有机碳密度(SOCD);土壤有机碳储量(SOCR);空间分布

文章编号:1000-0933(2006)09-2834-13 中图分类号:Q14,S153.62,S154.1 文献标识码:A

Background organic carbon storage of topsoil and whole profile of soils from Tibet District and their spatial distribution

FAN Yu, LIU Shi-Quan*, ZHANG Shi-Rong, DENG Liang-Ji (College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2834~2846.

Abstract: As the main part of Qinghai-Tibet Plain, the Tibet district has a vast territory with high altitudes, cold climates and widely distributed frozen soils. Its soil organic carbon pools (SOCP) are special and important components of Chinese SOCP and could effectively affect and sensitively respond to the global climate change. Therefore, the baseline values of SOCP and their spatial distribution in Tibet are critical to a good understanding and accurate prediction of the global climate change. However, a complete and accurate SOCP database for Tibet is still to be determined. In this study, the baseline values of soil organic carbon density (SOCD) and reserve (SOCR) were determined for the entire Tibetan region and the SOCD geographic distribution maps were drawn using organic carbon data from 2607 soil profiles and the digitized 1:2,000,000 Tibetan soil map, both obtained from the soil survey in Tibetan Autonomous Region. The spatial distribution of SOCD and SOCR values was determined using the

基金项目:四川省教育厅资助项目(2005A005)

收稿日期:2006-02-21; **修订日期:**2006-07-29

作者简介:范宇(1982~),男,四川仁寿人,硕士生,主要从事为土壤与环境研究。

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: fan-yu777@yahoo.com.cn

致谢:本文在写作中得到许世和博士的帮助,谨致谢意!

Foundation item: The project was supported by Department of Education of Sichuan Province (No. 2005A005)

Received date: 2006-02-21; **Accepted date:** 2006-07-29

Biography: FAN Yu, Master candidate, mainly engaged in soil science and environment.

digitized *SOCD* geographic distribution map. In estimation of *SOCD* and *SOCR*, the international soil classification system was adopted. In consideration of the large regional variation in *SOCP*, soil profile data (thickness of soil layers, organic matter content, bulk density, gravel content as well as soil profile geographical location, elevation, vegetation cover and so on) were collected by soil subgroups, the charting units in soil maps. The corresponding soil profile database was also established. In recognition of the fact that the degree of weathering is low and gravel content high for all Tibetan soils, the soil organic carbon content for each soil layer was corrected for its gravel content in *SOCD* estimation and the *SOCD* of the whole soil profile was the summation of the individual soil layers in each profile. The *SOCD* of each region or each soil type was a weighted average based on actual soil acres which is also the basis for estimating *SOCR*. Finally, soil organic carbon richness rate index (*R*) was calculated to evaluate the storage capacity of organic carbon by various soil types and in different regions. The major findings were summarized as follows: (1) The *SOCD* of the whole soil profile varied from 0.48 kg m^{-2} to 50.71 kg m^{-2} with an average of 7.48 kg m^{-2} , less than the average value for China ($8.0\text{--}10.5 \text{ kg m}^{-2}$), and much lower than that of the world (12.1 kg m^{-2}). Therefore, Tibet is one of region in China with the lowest soil organic carbon density. (2) The *SOCD* values for different soil types varied substantially. For examples, the *SOCD* values follow the order: Ferro-allitic soils(29.2 kg m^{-2}) > Eluvial soils(16.6 kg m^{-2}) > Alpine meadow soils(12.2 kg m^{-2}) > Semi-eluvial soils(9.2 kg m^{-2}) > Alpine steppe soils(3.7 kg m^{-2}) > Frigid frozen soils(1.6 kg m^{-2}) and Alpine desert soils (1.3 kg m^{-2}). (3) The *SOCD* of surface soil layers (0~20cm) varied from 0.05 kg m^{-2} to 26.0 kg m^{-2} with an average of 4.27 kg m^{-2} , accounting for 57 % of the average *SOCD* for the whole soil profiles. This percentage is obviously higher than the corresponding average value in China ($< 48\%$), implying that the Tibetan soil organic carbon pools have a high instability and might be more sensitive to the global climate change. (4) The *SOCD* values of Tibetan soils had a unique horizontal regional distribution pattern; it decreased gradually from the southeast to the northwest Tibet. The soils can be divided into four zones according to their *SOCD* values: high (), medium (), low (), and extremely low (), corresponding to average *SOCD* values of 21 kg m^{-2} , 10 kg m^{-2} , 4 kg m^{-2} and $< 2 \text{ kg m}^{-2}$, respectively. Within each carbon density zone, there is also a unique vertical distribution pattern. Firstly, soil organic carbon density was higher at low altitude and decreased as the altitude increased. Secondly, the end zone of various vertical patterns was always the extremely low carbon density zone (alpine frost soils) at the highest altitude. (5) Total *SOCR* for Tibet is $822.76 \times 10^7 \text{ t}$ (8.23 Pg), about 9.14 % of the national value (about 90 Pg); Of that, the *SOCR* of soil surface layers (0-20cm) in Tibet is $469.08 \times 10^7 \text{ t}$ (4.69 Pg). The spatial distribution of *SOCR* values in Tibet is extremely imbalanced, which is not only related to the large variation of *SOCD* values in various soil types, but also due to the non uniform distribution of soil types. Firstly, the four kinds of soils with the highest *SOCR* values, namely Felty soils, Frigid Calcic soils, Dark felty soils and Dark Brown Earths, account for 24 %, 22 %, 15 % and 9 % of total *SOCR* in Tibet, respectively, or altogether for 70 % of total *SOCR* in Tibet. Therefore, they are major types of soils as far as *SOCP* is concerned. Next, the *SOCR* values for *SOCD* zones , , , accounted for 25 %, 50 %, 22 %, and 3 % of the total *SOCR* for Tibet, respectively. The richness index (*R*) which reflects the capacity of soil to store carbon was 2.82, 1.37, 0.53, 0.23 for zone , , , respectively, totally consistent with the change in the *SOCD* values. Although the area of the Zone I and was only for 45 % of the total soil acres, the *SOCR* accounted for 75 % of that in Tibet. Therefore, Zone I and are the major reservoir of the *SOCP* in Tibet. With respect to *SOCR* of various regions, Naqu is the greatest, while Lhasa is the smallest one. In terms of carbon storage capacity, the order is: Linzhi > Shannan > Lhasa > Qamdo > Zigaze > Naqu > Ali, which is mainly determined by *R* of predominant soil types in each region. The results will effectively support the research of global change and the work of regional environmental assessment.

Key words: tibet; soil organic carbon density (*SOCD*); soil organic carbon reserve (*SOCR*); spatial distribution

土壤有机碳库 (soil organic carbon pools/*SOCP*) 是地球陆地生态系统中最为重要的碳库之一, 它既是碳汇又是碳源, 无论对土壤质量和生态环境特别是气候变化都有重大的影响^[1~4]。青藏高原作为欧亚大陆最高大的地貌单元, 是世界上低纬度冻土集中分布区, 不仅对全球气候变化十分敏感, 而且在亚洲乃至全球气候变化中

也扮演着重要角色^[5]。近年研究表明,青藏高原气温不断升高,由于冻土热力敏感性大,高原冻土具有很大的碳、氮等温室气体的排放潜力^[6]。因此,准确掌握青藏高原土壤背景有机碳库储量及其空间分布状况,是预测其对全球气候变化的响应和反馈作用以及对未来区域环境评价等的重要依据。但迄今有关青藏高原 SOCP 的研究尚少^[7,8],其中只有王根绪等单独涉及西藏地区草地土壤^[8],并由于所据资料和运算方法的局限性,所得结果存在相当的不确定性。本文主要根据西藏土壤普查的大量基础资料,在运算时考虑土壤石砾量、碳密度的区域性变异等多种影响因素,以估算该地区土壤有机碳密度和储量,并探讨其空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 数据来源

研究数据来源于西藏自治区土壤普查汇总资料,包括《西藏自治区土种志》^[9]、《西藏自治区土壤资源》^[10]和西藏各地区(7 地市)“西藏土地资源调查丛书”^[11~17]所刊载的 2607 个土壤剖面数据。按地区以制图单元土壤亚类为单位归纳土壤剖面,分别采集土层划分厚度、有机质、容重、石砾量以及剖面地理位置、海拔、植被覆盖等数据建立土壤剖面数据库。土壤分类命名按《中国土壤分类系统》^[18]。

1.1.1 土壤有机质 本文土壤有机质数据是用直径 < 2mm(按国际制)的细土部分测定的。在土壤中石砾(> 2mm)量较大的情况下,细土有机质测定值就不能代表土壤实际的有机质状况。西藏土壤矿物风化程度低,加上土壤侵蚀(水蚀和风蚀),致使土壤石砾量普遍较高,对土壤有机碳密度和储量计算影响较大,必须予以矫正。为此,设某土层有机质测定值为 OM_i' (g kg^{-1}),石砾含量为 G_i (%),细土含量为 $(1 - G_i)$,有机质实际含量(矫正值)为 OM_i (g kg^{-1}),则:

$$OM_i = OM_i' \cdot (1 - G_i) \quad (1)$$

1.1.2 土壤容重 西藏土壤的容重数据大多缺失或不完整。一般来说,耕地土壤由于受耕作活动的影响,其容重季节性变化大;而自然土壤的容重较为稳定,并主要受有机质含量的影响。西藏以自然土壤占绝对优势,据此,本文根据部分有容重数据的土壤剖面,计算其与有机质含量的回归关系,确定土壤容重与有机质大致对应的分布区间,再以各个区间的平均值,作为对无容重数据土层的替代值;而对无容重数据的土类,则用性质相近土壤类型的平均值代替之。

1.2 土壤有机碳密度、储量和丰度指数

以西藏土壤普查 1:200 万土壤图^[19]为基础图件,经数字化处理后分别按地区确定各土壤亚类、土类的面积,并计算其有机碳密度和储量。

1.2.1 土壤有机碳密度 (soil organic carbon density/SOCD) SOCD 的估算采用国际上常用的土壤类型法^[20~24]。鉴于 SOCD 的地域性变异,本文按地区计算土壤亚类供试剖面 SOCD 的平均值,然后根据亚类面积计算土类和地区 SOCD 的加权平均值。

(1) 实测土层 SOCD 按土壤剖面分层计算,设土层 i 的有机碳密度为 $SOCD_i$ (kg m^{-2}),则:

$$SOCD_i = 0.58 \cdot OM_i \cdot BD_i \cdot H_i / 10^2 \quad (2)$$

式中,0.58 为 Bemmelen 换算系数; OM_i 为有机质矫正含量(g kg^{-1}); BD_i 为土层容重(g cm^{-3}); H_i 为土层厚度(cm)。

(2) 特定土层 SOCD 设 0~20cm(或其它深度)土层为特定土层,若其厚度 $\leq$ 实测土层厚度,两者 SOCD 一致;若特定土层包括 1 个以上实测土层,则按各实测土层所占的厚度份额加权平均计算其有机碳密度。

(3) 土壤全剖面(采样深度) SOCD 即土壤剖面各土层 SOCD 累加之和。

1.2.2 土壤有机碳储量 (soil organic carbon reserve/SOCR) SOCR 按地区各土壤亚类的面积和 SOCD 平均值计算:

$$SOCR = \sum_{i=1}^k SOCD_i \times S_j \quad (3)$$

式中,SOCR 为土类或地区土壤有机碳储量(10^7 t); $SOCD_i$ 为某亚类有机碳密度平均值(kg m^{-2}); S_j 为某亚类

面积(10^4 km^2)。

1.2.3 土壤有机碳丰度指数(Richness rate index/ R)^[25] 为反映各类土壤或区域土壤的储碳能力,引入有机碳丰度指数:

$$R = (SOCR_i / SOCR_t) / (A_i / A_t) \quad (4)$$

式中, $SOCR_i$ 为某类或地区土壤碳储量, $SOCR_t$ 为西藏全区土壤碳总储量, A_i 为某类或地区土壤面积, A_t 为西藏全区土壤总面积。

2 结果分析与讨论

2.1 西藏土壤有机碳密度及其空间分布

根据土壤普查统计资料^[10],西藏自治区扣除冰川雪被、水体及裸岩等后的土壤总面积为 $115 \times 10^4 \text{ km}^2$,占土地总面积的 96 %左右,其中草地、林地、耕地土壤和难利用土壤分别占 72.4 %、9.7 %、0.4 %和 17.5 %。按西藏自治区 1:200 万土壤图数字化处理的土壤总面积为 $110 \times 10^4 \text{ km}^2$,涉及 23 个土类,55 个亚类。其中水稻土、灌淤土、灰化土等土类因面积小而无法在土壤图的数字化过程中统计,便分别将其相关资料归入所嵌入的土类;在土壤图中未标出之土壤亚类数据,则归入相应土类中性质相近之亚类统计。

2.1.1 土壤有机碳密度(soil organic carbon density/ $SOCD$) 西藏 $SOCD$ 的变化极大,首先表现在不同土壤类型和土壤剖面层次性的变化上。

(1) 各类土壤 $SOCD$ 的变化 按各类土壤统计结果(表 1),西藏土壤全剖面(采样深度)的 $SOCD$ 变化于 $0.48 \sim 50.71 \text{ kg m}^{-2}$ 之间,平均 7.48 kg m^{-2} ,明显低于全世界土壤的平均水平(12.1 kg m^{-2}),也低于我国土壤平均水平($8.0 \sim 10.5 \text{ kg m}^{-2}$)^[26],所以西藏属于我国土壤低碳密度地区之一。但不同土壤类型的变化很大,以西藏各类地带性土壤(占土壤总面积的 95.5 %)为例,其有机碳密度(kg m^{-2})的变化趋势是:山地铁铝土(29.2) > 山地淋溶土(16.6) > 高山草甸型土壤(12.2) > 山地半淋溶土(9.2) > 高山草原型土壤(3.7) > 寒冻土(1.6) 和高山荒漠土(1.3)。这显然与有机碳的提供者——植被类型及其生长盛衰情况直接相关,而植被又主要决定于气候水热条件。此外,河谷地区的沼泽土和草甸土,由于地下水或地表积水对植被的湿润作用,其 $SOCD$ 高,分别为 50.7 kg m^{-2} 和 15.2 kg m^{-2} ,潮土则因人为耕垦活动致其 $SOCD$ 降至 7.2 kg m^{-2} ;盐土又因盐分对植被的抑制,其 $SOCD$ 更低至 3.35 kg m^{-2} ;初育土的 $SOCD$ 甚低(表 1)。概而言之,各类土壤的 $SOCD$ 变化首先决定于植被及其水热环境条件,它们直接影响土壤有机质(碳)的含量。同时,在西藏特殊高寒条件下,一般土壤的矿物风化程度低,粗骨性强,普遍石砾含量较高,从而对实际的 $SOCD$ 产生重大影响。例如,在西藏分布面积最大的寒钙土(占 46.3 %)和草毡土(占 16.5 %),其石砾量平均在 45 %左右(表 1),这就意味着其实际的有机质(碳)要从测定值按石砾比例大幅降低;并且,这种石砾量还只是室内测定的数据,一般比野外土壤的石砾量低。因此,在西藏 $SOCD$ 的估算时,石砾因素绝不能忽视。

(2) $SOCD$ 的剖面分布 供试土壤剖面 0 ~ 20cm 表层的 $SOCD$ 变化于 $0.05 \sim 26.0 \text{ kg m}^{-2}$,平均 4.27 kg m^{-2} ,占全剖面总量的 57 %;而此比例 ≥ 50 %的土壤面积占总面积的 89.5 % (表 1)。据最近统计资料^[26],全世界表土的 $SOCD$ 约为 5.0 kg m^{-2} ,占全土总量的 41 %;我国自然土壤表层 $SOCD$ 为 5.7 kg m^{-2} ,耕作土壤仅为 3.0 kg m^{-2} ;我国土壤有机碳库总 C 储量为 80 ~ 90Pg,表土层的 C 储量为 38 ~ 39Pg,其所占比例不超过 48 %。因此,西藏地区绝大部分土壤表层有机碳的比例都明显高于全国的平均水平。由此显示,在西藏高寒生态环境下,土壤中有机碳积累呈现出表聚性高的特点。这在图 1 中表现得更为直观清晰,图上除冷钙土、冷棕钙土、褐土、黄壤和草甸土、潮土等几类小面积土壤表层 $SOCD$ 的比例较低外,其余寒钙土、草毡土、黑毡土、灰褐土、暗棕壤、棕壤、黄棕壤,甚至原始性的寒冻土等大面积土壤表层 $SOCD$ 占全剖面总量的比例都超过 50 %。表土层是土壤与地表环境进行物质和能量交换最活跃的部分,也是有机碳输入积累和分解排放最频繁的場所,因此,与深层土壤相比,表土有机碳的消长受人类耕作影响更强烈,对环境气候变化的敏感性更高,对地球碳循环、温室气体的固定与排放贡献更大^[27~29]。由此可以认为,西藏地区土壤有机碳表聚性较高,就意味着其整个 SOCP 具有较高的潜在不稳定性,即对环境气候变化的较高敏感性。

表 1 西藏各类土壤有机碳密度 (SOCD) 及相关因素统计(平均值)

Table 1 Statistics of SOCD and its relevant factors of different soil types in Tibet (mean value)

土壤类型 Soil type	面积 比例 Percentage (%)	剖面数 Amount of profiles	深度 Depth (cm)	OM(g kg ⁻¹) 全剖面 Whole profile	石砾 Gravel (%)	矫正 OM (g kg ⁻¹) Correct OM		容重 Bulk density (g cm ⁻³)	SOCD (kg m ⁻²)		0 ~ 20cm SOCD (%)
						0 ~ 20cm	全剖面 Whole profile		0 ~ 20 cm	全剖面 Whole profile	
寒冻土 Frigid frozen soils	10.99	46	36	9.20	52.54	5.63	4.37	1.70	1.11	1.55	71.6
高山荒漠型 Alpine desert soil	0.55	12	45	4.60	31.63	3.79	3.15	1.57	0.69	1.29	53.5
寒漠土 Frigid desert soils	0.31	6	39	5.90	26.98	4.67	4.31	1.57	0.85	1.53	55.6
冷漠土 Cold desert soils	0.24	6	50	3.42	37.71	0.03	2.13	1.57	0.48	0.97	49.5
高山草原型 Alpine steppe soil	49.43	858	73	12.67	44.94	12.52	6.97	1.26	1.83	3.72	49.2
寒钙土 Frigid calcic soils	46.32	220	65	13.68	46.6	12.00	7.30	1.30	1.81	3.58	50.6
冷钙土 Cold calcic soils	2.50	369	71	13.26	19.48	14.09	10.68	1.26	2.06	5.54	37.2
冷棕钙土 Cold brown calcic soil	0.61	269	82	15.54	23.59	19.15	11.87	1.22	2.71	6.89	39.3
高山草甸型 Alpine meadow soil	24.40	657	68	49.39	47.85	57.33	25.76	1.20	7.98	12.19	65.5
草毡土 Felty soils	16.53	343	58	49.67	44.84	55.17	27.40	1.20	7.68	11.06	69.4
黑毡土 Dark felty soils	7.87	314	77	59.29	54.18	61.78	27.17	1.20	8.60	14.56	59.1
半淋溶土 Semi-eluvial soil	1.66	313	75	31.66	51.10	30.87	15.48	1.36	4.87	9.16	53.2
灰褐土 Gray-cinnamon soil	0.86	129	71	39.04	49.76	41.18	19.61	1.30	6.21	10.50	59.1
褐土 Cinnamon soils	0.80	184	79	25.17	52.53	20.97	11.95	1.41	3.43	7.72	44.4
淋溶土 Eluvial soils	5.76	141	81	66.02	57.32	73.18	27.75	1.19	10.19	16.63	61.3
暗棕壤 Dark-brown earths	3.65	56	92	71.55	61.72	77.02	27.39	1.22	10.9	17.83	61.1
棕壤 Brown earths	0.84	43	71	56.3	34.42	75.69	36.92	1.32	11.59	20.07	57.7
黄棕壤 Yellow-brown earths	1.27	42	80	56.46	59.75	60.43	22.72	1.03	7.22	10.86	66.5
铁铝土 Ferro-allitic soils	2.69	61	89	64.74	21.4	94.58	51.29	1.11	12.27	29.23	42.0
黄壤 Yellow earths	1.28	35	95	60.17	31.18	87.7	41.41	1.04	10.58	23.73	44.6
红壤 Red earths	1.41	26	83	68.88	12.52	100.82	60.26	1.18	13.8	34.23	40.3
初育土 Primitive soils	1.74	119	57	12.13	55.35	2.75	4.87	1.42	0.45	1.29	34.9
新积土 Neo-alluvial soils	0.22	35	81	9.79	83.33	3.11	1.63	1.33	0.48	1.02	47.1
风沙土 Aeolian soils	0.23	35	88	3.93	5.58	5.02	3.71	1.51	0.88	2.86	30.8
石质土 Lithosols	0.84	33	10	14.97	60.79	0.31	5.87	1.41	0.05	0.48	10.4
粗骨土 Skeletal soils	0.45	16	50	12.25	57.68	5.93	5.18	1.41	0.97	2.12	45.8
其它 Other soils	2.78	400	79	57.73	31.86	74.53	45.37	1.29	10.13	20.74	48.8
盐土 Solonchaks	0.53	44	90	10.41	55.65	8.25	4.62	1.39	1.33	3.35	39.7
草甸土 Meadow soils	1.59	223	80	35.29	30.91	45.42	24.38	1.34	7.06	15.16	46.6
沼泽土 Bog soils	0.62	87	60	158.32	13.98	209.31	136.19	1.07	25.98	50.71	51.2
潮土 Fluvo-aquic soils	0.04	46	86	15.65	32.4	18.00	10.58	1.37	2.86	7.23	39.6
总计/平均 Total/Mean	100.00	2607	69	—	—	—	—	—	4.27	7.48	57.1

2.1.2 SOCD 的地理分布特征 根据西藏自治区土壤图上的 3654 个图斑所属制图单元(土壤亚类),按地区赋予其土壤全剖面(采样深度)的有机碳密度平均值,绘制 SOCD 分布图,其中冰川雪被、水体以及裸岩等无土图斑均以零值代入成图,即为亮黄色图斑(图 2)。

西藏 SOCD 具有独特的地理分布格局,表现特有的水平地带分布和垂直分布。

(1) SOCD 的水平地带分布 西藏 SOCD 水平分布趋势是由藏东南向西北逐次降低,据此可分为高()、中()、低()、极低() 4 个碳密度带(图 2)。这种基于不同土壤类型碳密度变化的分带,势必与西藏土壤的水平地带分布存在基本的一致性,其特点是土壤及其碳密度带由东南向西北而不是由南向北或由东向西更替分布^[10,30]。这一分布又主要决定于西藏独特的水热条件分布。据西藏年平均气温和降水量分布图^[31],气温和降水量均自东南向西北逐次降低,这既有纬度北移和地势抬升的原因,更主要的是众多东西向高大山脉对印度洋暖湿气流的层层阻扼,导致气候类型由湿润型依次过渡为半湿润、半干旱、干旱型,相应的植被和土壤则由山地森林型依次过渡为高山草甸型、草原型、荒漠草原型和荒漠型,土壤有机碳积累亦随之由强变弱^[10,32]。由此造成这一独特的 SOCD 水平地带分布格局。

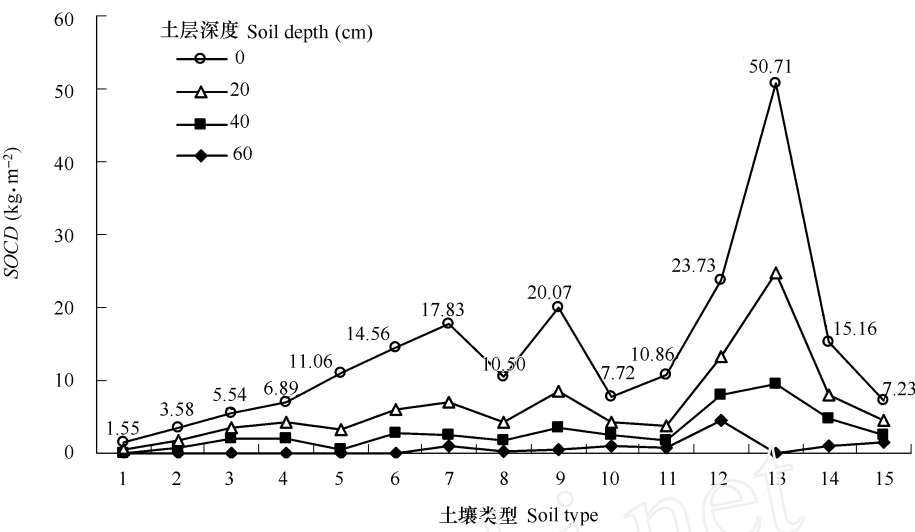


图1 西藏主要土壤类型有机碳密度的剖面分布

Fig. 1 Profile distributions of soil organic carbon density of major soil types in Tibet

1:寒冻土 Frigid frozen soils;2:寒钙土 Frigid calcic soils;3:冷钙土 Cold calcic soils;4:冷棕钙土 Cold brown calcic soils;5:草毡土 Felty soils;6:黑毡土 Dark felty soils;7:暗棕壤 Dark brown earths;8:灰褐土 Gray-cinnamon soils;9:棕壤 Brown earths;10:褐土 Cinnamon soils; 11:黄棕壤 Yellow-brown earths;12:黄壤 Yellow earths;13:沼泽土 Bog soils; 14:草甸土 Meadow soils; 15:潮土 Fluvo-aquic soils

()土壤高碳密度带 位于喜马拉雅山脉南侧和横断山脉以西,主要包括墨脱县和上、下察隅以及隆子、错那县南部,向西延伸至亚东等县南缘。此带约占西藏土壤总面积的9%,SOCD多在 20 kg m^{-2} 以上,平均 21 kg m^{-2} (表2)。大体对应于西藏山地森林土壤地带的铁铝土亚地带^[10],其土被构成以高碳密度的山地铁铝土和淋溶土为主,加上中碳密度的高山草甸型土壤(草毡土和黑毡土),合计面积达87%以上,虽然有12%左右碳密度极低的寒冻土和初育土,但全带依然维持在高碳密度水平。此带为西藏水热条件最优越地区,雨水尤为丰沛,属于喜马拉雅南翼热带、亚热带湿润气候^[31],以此支撑着山地湿润森林和高山草甸植被的旺盛发展^[32],从而在土壤中积累大量有机碳。目前此带仍保持着大量的原始森林,是西藏唯一以林地为主和地面植被碳库最丰富的地区,也是生态环境最佳的山地森林景观带。

()土壤中碳密度带 范围包括藏东南金沙江、澜沧江、怒江流域和雅鲁藏布江中上游流域,即昌都、拉萨地市全部和日喀则、山南、林芝地区的大部分以及那曲地区东部,约占西藏土壤总面积的36%。此带SOCD较带有大幅降低,多在 $10\sim 15\text{ kg m}^{-2}$ 的中碳水平,平均稍高于 10 kg m^{-2} (表2)。此带位于喜马拉雅山脉东段以北,唐古拉山东段以南,冈底斯山和念青唐古拉山东西横贯,东跨横断山脉西部。此种地形造就了复杂多样的气候类型,即以东部温暖至寒冷半湿润气候为主,兼有西部温暖半干旱气候,并在高山峡谷出现特有的干旱河谷气候^[31]。因此其热量尤其是水分条件远不及带,土壤有机碳积累明显减弱。与之相应的土被构成以中碳密度的草毡土、黑毡土为主(面积约占57%以上),同时又兼有中、低碳密度的半淋溶土即干旱河谷土壤(褐土、灰褐土)和高山草原型的冷棕钙土、冷钙土、寒钙土等;虽有少量山地淋溶型的棕壤、暗棕壤分布,但其SOCD已明显低于带的同类土壤(表2)。凡此种种,均反映此带由山地森林向高山草原过渡的景观特征。此带也是以河谷农业为主要特色的西藏基本农区,其耕地占西藏全区耕地总面积的85%以上,人为耕垦活动对SOCD有着重要影响^[33],加上地形、植被等因素造成的水土流失,致使其成为SOCD剧烈波动的生态脆弱带。

()土壤低碳密度带 以藏北高原为主体,包括那曲、阿里和日喀则地区大部或一部,约占西藏土壤总面积的41%。其SOCD大多低于 5 kg m^{-2} ,平均近于 4 kg m^{-2} (表2)。此带地貌主要为高山湖盆和丘状高原湖盆,地势高而相对平缓,气候以温暖至寒冻半干旱气候为主,兼有温暖干旱气候(阿里南部)^[31]。与之相适应,

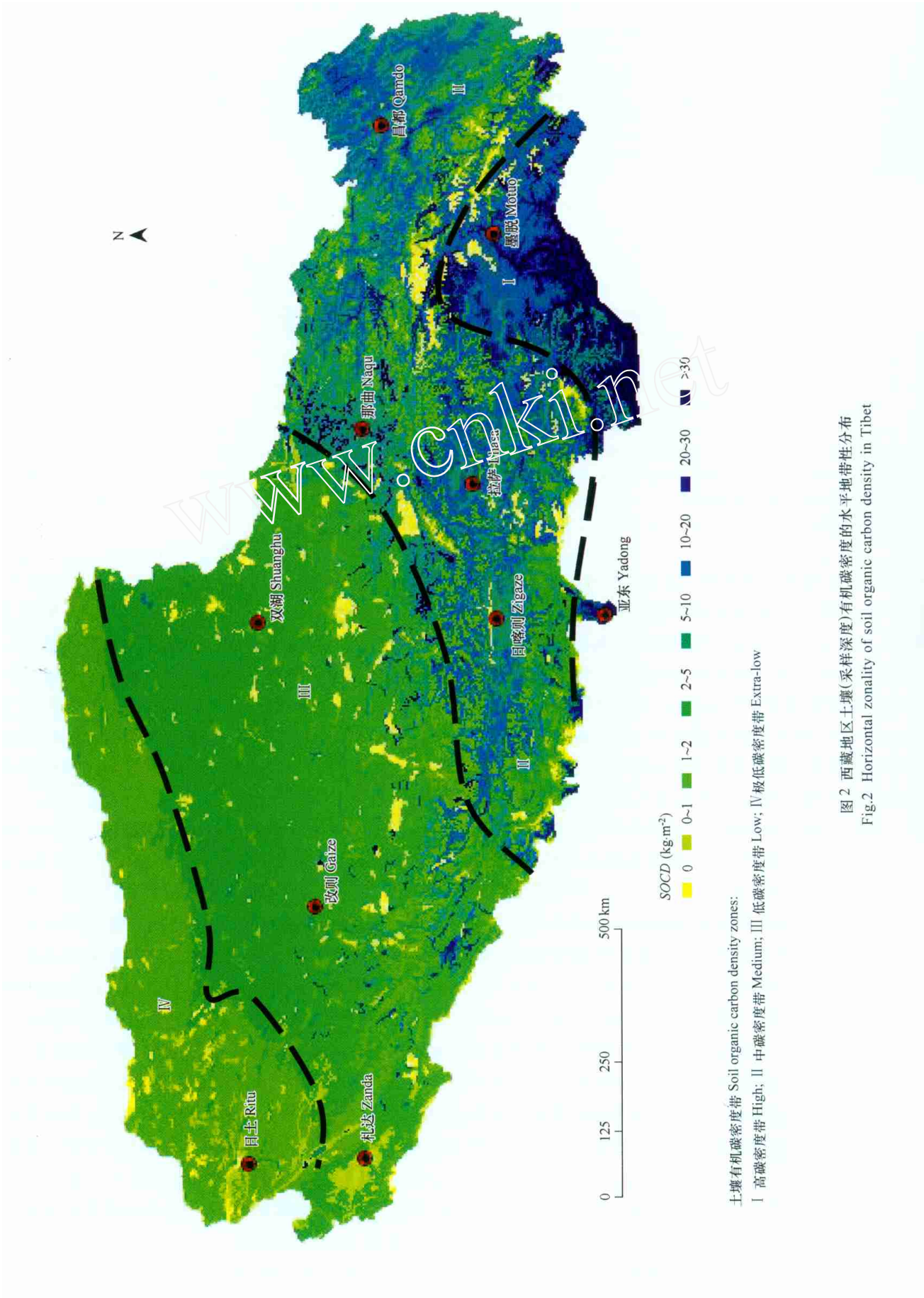


图 2 西藏地区土壤(采样深度)有机碳密度的水平地带性分布
Fig.2 Horizontal zonality of soil organic carbon density in Tibet

在土壤水平地带分布上主要属于高山草原土壤地带的寒钙土亚地带^[10],土被构成以寒钙土占绝对优势(面积占 77%),其碳密度低于 4 kg m⁻²;加上寒冻土、冷钙土、冷漠土和初育土等,低碳密度土壤面积高达 95%以上;即使是此带中少量分布的草毡土(以薄草毡土为主),其碳密度亦明显低于 、带(表 2)。此带大多为纯牧区甚至无人区,由过度放牧、土壤风蚀和沙化造成的草地退化是导致 SOCD 衰减的主要因素。

表 2 西藏各土壤有机碳密度带及其土被构成

土壤类型 Soil type	() 高碳密度带 High SOCD zone		() 中碳密度带 Medium SOCD zone		() 低碳密度带 Low SOCD zone		() 极低碳密度带 Extra-low SOCD zone	
	SOCD	面积比例	SOCD	面积比例	SOCD	面积比例	SOCD	面积比例
	(kg m ⁻²)	Percentage (%)	(kg m ⁻²)	Percentage (%)	(kg m ⁻²)	Percentage (%)	(kg m ⁻²)	Percentage (%)
铁铝土 Ferro-allitic soils	27.93	32.56	—	—	—	—	—	—
黄壤 Yellow earths	23.69	19.49	—	—	—	—	—	—
红壤 Red earths	34.25	13.07	—	—	—	—	—	—
淋溶土 Eluvial soils	26.67	32.65	13.50	5.46	—	—	—	—
暗棕壤 Dark-brown	38.72	15.98	12.54	3.84	—	—	—	—
棕壤 Brown earths	22.43	4.96	15.78	1.62	—	—	—	—
黄棕壤 Yellow-brown earths	12.01	11.70	—	—	—	—	—	—
半淋溶土 Semi-eluvial soils	—	—	9.37	4.56	—	—	—	—
灰褐土 Gray-cinnamon soils	—	—	10.65	2.64	—	—	—	—
褐土 Cinnamon soils	—	—	7.61	1.92	—	—	—	—
高山草甸型 Alpine meadow-form	13.68	22.37	12.85	57.57	7.65	4.95	—	—
草毡土 Felty soils	12.54	4.33	11.82	38.90	7.65	4.95	—	—
黑毡土 Dark felty soils	13.95	18.04	15.00	18.65	—	—	—	—
高山草原型 Alpine steppe-form	—	—	6.47	9.48	3.71	78.44	1.72	71.34
寒钙土 Frigid calcic soils	—	—	4.87	3.09	3.75	77.02	1.73	70.84
冷钙土 Cold calcic soils	—	—	7.50	4.34	1.82	1.43	0.80	0.50
冷棕钙土 Cold brown calcic soils	—	—	6.72	2.05	—	—	—	—
高山荒漠型 Alpine desert-form	—	—	—	—	2.17	0.47	1.41	1.82
寒漠土 Frigid desert soils	—	—	—	—	—	—	1.53	1.54
冷漠土 Cold desert soils	—	—	—	—	2.17	0.47	0.73	0.28
寒冻土 Frigid frozen soils	1.47	11.45	1.57	16.62	1.56	8.06	1.38	14.40
初育土 Primitive soils	1.34	0.80	1.75	2.94	1.36	3.93	0.78	9.79
其它 Other soils	25.40	0.17	33.58	3.37	10.96	4.15	0.80	2.65
总计/平均 Total/Mean	21.08	100.00	10.26	100.00	3.94	100.00	1.74	100.00

* 初育土包括石质土、粗骨土、风沙土和新积土;其它土壤包括寒原盐土、沼泽土、草甸土、潮土、灌淤土和水稻土 Primitive soils include Lithosols, Skeletal soils, Aeolian soils, Neo-alluvial soils; Other soils include Frigid plateau solonchaks, Bog soils, Meadow soils, Fluvo-aquic soils, Irrigation silting soils and Paddy soils

()土壤极低碳密度带 为藏北高原西北部的狭长地带,包括那曲地区双湖西北部和阿里地区以日土县为主的北部,约占西藏土壤总面积的 14%。气候为温暖(阿里北部)至冻寒(昆仑山)干旱气候^[30],植被以高山荒漠草原和荒漠为主^[32],在土壤水平地带分布上主要属于高山草原土壤地带的荒漠草原土(淡寒钙土)亚地带(双湖)和高山荒漠土壤地带(阿里)^[10],土被构成依然以寒钙土占优势(约占 71%),但主要是其碳密度极低(<2kg m⁻²)的淡寒钙土,且其余土壤碳密度亦极低,因此总体 SOCD 平均不及 2 kg m⁻²(表 2)。值得注意的是,初育土在各带面积中所占比例,按带→带→带依次增加,到此带急增至近 10%的最高点,而碳密度则陡降至最低点(0.8 kg m⁻²)。因此此带是 SOCD 最低的生态环境脆弱地带。

(2) SOCD 垂直分布 主要特点:首先是各碳密度带的垂直分布差异大,且具水平地带特征。由图 3 可见,带的基带土壤是铁铝土(红壤、黄壤),碳密度最高,向上至黄棕壤降到低点,再上至暗棕壤回升到高点,而后又降低直至寒冻土达到最低点,表现“高→低→高→最低”的垂直分布特征。在带,东部以干暖河谷褐土的低碳密度为起点,向上依次为高(棕壤)→低(暗棕壤)→高(黑毡土、草毡土)→极低(寒冻土)[林芝]或高(灰褐土)→更高(黑毡土)→低(草毡土)→极低(寒冻土)[八宿];西部雅鲁藏布江中游,以干温河谷冷

棕钙土的低碳密度为起点,向上至冷钙土增加,其后寒钙土又有所降低直至寒冻土达到最低点[曲水]。、带由于地势高而地面起伏平缓,气候、植被垂直变化较小,土壤垂直带谱简单,其 $SOCD$ 仅呈现由低向上稍有增高再降至最低点的简单垂直分布。其次,各带 $SOCD$ 的垂直分布均以寒冻土的极低碳密度为终点,表现'殊途同归'的特征,同时各带中寒冻土所占面积比例都较大,达 8%~17%(表 3),充分展示西藏高原地势高大而气候寒冷的基本地理景观特点。

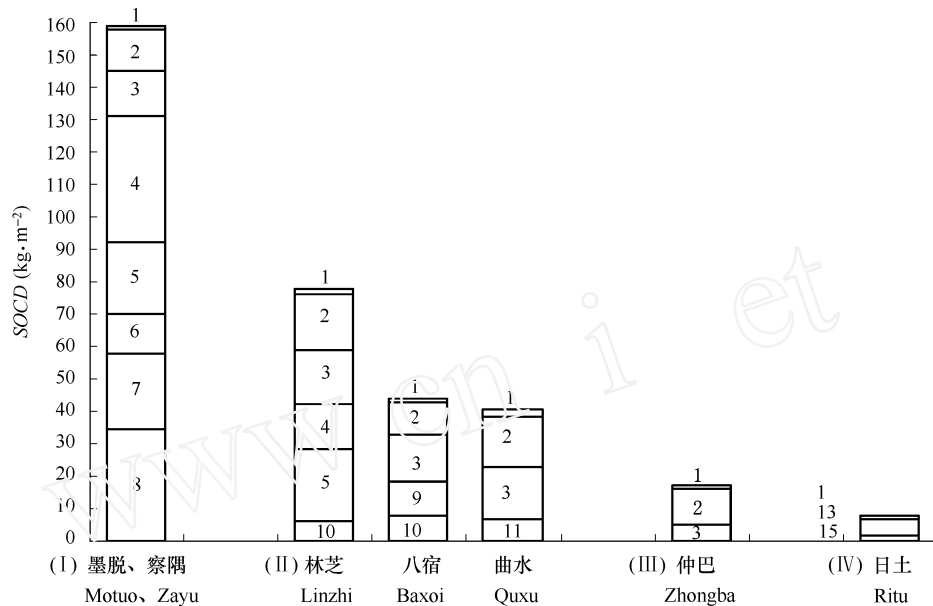


图3 西藏土壤有机碳密度($SOCD$)的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of $SOCD$ in Tibet

1:寒冻土 Frigid frozen soils; 2:草毡土 Felted soils; 3:黑毡土 Dark felted soils; 4:暗棕壤 Dark brown earths; 5:棕壤 Brown earths; 6:黄棕壤 Yellow brown earths; 7:黄壤 Yellow earths; 8:红壤 Red earths; 9:灰褐土 Gray-cinnamon soils; 10:褐土 Cinnamon soils; 11:冷棕钙土 Cold brown calcic soils; 12:冷钙土 Cold calcic soils; 13:寒钙土 Frigid calcic soils; 14:冷漠土 Cold desert soils; 15:寒漠土 Frigid desert soils

2.2 西藏土壤有机碳储量及其区域分布特征

2.2.1 土壤有机碳储量 (soil organic carbon reserve/ $SOCR$) 由表 3 可见,西藏地区土壤全剖面的有机碳总储量为 $822.76 \times 10^7 t$ ($8.23 Pg$), 占我国 $SOCP$ 总 C 储量(按 $90 Pg$ 计^[26]) 的 9.14%; 其中 0~20cm 表层为 $469.08 \times 10^7 t$ ($4.69 Pg$), 占 57%, 这与前述 $SOCD$ 的剖面分布一致。 $SOCR$ 较大的 4 类土壤是草毡土、寒钙土、黑毡土(均为高山草地土壤)和暗棕壤(山地湿润森林土壤), 分别占西藏土壤有机碳总储量的 24%、22%、15%和 9%, 合计占 70%以上。换言之,西藏 $SOCP$ 主要由这 4 类土壤所支撑。其中草毡土、黑毡土和暗棕壤的 $SOCD$ 较高, 达 $11 \sim 18 kg m^{-2}$, 分布面积也较大, 三者合计占土壤总面积的 28%以上; 寒钙土的 $SOCD$ 低 ($3.58 kg m^{-2}$), 但分布面积最大, 占总面积 46%以上, 故其有机碳储量仅次于草毡土而居第 2 位。此外,河谷沼泽土、草甸土和除暗棕壤外的其它森林土壤, 虽然分布面积小, 但其 $SOCD$ 较大(介于 $10 \sim 50 kg m^{-2}$, 表 1), 故对西藏 $SOCR$ 亦有相当的贡献(占总储量的 23%)。相反,寒冻土的分布面积虽然较大(约占总面积的 11%), 但因其 $SOCD$ 小, $SOCR$ 亦小。至于其它土壤, 则因分布面积小和 $SOCD$ 低的双重制约, 对西藏 $SOCR$ 的贡献甚小。

2.2.2 $SOCR$ 的区域分布特征 鉴于西藏各地不仅土被结构不同, 而且同类土壤的 $SOCD$ 亦有差异, 因此在土壤图的数字化过程中分别对 $SOCR$ 进行分区和分带估算和汇总; 同时以土壤有机碳丰度指数 (R) 反映西藏各地土壤的储碳能力。

(1) $SOCR$ 和储碳能力的地区性变化 西藏按行政区统计, 各地区的 $SOCR$ (表 3) 既与其 $SOCD$ 有关, 也与其土壤面积有关。 $SOCR$ 以那曲地区最高占 26.65%, 主要因为其面积最大; 以拉萨市最低, 仅占 3.81%, 主要

因为其面积最小,虽然拉萨市 *SOCD* 并不低。相反阿里地区的 *SOCD* 最低,但因其面积大(仅次于那曲地区),故其 *SOCR* 反而高于拉萨市,占 9.45 %。由此可见,各地区 *SOCR* 并不能反映其有机碳库的储碳能力,引入有机碳丰度指数(*R*)则可排除面积的干扰,反映各地区的储碳能力。就 *R* 值而言,各地区的大小顺序是:林芝(2.26) > 山南(1.98) > 拉萨(1.59) > 昌都(1.42) > 日喀则(0.96) > 那曲(0.80) > 阿里(0.38)。各地区的丰度指数又决定于其优势土壤类型的丰度指数,各类地带性土壤 *R* 值的大小顺序是:山地铁铝土(3.90) > 山地淋溶土(2.22) > 高山草甸型土壤(1.63) > 山地半淋溶土(1.23) > 高山草原型土壤(0.50) > 寒冻土(0.21) > 高山荒漠土(0.17),与各类土壤 *SOCD*(表 1)的变化趋势一致。

表 3 西藏各地区土壤有机碳储量(*SOCR*)和丰度指数(*R*)

Table 3 Soil organic carbon reserve(*SOCR*)and richness rate index(*R*) in different districts of Tibet

土壤类型 Soil type	面积 Area (×10 ⁴ km ²)	SOCR(10 ⁷ t)								R	
		林芝 Linzhi	山南 Shannan	昌都 Qamdo	拉萨 Lhasa	日喀则 Zigaze	那曲 Naqu	阿里 Ali	全西藏 Tibet		
寒冻土 Frigid frozen soils	12. 09	2. 04	0. 68	1. 52	0. 82	5. 49	3. 12	5. 11	18. 78	0. 21	
高山荒漠型 Alpine desert	0. 6	—	—	—	—	—	—	0. 77	0. 77	0. 17	
寒漠土 Frigid desert soils	0. 34	—	—	—	—	—	—	0. 52	0. 52	0. 19	
冷漠土 Cold desert soils	0. 26	—	—	—	—	—	—	0. 25	0. 25	0. 13	
高山草原型 Alpine steppe	54. 36	—	4. 87	0. 09	1. 33	37. 47	98. 91	59. 32	201. 99	0. 50	
寒钙土 Frigid calcic soils	50. 94	—	0. 45	0. 09	0. 04	24. 59	98. 91	58. 03	182. 11	0. 48	
冷钙土 Cold calcic soils	2. 75	—	2. 22	—	—	11. 75	—	1. 29	15. 26	0. 74	
冷棕钙土 Cold brown calcic soil	0. 67	—	2. 20	—	1. 29	1. 13	—	—	4. 62	0. 92	
高山草甸型 Alpine meadow	26. 84	46. 11	32. 26	82. 18	27. 8	58. 52	75. 34	4. 95	327. 16	1. 63	
草毡土 Felty soils	18. 18	20. 14	20. 68	23. 88	20. 59	48. 01	62. 87	4. 95	201. 12	1. 48	
黑毡土 Dark felty soils	8. 66	25. 97	11. 58	58. 3	7. 21	10. 51	12. 47	—	126. 04	1. 95	
半淋溶土 Semi-eluvial soils	1. 82	1. 71	1. 33	13. 65	—	—	—	—	16. 69	1. 23	
灰褐土 Gray-cinnamon soil	0. 94	0. 21	0. 68	9. 03	—	—	—	—	9. 92	1. 41	
褐土 Cinnamon soils	0. 88	1. 5	0. 65	4. 62	—	—	—	—	6. 77	1. 03	
淋溶土 Eluvial soils	6. 33	74. 37	19. 69	7. 83	—	2. 33	0. 903	0. 15	105. 27	2. 22	
暗棕壤 Dark-brown earths	4. 02	54. 61	8. 26	6. 81	—	0. 91	0. 90	0. 15	71. 64	2. 39	
棕壤 Brown earths	0. 92	10. 17	5. 95	1. 02	—	1. 36	0. 003	—	18. 50	2. 68	
黄棕壤 Yellow-brown earths	1. 39	9. 59	5. 48	—	—	0. 06	—	—	15. 13	1. 45	
铁铝土 Ferro-allitic soils	2. 96	43. 2	42. 71	—	—	0. 56	—	—	86. 47	3. 90	
黄壤 Yellow earths	1. 41	15. 3	17. 65	—	—	0. 56	—	—	33. 51	3. 18	
红壤 Red earths	1. 55	27. 9	25. 06	—	—	—	—	—	52. 96	4. 57	
初育土 Primitive soils	1. 93	0. 10	0. 07	0. 01	0. 002	0. 28	1. 58	0. 44	2. 48	0. 17	
其它土壤 Other soils	3. 05	0. 05	0. 59	2. 35	1. 38	12. 37	39. 4	6. 99	63. 13	2. 77	
合计 Sum	SOCR(10 ⁷ t)	—	167. 57	102. 21	107. 62	31. 34	117. 01	219. 27	77. 74	822. 76	—
	比例 Percentage (%)	—	20. 37	12. 42	13. 08	3. 81	14. 22	26. 65	9. 45	100. 00	—
	面积 Area (×10 ⁴ km ²)	—	9. 93	6. 90	10. 10	2. 64	16. 21	36. 70	27. 50	109. 98	—
	比例 Percentage (%)	—	9. 03	6. 27	9. 18	2. 40	14. 74	33. 37	25. 00	100. 00	—
	R	—	2. 26	1. 98	1. 42	1. 59	0. 96	0. 80	0. 38	1. 00	—

(2) *SOCR* 和储碳能力的地带性变化 西藏 *SOCR* 和储碳能力(*R*)按前述各土壤有机碳密度带来归纳,可以更清楚地反映其规律性的空间变化。由表 4 可见, 带的面积虽然最小,但因其 *SOCD* 高,故 *SOCR* 仍较高,占西藏总碳储量的 25 %以上,储碳能力最高,*R* 值达 2.82。 带面积有大幅度增加,但由于 *SOCD* 大幅降低,其 *SOCR* 约占西藏总碳储量的 50 %,储碳能力急剧减弱,*R* 值降至 1.37。 带面积最大,但因 *SOCD* 低,其 *SOCR* 仅占西藏总碳储量 22 %左右,*R* 值更降至 0.53。 带的 *SOCR* 和储碳能力均最低。概而言之, 、 带合计的土壤面积占 45 %左右,但其 *SOCR* 占 75 %以上,因而成为西藏 *SOCP* 的主体。同时, 、 带也是西藏草地放牧、森林采伐和耕垦等人为活动干预最强烈的地区。因此,保持和恢复这一地区土壤储碳能力,对调节青藏高原乃至全球温室气体排放和生态环境平衡有着特殊重要的意义。

2.3 讨论

$SOCD$ 数据的可靠性是准确估算 $SOCR$ 的关键,然而由于种种条件的局限,往往使估算结果出现某些不确定性。现对本文估算结果讨论如下:

2.3.1 与文献资料的比较 王根绪等对西藏地区 11 类草地土壤 $SOCR$ 的估算结果^[8]:面积为 $99.27 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均土层深度 55cm, $SOCD$ 为 15.4 kg m^{-2} , $SOCR$ 约为 $154 \times 10^7 \text{ t}$ 。本文同类土壤的估算结果:面积为 $96.62 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均土层深度 61cm, $SOCD$ 为 6.4 kg m^{-2} , $SOCR$ 约为 $61 \times 10^7 \text{ t}$ 。两相比较,在土壤面

积和土层深度相差不大的情况下,本文 $SOCD$ 和 $SOCR$ 明显低于王文,主要原因在于本文所采集土壤有机质的基础数值较低并进行了石砾因素矫正。以面积最大的 5 类草地土壤为例(表 5),并以表 4 所列土壤普查中表土层有机质的大样本(包含农化样)统计数据为准,本文各类土壤全剖面平均有机质含量均低于其表土层的统计数据,当属正常情况,反之则不正常,因此本文有机质数据应当更符合实际情况。至于土层深度和容重数据,本文稍高或两者相近,不至构成影响。

表 5 本文与文献^[8]关于西藏主要草地土壤 $SOCD$ 及相关数据比较

Table 5 Comparison of $SOCD$ and its relevant data of major grassland soils in Tibet of this paper with those of literature^[8]

土壤类型 Soil type	深度 (cm)		容重 (g cm ⁻³)		OM (g kg ⁻¹)		表土 OM (g kg ⁻¹) *			SOCd (kg m ⁻²)		减幅比例 Percentage (%)
	Mean depth		Bulk density				OM in topsoil					
	a	b	a	b	a	b	样本数 Samples (<i>n</i>)	均值 Mean	加权均值 Weighted mean	a	b	
寒冻土 Frigid frozen soils	25	36	1.70	1.70	16.8	4.37	81	15.6	15.6	4.14	1.55	62.6
寒钙土 Frigid calcic soils	60	65	1.30	1.30	19.8	7.30	186	20.4	17.8	8.96	3.58	60.0
冷钙土 Cold calcic soils	70	71	1.28	1.26	27.9	10.68	114	22.8	19.0	14.50	5.54	61.8
草毡土 Felty soils	50	58	1.06	1.20	94.5	27.40	374	61.2	61.5	29.05	11.06	61.9
黑毡土 Dark felty soils	70	77	1.12	1.20	76.7	27.17	463	74.6	83.4	34.88	14.56	58.3

* 资料来源于西藏自治区土地资源数据集(1992);系非耕地土壤表层有机质测定值,样本均值指土类所有测定样本的平均值;土类加权均值指其各亚类样本均值的面积加权平均值 It is the data of OM of all non-arable soils from Land resources data set of Tibet Autonomous Region (1992); Mean stands for mean OM content of all observed value of OM content of topsoil samples within a soil group. Weighted mean stands for subgroup area-weighted mean value of all mean OM contents of topsoil samples of subgroups within a group; a:本文 this paper, b:[8]

2.3.2 土壤样本的数量和分布 土壤样本的数量和分布状况直接影响 $SOCP$ 估算结果的可靠性。本文采集能在数字化土壤图上定位的 2607 个土壤剖面样点,平均样点密度为 $23.7 \text{ 个}/10^4 \text{ km}^2$,在全国属于低水平,从而对 $SOCD$ 估算结果带来某种不确定性,然而这种不确定性主要与不同地区和土壤 $SOCD$ 的自然变化幅度有关。西藏地区土壤垦殖率不及 0.4%,以自然土壤占绝对优势,人为耕作造成的 $SOCD$ 的变化仅限于极小范围,而在广大地区由气候、植被等自然环境因素主导的 $SOCD$ 变化又因地而异。总的来说,在藏东南地貌、气候环境复杂地区, $SOCD$ 变化大,其估算需要有较大的样点密度,而在西藏中部和西北部为广阔的高原腹地,地面起伏小,气候、植被相对单调, $SOCD$ 变化相对较小,因此土壤样点密度对估算结果可靠性的影响稍小。就各地区样点分布的平均密度($\text{个}/10^4 \text{ km}^2$)而言,以拉萨最大(84.6),其后依次是山南(53.9)、昌都(41.3)、日喀则(40.4)、林芝(26.0)、那曲(12.8)和阿里(7.7),这与各地区 $SOCD$ 的变化幅度基本相符。就土壤类型而言,垦殖率高的褐土、潮土、冷棕钙土的样点密度高,分别为 1521、1122、584 $\text{个}/10^4 \text{ km}^2$, $SOCD$ 变异系数(CV)分别为 46.2%、54.4%、41.1%。分布广而面积最大(部分在无人区)但 $SOCD$ 低的寒钙土的样点密度低,平均 6.4 $\text{个}/10^4 \text{ km}^2$,但其 $SOCD$ 的 CV 为 37.4%;面积大而 $SOCD$ 较高的草毡土、黑毡土的样点密度分别为 24.3、79.4 $\text{个}/10^4 \text{ km}^2$,其 $SOCD$ 的 CV 分别为 52.0%、51.6%。由此可见,上述土类虽然样点密度相差很大,但 $SOCD$ 的 CV 大多在 50%左右,彼此差别并不大。

表 4 西藏各土壤有机碳密度带的碳储量($SOCR$)和丰度指数(R)

Table 4 $SOCR$ and richness rate index (R) of the four $SOCD$ zones in Tibet

碳密度带 $SOCD$ zones	面积 Area		$SOCD$ (kg m^{-2})	$SOCR$		R
	(10^4 km^2)	(%)		(10^7 t)	(%)	
	10.01	9.1	21.08	211.09	25.7	2.82
	39.70	36.1	10.26	407.44	49.5	1.37
	45.09	41.0	3.94	177.74	21.6	0.53
	15.18	13.8	1.74	26.49	3.2	0.23
总体 Total	109.98	100.00	7.48	822.76	100.0	—

3 结论

本文根据西藏土壤普查汇总的 2607 个定位剖面资料和数字化处理的 1 200 万西藏土壤图,以制图单元土壤亚类为基础分地区估算 $SOCD$ 和 $SOCR$,并对土壤有机质进行石砾因素矫正,据此探讨其空间分布特征。

(1) 西藏土壤全剖面(采样深度)的 $SOCD$ 变化于 $0.48 \sim 50.71 \text{ kg m}^{-2}$,平均 7.48 kg m^{-2} ,低于全国土壤的平均水平,属于我国土壤低碳密度地区之一。其中, $0 \sim 20 \text{ cm}$ 表层 $SOCD$ 平均为 4.27 kg m^{-2} ,占全剖面的 57%,高于全国平均水平,反映西藏土壤碳库具有较高的潜在不稳定性,即对环境气候变化的较大敏感性。

(2) 西藏 $SOCD$ 随土壤类型而变化,面积占 95% 以上的地带性土壤,其 $SOCD (\text{kg m}^{-2})$ 变化的大小顺序是:山地铁铝土(29.2) > 山地淋溶土(16.6) > 高山草甸型土壤(12.2) > 山地半淋溶土(9.2) > 高山草原型土壤(3.7) > 高山寒冻土(1.6) 和荒漠土(1.3)。

(3) 西藏 $SOCD$ 具有独特的水平地带分布,即由藏东南向西北逐次降低,由此可以划分为高()、中()、低()、极低() 4 个碳密度带,其平均 $SOCD$ 分别约为 21 kg m^{-2} 、 10 kg m^{-2} 、 4 kg m^{-2} 和 $< 2 \text{ kg m}^{-2}$ 。各碳密度带又有不同垂直分布,总的趋势是由复杂到简单,但均以最高位置的寒冻土极低碳密度为终点。

(4) 西藏 $SOCR$ 总计为 $822.76 \times 10^7 \text{ t}$ (8.23Pg),约占全国 $SOCR$ 总量(按 90 Pg 计)的 9.14%;其中土壤表层 20cm 的 $SOCR$ 为 $469.08 \times 10^7 \text{ t}$ (4.69Pg)。西藏 $SOCR$ 的空间分布极不平衡,既与各地土壤的 $SOCD$ 有关,也与土壤分布面积有关。首先, $SOCR$ 较大的 4 类土壤是草毡土、寒钙土、黑毡土(均为高山草地土壤)和暗棕壤(山地森林土壤),其 $SOCR$ 分别占西藏全区总量的 24%、22%、15% 和 9%,合计占 70% 以上,因而是西藏地区 $SOCP$ 的主要支撑土壤。其次,各土壤有机碳密度带 $SOCR$ 占西藏全区总量的相对比例, 、 、 、 带分别约为 25%、50%、22%、3%,而反映土壤储碳能力的丰度指数(R)则分别为 2.82、1.37、0.53、0.23,与 $SOCD$ 的变化趋势一致。其中, 、 带的土壤面积约占全区总面积的 45%,但其 $SOCR$ 却占全区总量的 75%,所以是西藏 $SOCP$ 的主体。再次,就各地区的 $SOCR$ 而言:以那曲地区最大(2.19Pg),拉萨地区最小(0.31Pg);但各地区的储碳能力(R)则是:林芝 > 山南 > 拉萨 > 昌都 > 日喀则 > 那曲 > 阿里,主要决定于各地区优势土壤类型的丰度指数。

References:

- [1] Lal R, Kimble J M, Follett R F. Soil Processes and The Carbon Cycle. CRC Press LLC, 1997.
- [2] Torn M S, Trumbore S E, Chadwick O A, *et al.* Mineral control of soil organic carbon storage and turn over. Nature, 1997, 389: 170 ~ 173.
- [3] Mohan K Wail, Faith Evrendilek, Tristram Owatts, *et al.* Assessing terrestrial ecosystem sustainability: Usefulness of regional carbon and nitrogen models. Nature & Resources, 1999, 35(4): 21 ~ 33.
- [4] Doran J W, Jones A J, Arshad M A, *et al.* Determinants of Soil Quality and Health, Soil Quality And Soil Erosion. CRC Press, 1999. 17 ~ 36.
- [5] Cheng G D, Li P J, Zhang X S, *et al.* Influences of Climatic Change on Snow Cover, Glaciers and Frozen Soils in China. Lanzhou: Gansu Cultural Press, 1997.
- [6] Kang X C. Characteristics of climatic changes over last 40 years in Qinghai-Xizang Plateau. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(Suppl.): 281 ~ 288.
- [7] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China. In: Wang G C, Wen Y P eds. Monitoring and Relevant Process of Greenhouse Gas Concentration and Emission. Beijing: China Environment Sciences Publishing House, 1996. 109 ~ 128.
- [8] Wang G X, Cheng G D, Shen Y P. Soil organic carbon pool of grasslands on the Tibetan Plateau and its global implication. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 694 ~ 699.
- [9] Land Management Bureau of Tibet Autonomous Region. Soil Species of Tibet. Beijing: Science Press, 1994.
- [10] LI J P, YAO Z F, LIU S Q, *et al.* Soil Resources of Tibet Autonomous Region. Beijing: Science Press, 1994.
- [11] Liang X Y. Soil Resource of Shannan in Tibet. Beijing: China Agricultural Science & Technology Press, 1991.
- [12] Yan Y L. Soil Resource of Zigaze in Tibet. Beijing: China Agricultural Science & Technology Press, 1993.
- [13] Zhang B, Li S H, Xiao D Z. Soil Resource of Ali in Tibet. Beijing: China Agricultural Science & Technology Press, 1991.
- [14] Wang H Q, Wang J X. Soil Resource of Shannan in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993.
- [15] Liu S Q, Su D X, Li S, *et al.* Soil Resource of Qamdo in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1993.
- [16] Yang F, Liu M. Soil Resource of Linzhi in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.

- [17] Zhang T Z, Yao Z F. Soil Resource of Naqu in Tibet. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992.
- [18] National Soil Survey Office. Soils of China. Beijing: China Agriculture Press, 1998.
- [19] Land Management Bureau of Tibet Autonomous Region. Soil Map of Tibet Autonomous Region, China (1:2000000). Beijing: Science Press, 1993.
- [20] Kern, J. S. Spatial patterns of soil organic carbon in the contiguous united states. Soil Sci. Soc. AM. J., 1994, 58:439~455.
- [21] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 1996, 47: 151~163.
- [22] Wang S Q, Zhou C H, Li K R, *et al.* Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China. Acta Geographica Sinica, 2000, 55 (5):533~544.
- [23] Schwartz D, Namri M. Mapping the total organic carbon in the soils of the Congo. Global and Planetary Change, 2002, 3: 77~93.
- [24] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1): 36~43.
- [25] Hang X X, Ni J P, Gao M, *et al.* Estimating soil organic carbon pool of Chongqing area and its spatial distribution. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19 (1):54~58.
- [26] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: facing the challenge of global change and food security. Advance in Earth Science, 2005, 20(4): 384~393.
- [27] Jenkinson D S, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of Rothamsted classical experiments. Soil Sci., 1977, 125: 298~305.
- [28] Sombroek W G, Nachtergaele F O, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. Ambio., 1993, 22(7): 417~426.
- [29] Song G H, Li L Q, Pan G X, *et al.* Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation. Biogeochemistry, 2005, 74(1): 47~62.
- [30] Gao Y X, Chen H Z, Wu Z D, *et al.* Soils of Tibet. Beijing: Science Press, 1985.
- [31] Comprehensive Scientific Survey Team of the Qinghai-Tibet Plateau, CAS. Climate of Tibet. Beijing: Science Press, 1984.
- [32] Comprehensive Scientific Survey Team of the Qinghai-Tibet Plateau, CAS. Vegetation of Tibet. Beijing: Science Press, 1984.
- [33] Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects. Journal of Desert Research, 2002, 22(3): 220~228.

参考文献:

- [5] 程国栋,李培基,张祥松,等. 气候变化对中国积雪、冰川和冻土的影响评价. 兰州:甘肃文化出版社,1997.
- [6] 康兴成. 青藏高原地区近40年来气候变化的特征. 冰川冻土, 1996, 18(增刊):281~288.
- [7] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义. 王庚辰,温玉璞. 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.
- [8] 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):694~699.
- [9] 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.
- [10] 李建平,姚祖芳,刘世全,等. 西藏自治区土壤资源. 北京:科学出版社,1994.
- [11] 梁显有主编. 西藏山南土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1991.
- [12] 阎银良主编. 西藏日喀则地区土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1993.
- [13] 张斌,李盛湖,肖笃志主编. 西藏阿里土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1991.
- [14] 王浩清,王敬轩主编. 西藏拉萨土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1993.
- [15] 刘世全,苏大学,李爽,等. 西藏昌都地区土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1993.
- [16] 杨峰,刘敏主编. 西藏林芝地区土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1992.
- [17] 张天增,姚祖芳主编. 西藏那曲地区土地资源. 北京:中国农业科技出版社,1992.
- [18] 全国土壤普查办公室(席承藩主编). 中国土壤. 北京:中国农业出版社,1998.
- [19] 西藏自治区土地管理局. 西藏自治区土壤资源图 1:200万. 北京:科学出版社,1993.
- [24] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41(1):36~43.
- [25] 黄雪夏,倪九派,高明,等. 重庆市土壤有机碳库的估算及其空间分布特征. 水土保持学报, 2005, 19(1):54~58.
- [26] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究:全球变化和国家粮食安全. 地球科学进展, 2005, 20(4):384~393.
- [30] 高以信,陈鸿昭,吴志东,等. 西藏土壤. 北京:科学出版社,1985.
- [31] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏气候. 北京:科学出版社,1984.
- [32] 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏植被. 北京:科学出版社,1984.
- [33] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. 中国沙漠, 2002, 22(3):220~228.