

黄土高原不同土壤类型有机碳密度与储量特征^①

付东磊¹, 刘梦云¹, 刘林¹, 张琨¹, 左进香²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 云南农业大学资源环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 土壤有机质的理化特性是黄土高原地区水土保持及生态修复的重要物质基础, 充分了解黄土高原区不同土壤类型的有机碳密度与储量, 对生态建设具有重要的实际意义。利用第二次全国土壤普查数据, 对黄土高原不同土壤类型 0~20 cm 表层土体有机碳密度及储量进行估算, 并分析两者的空间特征。结果表明: 黄土高原区土壤有机碳密度加权平均值为 $2.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 棕壤碳密度值最高, 为 $15.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 风沙土最低, 仅为 $0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 空间上呈中间低四周高的分布格局。黄土高原地区总碳储量为 $1\ 239.85 \text{ Tg}$ ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$), 灰褐土及黄绵土碳储量较高, 两者占总体的 46.86%, 灰漠土、冻漠土、碱土较低, 总量仅占 0.17%, 空间上呈由西北向东南递增的分布规律。黄绵土、风沙土在黄土高原区分布较广, 但两者碳密度较低。因此, 在今后的生态修复措施中, 提高两者有机碳含量十分关键。

关键词: 土壤类型; 有机碳密度; 有机碳储量; 黄土高原

碳是自然界中与人类生存密切相关的重要物质, 它在水圈、大气圈、岩石圈、冰冻圈和生物圈中动态循环^[1]。全球陆地约 $1\ 500 \text{ Gt}$ ($1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ t}$) 的碳以有机质形态存储于土壤(土层深度为 1 m), 是生物储量的 3 倍, 大气储量的 2 倍, 如此数量的有机质不仅是土壤肥力的物质基础, 而且是研究全球碳循环和气候变化的核心内容, 其较小幅度的变化都会引起大气中 CO_2 浓度的巨大变化^[2]。因此, 开展对土壤有机碳的研究具有重要的生态学意义。国内外学者在土壤有机碳方面开展了大量研究, 主要集中在土壤碳循环^[3-5]、有机碳密度计算方法^[6-7]、不同尺度下土壤有机碳储量估算^[8-11]、土地利用方式对土壤有机碳的影响^[12-15] 4 个方面。

黄土高原地区人类活动历史悠久, 生态系统退化严重, 是全球水土流失最为强烈的地区。该区对我国西北乃至中部地区均有重要的影响。

有关黄土高原地区的研究有很多, 从水土流失角度, 分析了水土流失的发生机理及其对土壤性质和生产力的影响^[16-17]; 从植被重建角度, 研究了生态用水、土壤干层的形成、土壤质量变化等^[18-19]; 从农业生产的角度, 研究了土壤性质和生产能力^[20]。这些研究为黄土高原地区土地合理利用与环境保护提供了重要的理论与现实依据。近年来开展的土壤

有机碳方面的研究, 主要集中在小流域、小尺度及土地利用方式转变下的有机碳变化^[21-23], 对黄土高原地区土壤有机碳储量估算的研究相对较少, 在黄土高原地区估算不同土壤类型下有机碳密度、碳储量的研究鲜见报道。本文利用第二次土壤普查资料及相关数据, 估算黄土高原区不同土壤类型土壤有机碳储量。其结果可以为生态建设之后的环境效益评价提供土壤背景资料, 对未来区域生态系统的变化趋势作出合理预测。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国西北地区, 地处 $34^\circ \sim 41^\circ \text{ N}$, $101^\circ \sim 114^\circ \text{ E}$ 。其范围西起青海湖, 东至太行山, 北起长城, 南抵秦岭, 包括青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西及河南 7 省(自治区), 总面积 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。处于干旱—半干旱气候带, 年均气温 $3.6 \sim 14.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 年均降水量 $185 \sim 750 \text{ mm}$, 大部地区海拔高度 $500 \sim 1\ 500 \text{ m}$ 。主要土壤类型为黄绵土、风沙土、粗骨土、灰褐土、灰钙土及褐土(图 1)。土壤固着力差, 夏季暴雨集中时期易造成严重的水土流失, 生态极其脆弱。

① 收稿日期: 2012-11-13; 修订日期: 2013-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30872073); 西北农林科技大学科研业务费专项资金(QN2011156)

作者简介: 付东磊(1986-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土地资源方面的研究。E-mail: fudl712100@163.com

通讯作者: 刘梦云。E-mail: lmy471993@163.com

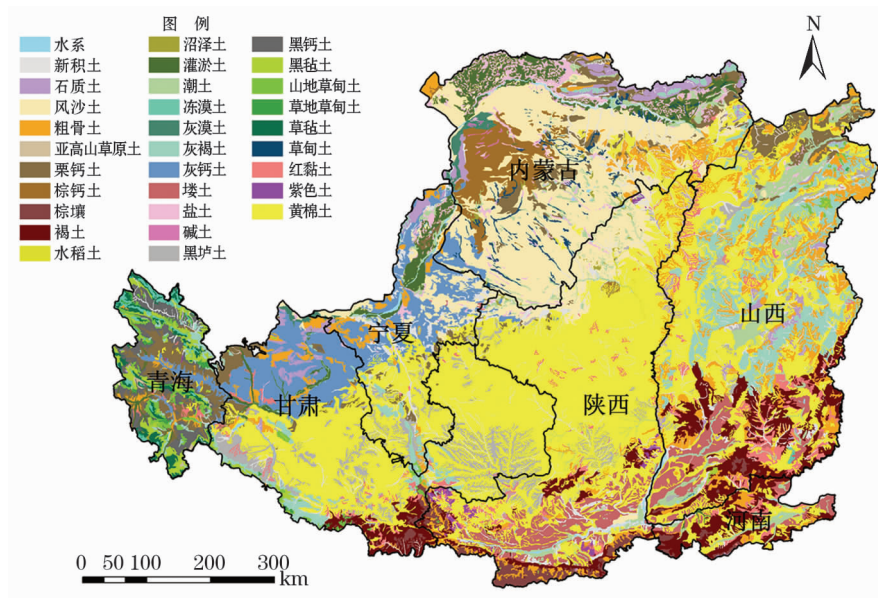


图1 黄土高原土壤类型

Fig. 1 Soils on the Loess Plateau

1.2 数据来源及有机碳密度与储量计算方法

本文数据主要来自于我国第二次土壤普查成果《中国土种志》^[24],其中与黄土高原地区相关的土壤类型共30种,剖面数据1504个,有少量地方数据缺失,我们参考了《陕西土种志》^[25]、《陕西土壤》^[26]等。

土壤有机碳密度计算公式:

$$\text{SOCD} = (1 - \theta\%) \rho \cdot 0.58 \cdot C \cdot D / 100$$

式中: $\theta\%$ 为 $>2\text{ mm}$ 石砾百分含量; ρ 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);0.58为Bemmelin换算系数; C 为土壤有机质含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); D 为土层厚度(cm)。

土壤有机碳储量SOCS是土壤有机碳密度与分布面积的乘积:

$$\text{SOCS} = \text{SOCD} \times \text{Area}$$

1.3 相关数据处理方法

在估算黄土高原土壤碳密度时,各土类有机碳密度由其亚类碳密度加权值确定,不同土类平均碳密度是通过面积加权法计算;各土类平均容重及有机碳含量取其亚类的平均值;本文参考刘伟等^[27]的标准,取石砾含量0.5%参与计算;在划分土壤碳密度、碳储量区间时,借鉴刘京等的划分标准^[15,28],结合研究区有机碳密度的特征,将有机碳密度分为: $<0.9\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $0.9 \sim 1.3\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.3 \sim 4.8\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $4.8 \sim 13\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $>13\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 5个区间,将土壤有机碳储量划分为: $<20\text{ Tg}$ 、 $20 \sim 40\text{ Tg}$ 、 $40 \sim 180\text{ Tg}$ 、 $180 \sim 380\text{ Tg}$ 、 $>380\text{ Tg}$ 5个区间,同时将研

究区水域碳密度、碳储量归为最低区间。

研究区土壤碳密度与碳储量空间分布图运用ArcGIS 9.3制作,数据基本统计运用Excel 2003处理。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型有机碳含量

表1是黄土高原区30种土壤类型基本状况。可以看出,黄土高原地区黄绵土、风沙土、粗骨土分布较广,占总面积的49.68%;亚高山草原土、碱土、水稻土及草地草甸土的面积较小,仅占0.35%。平均容重为 $1.29\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,不同土壤类型差异较大,最高的为亚高山草原土,达到 $1.54\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最低为灌淤土及黑垆土,仅为 $1.10\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。黄土高原表层土壤有机碳平均含量为 $14.52\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。棕壤、灰褐土、黑毡土较高,分别为 $60.22\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $50.41\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $46.90\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;其次为草地草甸土、草毡土及亚高山草原土,分别为 $44.10\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $43.92\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $28.16\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;新积土、盐土、粗骨土、棕钙土、红黏土、灰漠土、碱土、冻漠土及风沙土含量均 $<4\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中风沙土最低,仅 $0.92\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 表层土壤有机碳密度

2.2.1 不同区间有机碳密度空间分布 由图2可知,黄土高原区土壤碳密度呈现中间低四周高的分

表 1 黄土高原不同土壤类型有机碳特征

Tab. 1 Organic carbon characteristics in different soils on the Loess Plateau

土壤类型	容重 /(g·cm ⁻³)	平均有机碳含量 /(g·kg ⁻¹)	碳密度 /(kg·m ⁻²)	面积 /(km ²)	面积百分比 /%	碳储量 /Tg	碳储量百分比 /%
草地草甸土	1.16	44.10	9.72	799.74	0.13	7.77	0.63
草甸土	1.28	4.19	1.02	3 604.27	0.58	3.68	0.30
草毡土	1.39	43.92	11.60	3 688.50	0.59	42.78	3.45
潮土	1.50	4.00	1.14	18 673.00	3.01	21.29	1.72
粗骨土	1.25	3.41	0.81	41 971.29	6.77	34.14	2.75
冻漠土	1.29	1.26	0.31	2 008.71	0.32	0.62	0.05
风沙土	1.36	0.92	0.24	69 371.92	11.19	16.83	1.36
灌淤土	1.10	6.70	1.40	14 322.96	2.31	20.01	1.61
褐土	1.17	8.19	1.82	31 713.30	5.11	57.84	4.66
黑钙土	1.25	20.25	4.81	7 289.31	1.18	35.05	2.83
黑垆土	1.10	4.83	1.01	21 514.76	3.47	21.82	1.76
黑毡土	1.47	46.90	13.10	5 560.53	0.90	72.87	5.88
红黏土	1.34	3.10	0.79	13 746.46	2.22	10.88	0.88
黄绵土	1.19	4.07	0.92	196 700.32	31.72	181.54	14.64
灰钙土	1.29	4.65	1.14	32 623.86	5.26	37.03	2.99
灰褐土	1.21	50.41	11.59	34 476.95	5.56	399.43	32.22
灰漠土	1.25	2.40	0.57	2 376.30	0.38	1.36	0.11
碱土	1.32	1.79	0.45	295.09	0.05	0.13	0.01
栗钙土	1.24	5.60	1.32	26 251.81	4.23	34.64	2.79
垆土	1.20	4.65	1.06	19 762.36	3.19	21.04	1.70
山地草甸土	1.25	27.75	6.59	3 658.26	0.59	24.10	1.94
石质土	1.27	12.02	2.90	10 839.69	1.75	31.49	2.54
水稻土	1.32	9.37	2.35	796.37	0.13	1.87	0.15
新积土	1.29	3.88	0.95	25 676.86	4.14	24.34	1.96
亚高山草原土	1.54	28.16	8.24	256.38	0.04	2.11	0.17
盐土	1.33	3.64	0.92	10 407.76	1.68	9.52	0.77
沼泽土	1.22	15.75	3.65	1 000.66	0.16	3.65	0.29
紫色土	1.44	6.32	1.73	1 237.52	0.20	2.14	0.17
棕钙土	1.39	3.22	0.85	12 387.74	2.00	10.49	0.85
棕壤	1.36	60.22	15.56	7 032.04	1.13	109.39	8.82

布格局。碳密度 $< 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的低密度区主要集中在内蒙古北部、陕西北部区域,此外,还零星的分布于山西全境,占总面积的 22.94%; $0.9 \sim 1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 区集中分布于陕西、甘肃、宁夏的大部地区,占 53.06%; 青海省东部及山西省南部部分区域的有机碳密度在 $1.3 \sim 4.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 占 13.89%; $4.8 \sim 13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 区位于山西中西部及青海东部地区,占 8.09%; 黄土高原西南及南部边缘地区的土壤碳密度 $> 13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 分布面积较小,仅占 2.02%。

2.2.2 不同土壤类型有机碳密度 从表 1 可以看出,研究区土壤有机碳密度以棕壤最高,达到 $15.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 最低的为风沙土,仅为 $0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 这与土壤有机碳含量相一致,平均碳密度为 $2.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。碳密度 $< 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围内分布着风沙土、粗骨土、冻漠土、碱土、灰漠土、红

黏土及棕钙土这些有机碳含量较低的土类,其中风沙土及粗骨土所占比例最大,两者面积占该区间总面积的 78.32%; 黄绵土、盐土、新积土、黑垆土、草甸土、垆土、潮土及灰钙土的碳密度在 $0.9 \sim 1.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中,黄绵土占该区间面积的 59.79%; 栗钙土、灌淤土、紫色土、褐土、水稻土、石质土及沼泽土碳密度在 $1.3 \sim 4.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 灰褐土在 $4.8 \sim 13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围所占比例最大,达到了 68.72%, 除此之外,该范围内还分布有黑钙土、山地草甸土、亚高山草原土、草地草甸土及草毡土; 黑毡土与棕壤碳密度较高,均高于 $13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2.3 表层土壤有机碳储量

2.3.1 不同区间有机碳储量空间分布 由图 3 可以看出,黄土高原区有机碳储量整体上呈现由西北向东南递增的趋势,有机碳储量 $< 20 \text{ Tg}$ 区集中于

黄土高原西北大部地区, 占总面积的 19.08%; 除内蒙古西部外, 20 ~ 40 Tg 范围在整个研究区均有分布, 占 35.90%; 黄土高原西部、南部及东部的边缘地区有机碳储量在 40 ~ 180 Tg, 其中, 以甘肃南部、山西南部、陕西关中地区最为集中, 占 7.74%; 宁夏南部、甘肃南部与陕西北部所组成的“W”形区域碳储量在 180 ~ 380 Tg, 占 31.72%; 有机碳储量 > 380 Tg 的区域分布于山西中西部, 占 5.56%。

2.3.2 不同土壤类型有机碳储量 由表 1 可以看出, 黄土高原区总有机碳储量为 1 239.85 Tg, 不同土壤类型差异明显, 储量最高的为灰褐土, 达

399.43 Tg, 其次为黄绵土, 储量为 181.54 Tg, 储量最低的为碱土, 仅为 0.13 Tg。在不同的碳储量区间中, 有 13 个土壤类型的有机碳储量 < 20 Tg, 其中风沙土占该级别面积比例最大, 为 58.65%, 其余为红黏土、棕钙土、盐土、草甸土、灰漠土、冻漠土、紫色土、沼泽土、草地草甸土、水稻土、碱土及亚高山草原土; 有机碳储量在 20 ~ 40 Tg 的有 11 个土壤类型, 分别为粗骨土、灰钙土、栗钙土、新积土、黑垆土、塿土、潮土、灌淤土、石质土、黑钙土、山地草甸土; 40 ~ 180 Tg 区内分布着褐土、棕壤、黑毡土、草毡土 4 种土类, 其中以褐土所占比例最大, 占 66.08%; 180 ~

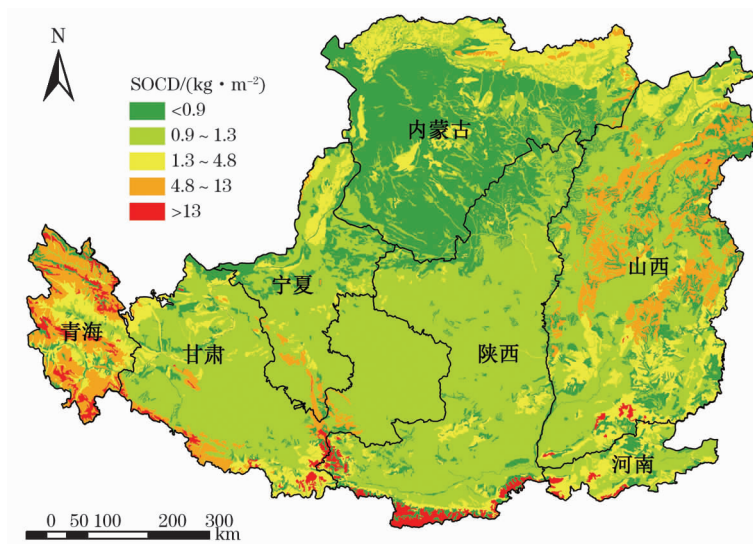


图 2 黄土高原土壤有机碳密度空间分布

Fig. 2 SOCD spatial distribution of soils on the Loess Plateau

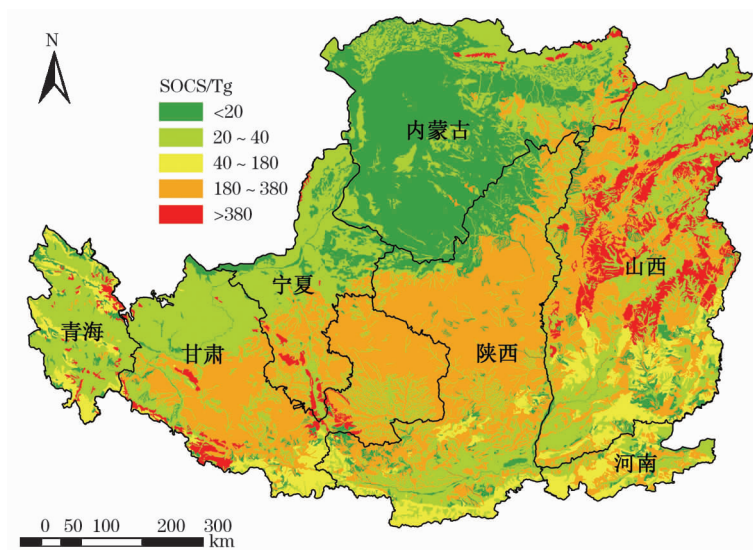


图 3 黄土高原土壤有机碳储量空间分布

Fig. 3 SOCS spatial distribution of soils on the Loess Plateau

380 Tg 与 >380 Tg 两个范围分别只有一种土类,为黄绵土及灰褐土。

3 讨论

3.1 不同土类表层土壤有机碳密度特征

黄土高原表层土壤有机碳密度总体上呈现中间低四周高的特征(图1)。较低碳密度范围($<4.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)分布有22种土壤类型(表1),面积占总面积的89.87%,其中新积土、盐土、粗骨土等10个土类碳密度甚至不足 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,这在一定程度上反映了研究区碳密度较低现状。这些土壤分布的植被类型以草本植物居多,典型植被是内蒙古西部分布的油蒿、戈壁针茅、苦豆子及陕西北部的本氏针茅、白刺花等,这些植被回归土壤的枯枝落叶量较少,因而直接影响了碳密度。在该碳密度区间农用地土壤类型中,以黄绵土及风沙土分布最广,但是两者的碳密度仅为 $0.92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 $0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于肥料投入少,农作物地上部大部分被收割,加之部分地区过度放牧,导致两者有机碳密度较低^[29-30]。由于分布面积大,提高黄绵土及风沙土的有机碳含量对农业生产有重要的实际意义。含量较高($>4.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)的区域仅占约1/10,包括棕壤、黑毡土、草毡土等土壤类型,集中分布于山西省东太行山脉、陕西省境内秦岭山脉以北沿线、宁夏境内的六盘山等区域。这些区域植被覆盖率较高,乔、灌植被数量较多,年回归土壤的植物生物量较大,使这些土壤类型的有机碳密度较高。

解宪丽等^[11]研究表明,全国范围表层0~20 cm 土体有机碳密度在 $0.27 \sim 53.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,平均为 $4.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。参考此标准,本研究结果仅为全国平均水平的43.86%。徐香兰等^[28]研究得出,黄土高原表层土体平均碳密度 $2.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,与本研究结果稍有出入。其原因可能有三,其一,选取研究区的面积不同,而这直接影响有机碳密度的加权值,进而导致碳储量的差异,本研究统计的黄土高原面积明显高于徐香兰等^[28];其二,本研究取石砾含量0.5%参与计算过程,这必然会导致结果的差异性;最后,参考资料及数据来源不同,会导致一定的偏差。

3.2 不同土类表层土壤有机碳储量特征

黄土高原土壤有机碳储量表现为由西北至东南逐渐增加、同一储量区间集中分布的地带性特征。

从不同土壤类型碳储量而言,0~40 Tg 范围内有24个土壤类型,面积占总面积的54.98%,而碳储量仅为总体的30.33%,说明这些土壤的储碳能力较低。棕壤、灰褐土由于面积较大且碳密度较高,故碳储量较大,两者占到了总碳储量的41.04%;粗骨土、红黏土、棕钙土等虽面积较大,但碳密度均处于最低区间,故碳储量较低;黑毡土、草毡土虽然面积小,但由于碳密度达到了 $13.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 $11.60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,故储量较高。

黄绵土和风沙土是黄土高原区最主要的土壤类型,两者面积占研究区面积的42.91%,但两者土壤碳密度明显低于全区平均值,碳储量之和仅占总量的16.00%,因此,今后黄土高原区生态恢复工程的重点是提高这两个土壤类型的有机碳含量。

经解宪丽等^[11]统计,全国表层0~20 cm 土体总碳储量为27.4 Pg($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$)。本研究统计的研究区总碳储量为1 239.85 Tg,占全国总储量的4.53%,由于研究区土壤面积占全国土壤面积的7%左右,这在一定程度上反映了黄土高原有机碳储量较低的状况。本结果与徐香兰等^[28]所得1 068 Tg的结论相比高出16.09%,可能是由于统计面积不同造成的。

4 结论

黄土高原各土类碳密度加权平均值为 $2.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,密度最高的为棕壤,最低的为风沙土,在空间上呈现中间低四周高的分布特征;土壤有机碳储量为1 239.85 Tg,最高的为灰褐土,最低的为碱土,在空间上呈现由西北到东南逐渐升高的趋势。土壤类型是黄土高原区土壤碳密度的重要影响因素,集中体现在黄绵土和风沙土上,两者虽然面积较大,但碳密度较低,因此,在今后的环境恢复措施中,应着重提高这两种土壤类型的有机碳含量。

参考文献(References):

- [1] Post W M, Peng T H, Emanuel W R, et al. The global carbon cycle [J]. *American Scientist*, 1990, 78: 310-326.
- [2] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 1991, 351: 304-306.
- [3] Buringh P. Organic carbon in soil of the world; The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle [J]. *Scope*, 1984, 23: 91-109.

- [4] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*,1995,1:275-287.
- [5] 李东,高明. 土壤有机碳循环研究进展[J]. *江西农业学报*,2008,20(2):60-63. [Li Dong,Gao Ming. Research progress of soil organic carbon recycle[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*,2008,20(2):60-63.]
- [6] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1982,46:1118-1119.
- [7] 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[J]. *土壤学报*,2003,35(3):236-241. [Sun Weixia, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng. Distribution pattern and density calculation of soil organic carbon in profile[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2003,35(3):236-241.]
- [8] Eswaran H, Vandenberg E, Reich P. Organic carbon in soil of the world[J]. *Soil Science Society of America Journal*,1993,57:192-194.
- [9] 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[J]. *应用生态学报*,2003,14(9):1499-1502. [Gan Haihua, Wu Shunhui, Fan Xiudan. Reserves and spatial distribution characteristics of organic carbon in Guangdong province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2003,14(9):1499-1502.]
- [10] 田玉强,欧阳华,徐兴良,等. 青藏高原土壤有机碳储量与密度分布[J]. *土壤学报*,2008,45(5):933-942. [Tian Yuqiang, Ou Yanghua, Xu Xingliang, et al. Distribution characteristic of soil organic carbon storage and density on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*,2008,45(5):933-942.]
- [11] 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[J]. *土壤学报*,2004,41(1):35-43. [Xie Xianli, Sun Bo, Zhou Huizhen, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2004,41(1):35-43.]
- [12] Rodriguez-Murillo J C. Organic carbon content under different types of land use and soil in Peninsular Spain[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2001,33:53-61.
- [13] Alexeyev V, Birdsey R, Stakanov, et al. Carbon in vegetation of Russian forests: Methods to estimate storage and geographical distribution[J]. *Water, Air and Soil Pollution*,1995,82:271-282.
- [14] 程积民,程杰,杨晓梅,等. 黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征[J]. *生态学报*,2012,32(1):226-237. [Cheng Jimin, Cheng Jie, Yang Xiaomei, et al. Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2012,32(1):226-237.]
- [15] 刘京,常庆瑞,陈涛,等. 陕西省土壤有机碳密度空间分布及储量估算[J]. *土壤通报*,2012,43(3):656-661. [Liu Jing, Chang Qingrui, Chen Tao, et al. Spatial distribution characteristics and estimation of soil organic carbon density and storage in Shaanxi province, in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*,2012,43(3):656-661.]
- [16] 张成娥,郑粉莉. 林地开垦后坡面土壤元素的时空变化特征[J]. *应用生态学报*,2002,13(6):672-674. [Zhang Cheng'e, Zheng Fenli. Temporal and spatial change characteristics of soil elements in reclaimed slope forestland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2002,13(6):672-674.]
- [17] 查小春,唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化[J]. *水土保持学报*,2001,15(3):20-23. [Zha Xiaochun, Tang Keli. Temporal change about man-made accelerated erosion and soil physical and force properties of reclaimed forest lands in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2001,15(3):20-23.]
- [18] 杨文治,余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京:科学出版社,1992. [Yang Wenzhi, Yu Cunzu. Region Management and Evaluation on the Loess Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1992.]
- [19] 宋桂琴. 黄土高原土地资源研究的理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996. [Song Guiqin. Theory and Practice of Land Resources Research on the Loess Plateau [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1996.]
- [20] 傅伯杰,郭旭东,陈利顶,等. 土地利用变化与土壤养分的变化:以河北省遵化县为例[J]. *生态学报*,2001,21(6):927-931. [Fu Bojie, Guo Xudong, Chen Liding, et al. Land use changes and soil nutrient changes: A case study in Zunhua County, Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2001,21(6):927-931.]
- [21] 党亚爱,李世清,王国栋,等. 黄土高原典型土壤有机碳和微生物碳分布特征的研究[J]. *自然资源学报*,2007,22(6):936-945. [Dang Ya'ai, Li Shiqing, Wang Guodong, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and microbial biomass carbon on the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*,2007,22(6):936-945.]
- [22] 王小利,郭胜利,马玉红,等. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响[J]. *应用生态学报*,2007,18(6):1281-1285. [Wang Xiaoli, Guo Shengli, Ma Yuhong, et al. Effects of land use type on soil organic C and total N in a small watershed in Loess Hilly-gully Region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2007,18(6):1281-1285.]
- [23] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J]. *生态学报*,2007,27(6):2279-2287. [Li Yuyuan, Shao Ming'an, Zheng Jiyong, et al. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the Northern Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2007,27(6):2279-2287.]
- [24] 全国土壤普查办公室. 中国土种志[M]. 北京:中国农业出版社,1995. [National Soil Survey Office. Soil Species of China[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995.]
- [25] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土种志[M]. 陕西:陕西科技出版社,1993. [Shaanxi Soil Survey Office. Soil Species of Shaanxi [M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 1993.]
- [26] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京:科学出版社,1992. [Shaanxi Soil Survey Office. Soil in Shaanxi[M]. Beijing: Science Press, 1992.]

- [27] 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. [Liu Wei, Cheng Jimin, Chen Furong, et al. Characteristic of organic carbon density and organic carbon storage in the natural grassland of center Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(3): 425-431.]
- [28] 徐香兰,张科利,徐宪立,等. 黄土高原地区土壤有机碳估算及其分布规律分析[J]. 水土保持学报,2003,17(3):13-15. [Xu Xianglan, Zhang Keli, Xu Xianli, et al. Spatial distribution and estimating of soil organic carbon on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 13-15.]
- [29] 苏建红,朱新萍,王新军,等. 长期围栏封育对亚高山草原土壤有机碳空间变异的影响[J]. 干旱区研究,2012,29(6):997-1002. [Su Jianhong, Zhu Xinping, Wang Xinjun, et al. Effects of long-term enclosure on spatial variation of soil organic carbon content in the Bayanbulak subalpine steppe[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 997-1002.]
- [30] 荣井荣,李晨华,王玉刚. 长期施肥对绿洲农田土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 干旱区研究,2012,29(4):592-597. [Rong Jingrong, Li Chenhua, Wang Yugang. Effect of long-term fertilization on soil organic carbon and soil Inorganic carbon in oasis cropland[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 592-597.]

Organic Carbon Density and Storage in Different Soils on the Loess Plateau

FU Dong-lei¹, LIU Meng-yun¹, LIU Lin¹, ZHANG Kun¹, ZUO Jin-xiang²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2. College of Resources and Environment, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China)

Abstract: Soil organic carbon is an essential material foundation for controlling soil erosion and conserving ecological environment on the Loess Plateau. Adequate acquaintance of soil organic carbon density (SOCD) and soil organic carbon storage (SOCS) are of practically significance for large-scale ecological construction. In this paper, SOCD and SOCS in topsoil (0-20 cm) of different soils on the Loess Plateau were estimated based on the data of soil depth, soil organic matter content and bulk density, from the Second National Soil Survey. The results showed that the weighted mean of SOCD was $2.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, that of brunisolic soil was the highest ($15.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), and that of aeolian soil was the lowest ($0.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). In spatial distribution pattern, SOCD was low in the central area of the plateau but high in the marginal zone. The total SOCS on the Loess Plateau was 1 239.85 Tg, SOCS in grey cinnamonic soil and loessal soil were high and occupied 46.86% of the total, and that in grey desert soil, frozen desert soil and alkali soil were low and accounted for 0.17% only. SOCS in all soils increased gradually from the northwest to the southeast. Loessal soil and aeolian soil were extensively distributed on the Loess Plateau, but their SOCD were low. Therefore, it is very important to increase the organic carbon content in loessal soil and aeolian soil in ecological reconstruction on the Loess Plateau in the future.

Key words: soils; soil organic carbon density; soil organic carbon storage; the Loess Plateau