

青海省草地生态系统碳储量及其分布特征^{*}

张琛悦¹⁾ 赵霞^{1,2)†} 辛玉春³⁾ 唐文家⁴⁾ 王蕾¹⁾

(1)青海师范大学地理科学学院,青海省自然地理与环境过程重点实验室,青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室,青海师范大学自然资源与环境建模室,810008,青海西宁; 2)青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院-高原土壤信息科学研究团队,810008,青海西宁; 3)青海省草原总站,810008,青海西宁; 4)青海省生态环境监测中心,810099,青海西宁)

摘要 以第2次土壤普查形成的土壤图和草地资源清查图为本底,通过文献搜集及实测数据的结合,对青海省草地的碳储量进行了估算.结果表明:1)青海省草地生态系统碳储量约为6.12 Pg,平均碳面密度为18.08 kg·m⁻²,其中:地上植被碳储量(包括凋落物)为0.0097 Pg,平均碳面密度为0.03 kg·m⁻²;地下植被碳储量为0.0967 Pg,平均碳面密度为0.29 kg·m⁻²;土壤有机碳储量为6.01 Pg,平均碳面密度为17.76 kg·m⁻²;土壤储存的有机碳是植被的54倍多.2)从9大草地类来看,总碳储量从大到小依次为高寒草甸类(3.64 Pg)、高寒草原类(0.94 Pg)、低地草甸类(0.61 Pg)、温性草原类(0.35 Pg)、温性荒漠类(0.33 Pg)、温性荒漠草原类(0.08 Pg)、山地草甸类(0.08 Pg)、高寒草甸草原类(0.05 Pg)、高寒荒漠类(0.04 Pg);从5大功能区来看,总碳储量从大到小依次为三江源地区(3.95 Pg)、柴达木盆地(1.31 Pg)、祁连山地区(0.45 Pg)、青海湖流域(0.31 Pg)、河湟谷地(0.10 Pg).3)从9大草地类总碳面密度来看,低地草甸类的总碳面密度最高(57.37 kg·m⁻²),温性草原类的最低(14.04 kg·m⁻²);从5大功能区总碳面密度来看,柴达木盆地的最高(24.41 kg·m⁻²),河湟谷地的最低(14.05 kg·m⁻²).

关键词 草地生态系统;碳储量;碳面密度;植被;土壤有机碳;青海省

中图分类号 S812

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021105

随着碳中和、碳达峰的提出和推进,全球碳循环和对气候变化的影响成为各界广泛关注的热点问题^[1-3].草地分布广泛,是陆地生态系统的主体,也是重要的碳汇之一^[4-5],不仅承担着许多生态系统服务功能,如生物多样性保护、水源涵养、水土保持等,而且在碳固定和气候变化方面有着不容忽视的作用^[6-10].我国对草地碳的研究开始于20世纪90年代中期,不同资料数据来源的草地面积和分类不同,各草地类的地上地下生物量比例、含碳系数和土壤估算厚度、分层方法等有所区别,导致估算结果存在着较大的差异和不确定性^[11].

青海省位于青藏高原东北部,草地是主要的生态系统类型之一,但由于受自然和人为等因素影响,生态环境脆弱^[12].其平均海拔2000 m以上,对气候变化相对低海拔地区更为敏感,因此,对大气和陆地之间的碳循环具有更好的预示性^[13-15].以往对该地区草地生态系统碳储量的研究主要集中于高寒草甸、高寒草原等某一草地类或三江源区、青海湖流域等典型

区域的土壤或植被,缺乏对整个草地生态系统的估算以及分布特征的分析^[16].如:2007年常天军等^[17]对藏北高寒草地植被碳储量和碳面密度进行了估算;2015年苏玉波^[18]估算了黑河上游地区草地生态系统的碳储量;李东^[13]利用CENTURY模型估测了中科院海北站高寒草甸土壤有机碳储量;李洋^[19]和苏淑兰^[20]分别对三江源地区和青海湖流域草地生态系统碳进行了分析.

本文以第2次土壤普查形成的土壤图和草地资源清查图为本底,结合实测植被生物量和土壤数据以及中国知网文献搜集的土壤剖面数据,对青海省草地生态系统的碳储量状况进行了估算,并对其分布特征进行了分析,旨在了解青海省草地生态系统的碳储量在青藏高原乃至全国的重要地位,以便更合理地利用草地资源.

1 研究区概况

青海省(89°24'~103°02'E, 31°36'~39°05'N)位

^{*} 国家第二次青藏高原综合考察资助项目(2019QZKK0306);国家自然科学基金地区资助项目(42067001);青海省重大科技专项资助项目(2019-SF-A12).

† 通信作者:赵霞(1975—),女,博士,副教授.研究方向:资源环境与生态评估. E-mail: zhaoxia-qh@163.com

收稿日期:2021-04-30

于我国西北部内陆腹地,雄踞“世界屋脊”——青藏高原的东北部,全省平均海拔为4 058 m,西南部是唐古拉山和巴颜喀拉山,中部是昆仑山和阿尼玛卿山,东北部是祁连山,总体地势呈现西高东低、南北高中间低的态势^[21],属典型的高原大陆性气候,降水少,太阳辐射强,日温差较大。

根据青海省2015年草地资源清查图,天然草地面积约33.85万km²,占全省总土地面积的1/2。全省草地类型多样,分布广泛,高寒草甸类主要集中在三江源地区和祁连山地区,高寒草原类分布在三江源地区,温性草原类分布在青海湖周围,山地草甸类和低地草甸类主要分布在柴达木盆地,其余草地类型面积较小且分布不集中。青海省典型的土壤类型有草毡土、山地草甸土、寒钙土、寒冻土和沼泽土^[22],草地土壤类型主要有栗钙土、草毡土、薄草毡土、泥炭沼泽土和薄黑毡土。

2 数据来源及处理

2.1 草地数据 采用青海省草原总站提供的草地资源清查数据(2015年)作为草地类型和空间分布的依据,该数据详细记录了每种草地型的地上生物量实测数据(鲜质量)。首先依据全省天然草地分类系统^[23]将其进行归类和重组,形成草地类-草地组-草地型的草地分类体系,并按照《中国草地资源数据》^[24]不同草地类的干、鲜质量比系数(表1)将地上生物量鲜质量换算为地上生物量干质量。

表1 不同草地类的干质量与鲜质量比例以及根茎比

草地类型	干质量与鲜质量比例	根茎比
高寒草甸	1.0 : 3.2(沼泽化高寒草甸亚类为1.0 : 3.5)	10.99
高寒草原	1.0 : 3.0	14.46
高寒草甸草原	1.0 : 3.2	9.90
高寒荒漠	1.0 : 2.5	8.95
温性草原	1.0 : 3.0	6.14
温性荒漠	1.0 : 2.5(盐土质荒漠亚类为1.0 : 4.0)	8.95
温性荒漠草原	1.0 : 2.7	32.79
低地草甸	1.0 : 3.5(低地沼泽化草甸亚类为1.0 : 4.0)	14.08
山地草甸	1.0 : 3.5	6.23

草地地下生物量由地上生物量实测数据计算式为

$$m_d = m_f \cdot s, \quad (1)$$

式中: m_d 为地下生物量干质量; m_f 为地上生物量干质量; s 为草地地下与地上生物量的比例系数(即根茎比,表1),该系数依据青海省的草地分布以及综合多

文献所得^[25-29]。

2.2 土壤数据 以第2次土壤普查形成的土壤图作为土壤有机碳储量核算的面积和空间分布依据,土壤类型以该图提供的71个亚类作为基层分类单元,土壤实测剖面数据涵盖CNKI文献中提取的数据(2001—2019年,388个)、青海省土系调查数据(2014—2018年,161个)、第2次普查土种数据(1980—1990年代,163个)以及近年来团队项目积累数据(2014—2020年,749个)。利用土壤类型法估算土壤有机碳储量主要涉及土体厚度、面密度和有机质等参数,因此,本文按照“土壤剖面点-土壤图图斑-土壤亚类”的关系,按土壤类型取土壤厚度和土体碳面密度的平均值作为有机碳储量估算的依据,对于没有剖面覆盖的亚类以中国1:100万土壤图属性数据为依据。

2.3 草地生态系统碳储量的计算

2.3.1 植被碳储量 根据不同草地型地上、地下生物量和草地类含碳系数,计算不同草地类的植被碳储量,进而求得植被总碳储量。根据不同草地类的面积采用加权平均值计算不同草地类植被碳面密度,计算式分别为:

$$m_b(C) = \left(\sum_{j=1}^n \rho_{Ad,u} \cdot C_{jb} \cdot S_j + \sum_{j=1}^n \rho_{Ad,s} \cdot C_{jb} \cdot S_j \right) \times 10^{-12}, \quad (2)$$

$$m_{tot}(C) = \sum_{b=1}^n m_b(C), \quad (3)$$

$$\rho_{Ab} = \frac{m_b(C) \times 10^{12}}{S_b}, \quad (4)$$

式中: $m_b(C)$ 为b类草地的植被碳储量(Pg); $\rho_{Ad,u}$ 、 $\rho_{Ad,s}$ 分别为j草地型地上、地下生物量面干质量(kg·m⁻²); C_{jb} 为j草地型所对应的b草地类的生物量含碳系数,高寒类草地地上部分含碳系数取值0.43,地下部分取值0.37^[30],其他类地上和地下均取值0.45^[31]; S_j 为j草地型面积(m²); $m_{tot}(C)$ 为草地植被总碳储量(Pg); ρ_{Ab} 为b类草地的植被碳面密度(kg·m⁻²); S_b 为b草地类面积(m²)。

2.3.2 土壤有机碳储量 根据土壤面密度、厚度、有机质或有机碳含量^[32-36]分别计算每一土壤亚类所对应的每一个土壤剖面的有机碳面密度,取平均值作为该亚类的平均碳面密度;根据各土壤亚类有机碳面密度和面积计算土壤有机碳储量^[37],计算式分别为:

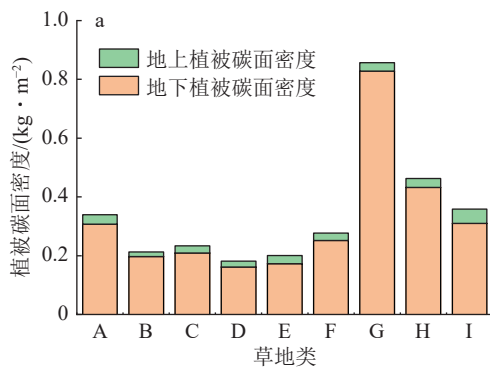
$$\rho_{AO}(C) = \sum_{i=1}^n H_i \cdot \rho_i \cdot w_i(C) \cdot 10^{-1}, \quad (5)$$

$$m_{jO}(C) = \frac{\bar{\rho}_{AO} \cdot S_j}{10^{12}}, \quad (6)$$

式中: $\rho_{AO}(C)$ 为土壤剖面有机碳面密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); H_i 为第 i 层土壤厚度 (cm); ρ_i 为第 i 层土壤密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); $w_i(C)$ 为第 i 层土壤有机碳质量分数, 可通过有机质质量分数乘以 Bemmelen 换算系数 0.58 得到; $m_{jO}(C)$ 为 j 土壤亚类有机碳储量 (Pg); $\bar{\rho}_{AO}$ 为 j 土壤亚类平均有机碳面密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); S_j 为 j 土壤亚类面积 (m^2).

3 结果与分析

3.1 青海省草地植被碳面密度和碳储量 青海省草

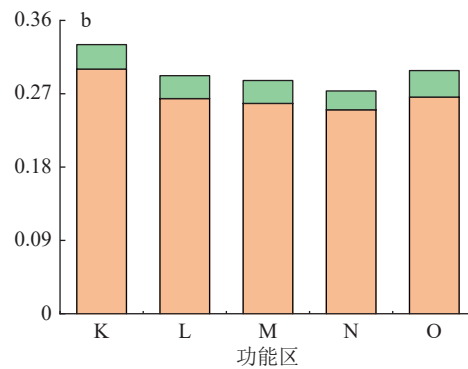


A. 高寒草甸类; B. 高寒草原类; C. 高寒草甸草原类; D. 高寒荒漠类; E. 温性草原类; F. 温性荒漠类; G. 温性荒漠草原类; H. 低地草甸类; I. 山地草甸类; K. 三江源地区; L. 祁连山地区; M. 青海湖流域; N. 柴达木盆地; O. 河湟谷地.

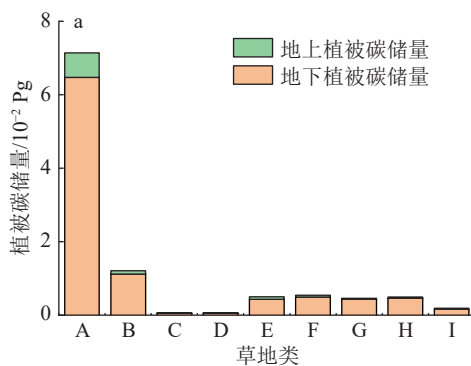
图 1 青海省不同草地类和不同功能区地上、地下植被碳面密度

青海省草地植被碳储量为 0.1064 Pg, 其中地上植被碳储量 (包括凋落物) 为 0.0097 Pg, 地下为 0.0967 Pg, 地下植被碳储量约是地上的 10 倍. 不同草地类和不同功能区草地植被碳储量的差异主要与草地的分布面积和根茎比有关. 草地分布面积最大的高寒草甸类植被碳储量最高, 为 0.0714 Pg, 占比 67.16%; 草

地植被平均碳面密度为 $0.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 地上植被碳面密度为 $0.01 \sim 0.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 地下植被碳面密度为 $0.09 \sim 1.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 不同草地类碳面密度差异与地下植被碳面密度密切相关. 温性荒漠草原类碳面密度最高, 为 $0.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 高寒荒漠类和温性草原类较低, 分别为 0.18 和 $0.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 1-a). 不同功能区碳面密度差异主要受功能区面积的影响. 三江源地区面积最大, 碳面密度也高, 地上植被碳面密度为 $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 地下植被为 $0.30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 1-b).



地面积最小的高寒草甸草原类植被碳储量最低, 为 0.0005 Pg, 仅占 0.49% (图 2-a). 三江源地区草地面积最大, 植被碳储量高达 0.0763 Pg, 占 71.75%; 其次是柴达木盆地 (0.0147 Pg)、祁连山地区 (0.0082 Pg)、青海湖流域 (0.0050 Pg), 河湟谷地的草地面积最小, 植被碳储量也最低, 约 0.0022 Pg, 占 2.03% (图 2-b).



A. 高寒草甸类; B. 高寒草原类; C. 高寒草甸草原类; D. 高寒荒漠类; E. 温性草原类; F. 温性荒漠类; G. 温性荒漠草原类; H. 低地草甸类; I. 山地草甸类; K. 三江源地区; L. 祁连山地区; M. 青海湖流域; N. 柴达木盆地; O. 河湟谷地.

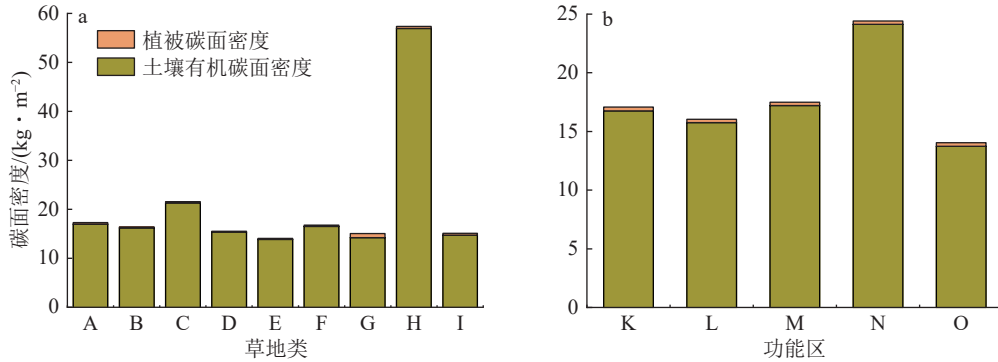
图 2 青海省不同草地类和不同功能区地上、地下植被碳储量

3.2 青海省草地土壤有机碳面密度和碳储量 青海省草地土壤有机碳面密度变化范围为 $0 \sim 250.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均有机碳面密度为 $17.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 低地草

甸类的土壤有机碳面密度较其他草地类相对高, 为 $56.90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其土壤类型主要是草甸盐土和沼泽盐土; 温性草原类最低, 为 $13.84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其土壤类型主

要是栗钙土、淡栗钙土、暗栗钙土和薄黑毡土(图3-a)。从5大功能区来看,柴达木盆地的土壤有机碳面密度最高,其次是青海湖流域、三江源地区、祁连山

地区,河湟谷地的最低,主要是由于河湟谷地面积小,而且是青海省的城镇集中地区,土壤面积更小(图3-b)。

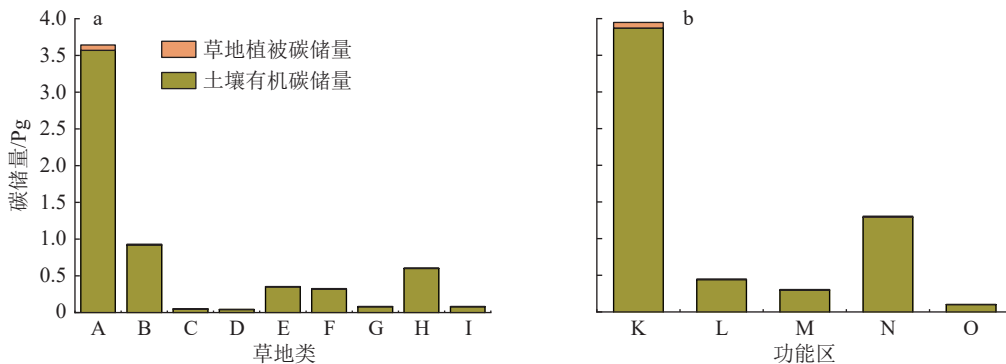


A. 高寒草甸类; B. 高寒草原类; C. 高寒草甸草原类; D. 高寒荒漠类; E. 温性草原类; F. 温性荒漠类; G. 温性荒漠草原类; H. 低地草甸类; I. 山地草甸类; K. 三江源地区; L. 祁连山地区; M. 青海湖流域; N. 柴达木盆地; O. 河湟谷地。

图3 青海省不同草地类和不同功能区植被、土壤有机碳面密度

青海省草地土壤有机碳储量为 6.01 Pg。从9大草地类来看,高寒草甸类的土壤碳储量最高,约 3.57 Pg, 占总土壤有机碳储量的 59.41%;其次是高寒草原类和低地草甸类,分别占 15.35% 和 10.02%;高寒草甸草原类和高寒荒漠类最低,分别为 0.05 Pg和 0.04 Pg。高寒类草地(高寒草甸类、高寒草原类、高寒草甸草原类和高寒荒漠类)土壤有机碳储量为 4.59 Pg, 占全省草

地土壤有机碳储量的 76.29%;温性类草地(温性草原类、温性荒漠类和温性荒漠草原类)土壤有机碳储量为 0.75 Pg, 占 12.42%(图4-a)。从5大功能区来看,三江源地区的草地土壤有机碳储量最高,为 3.87 Pg, 其次是柴达木盆地(1.29 Pg), 二者占全省草地土壤有机碳储量的 85.96%;其余3个功能区的草地土壤有机碳储量较低,分别占 7.38%, 5.00% 和 1.65%(图4-b)。



A. 高寒草甸类; B. 高寒草原类; C. 高寒草甸草原类; D. 高寒荒漠类; E. 温性草原类; F. 温性荒漠类; G. 温性荒漠草原类; H. 低地草甸类; I. 山地草甸类; K. 三江源地区; L. 祁连山地区; M. 青海湖流域; N. 柴达木盆地; O. 河湟谷地。

图4 青海省不同草地类和不同功能区植被、土壤有机碳储量

3.3 青海省草地生态系统碳面密度和碳储量 青海省草地生态系统平均碳面密度为 18.08 kg·m⁻², 各草地类的碳面密度由高到低依次为: 低地草甸类 (57.37 kg·m⁻²)、高寒草甸草原类 (21.54 kg·m⁻²)、高寒草甸类(17.30 kg·m⁻²)、温性荒漠类(16.79 kg·m⁻²)、高寒草原类(16.41 kg·m⁻²)、高寒荒漠类(15.53 kg·m⁻²)、山地草甸类(15.09 kg·m⁻²)、温性荒漠草原类(15.07 kg·m⁻²)、温性草原类(14.04 kg·m⁻²) (图3-a)。各功能区的碳面密度由高到低依次为: 柴达木盆地(24.41

kg·m⁻²)、青海湖流域(17.50 kg·m⁻²)、三江源地区(17.08 kg·m⁻²)、祁连山地区(16.04 kg·m⁻²)、河湟谷地(14.05 kg·m⁻²) (图3-b)。

青海省草地生态系统总碳储量为 6.12 Pg, 其中草地植被碳储量为 0.11 Pg, 占 1.80%; 土壤有机碳储量为 6.01 Pg, 占 98.20%。可见, 土壤碳储量约为植被碳储量的 54 倍多。从青海省9大草地类来看: 高寒草甸类总碳储量最高, 占草地生态系统碳储量的 59.55%; 其次是高寒草甸草原类(15.28%)、低地草甸类(9.93%)、

温性草原类(5.77%)、温性荒漠类(5.37%),上述草地类的草地生态系统碳储量占整个研究区总碳储量的95.89%(图4-a)。从青海省5大功能区来看,碳储量从高到低依次为三江源地区(3.95 Pg)、柴达木盆地(1.31 Pg)、祁连山地区(0.45 Pg)、青海湖流域(0.31 Pg)、河湟谷地(0.10 Pg)。河湟谷地位于青海省农业耕作区,草地面积小,碳储量最低(图4-b)。

3.4 青海省不同区域同类草地碳面密度的差异 青海省地域辽阔、自然地理和生态环境差异显著,境内的草地植被和土壤发育环境十分复杂,因而不同区域同一草地类的碳面密度有所差异。青海省的主要草地类型是高寒草甸、高寒草原和温性草原,由表2得知,这些草地类在各个功能区的碳面密度差异较小,高寒草甸草原仅在三江源地区有分布,青海湖流域的温性荒漠草原类碳面密度较其他地区略低,这与该草地类的生长条件(光照、水分、土壤等)密切相关。

表2 青海省5大功能区不同草地类碳面密度比较 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$

草地类型	三江源地区	祁连山地区	青海湖流域	柴达木盆地	河湟谷地
高寒草甸	17.41	16.48	18.75	17.59	14.38
高寒草原	16.97	14.77	14.84	16.07	14.38
高寒草甸草原	21.54	0	0	0	0
高寒荒漠	0	15.78	12.88	16.51	0
温性草原	13.50	13.94	15.68	14.68	13.71
温性荒漠	12.46	16.81	11.64	17.31	12.09
温性荒漠草原	15.04	0	8.13	13.51	18.08
低地草甸	20.25	0	9.56	59.70	0
山地草甸	16.44	16.00	14.87	9.12	14.03

4 讨论与结论

4.1 讨论 目前关于青海省草地生态系统碳储量的研究很少,且主要集中在少数典型区域和草地类型。苏淑兰^[20]基于2012—2013年的实测草地生物量和土壤数据,采用草地类型法和遥感估算法,分别估计了三江源地区草地生态系统的植被、土壤以及总碳储量,得出草地类型法估算的碳储量分别为0.32、3.00和3.32 Pg,遥感模型法的碳储量分别为0.49、2.49和3.07 Pg,并对不同草地类的生态系统碳面密度进行了比较,高寒草甸的最高($16.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),其次是高寒草甸草原($12.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、温性草原($8.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、温性荒漠草原($6.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)和高寒草原($6.38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$);李洋^[19]通过植被生物量和实测土壤剖面数据,并结合遥感,估算青海湖流域草地生态系统植被、土壤和

总碳储量分别为0.07、0.38和0.47 Pg,生态系统碳面密度由高到低依次为高寒草甸($11.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、高寒草原($8.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、温性草原($6.57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)和温性荒漠草原($4.90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$);就土壤碳库而言,王根绪等^[38]利用实测土壤数据和青海土壤普查数据等,估算了青藏高原各类草地土壤的有机碳储量,其草地土壤有机碳总储量达到33.52 Pg,其中青海省为18.22 Pg,占54.06%;陶贞等^[39]选择中科院海北站4个典型的高寒草甸土壤剖面进行土壤有机碳的估算,得出青藏高原高寒草甸类土壤有机碳储量为21.52 Pg。土壤有机碳储量与温度密切相关,温度越低,有机质分解越慢,土壤中积累的越多^[40-41]。青藏高原海拔高,年均温较低,因此有机碳含量较高。就植被碳库而言,张继平等^[16]对三江源区草地生态系统碳储量进行了估算,直接将草地植被的年NPP值视为植被碳储量,结果表明,2000—2010年草地植被碳储量平均值为31.00 Tg,平均碳面密度为 $86.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,低于本文结果;郭小伟等^[42]研究了青藏高原高寒草原的植物根系碳贮量,从高到低依次为高寒草甸草原($(896.30 \pm 22.1) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、高寒草原化草甸($(388.81 \pm 29.5) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)、高寒草原($(335.25 \pm 31.7) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。总之,不同研究由于采用的数据源、土壤厚度、根茎比以及估算方法等不同,使得估算结果存在明显差异。

4.2 结论 本文以第2次土壤普查形成的土壤图和草地资源清查图为本底,结合调查、文献搜集的实测土壤剖面数据以及资源清查的实测草地生物量数据,对青海省草地生态系统碳储量状况进行了研究,并从草地类和功能区2个角度对其分布特征进行了分析。结果表明:青海省草地生态系统碳储量为6.12 Pg,平均碳面密度为 $18.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,其中,植被碳储量和碳面密度分别为0.1064 Pg和 $0.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,土壤碳储量和碳面密度分别为6.01 Pg和 $17.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。无论是植被碳储量或土壤碳储量,高寒草甸类最高,高寒荒漠类最低;三江源地区最高,河湟谷地最低;温性荒漠草原类的植被碳面密度最高,低地草甸类的土壤有机碳面密度最高;三江源地区的植被碳面密度最高,柴达木盆地的土壤有机碳面密度最高。

5 参考文献

- [1] 王穗子,樊江文,刘帅.中国草地碳库估算差异性综合分析[J].草地学报,2017,25(5):905
- [2] 李高.凝聚全社会力量推进碳达峰目标实现[J].环境与可持续发展,2021,46(2):6
- [3] 巢清尘.“碳达峰和碳中和”的科学内涵及我国的政策措施[J].环境与可持续发展,2021,46(2):14

- [4] 季波, 谢应忠, 何建龙, 等. 宁夏典型温性天然草地固碳特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3657
- [5] 季波, 何建龙, 王占军, 等. 宁夏天然草地植被碳储量特征及构成[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1259
- [6] 李学斌, 樊瑞霞, 刘学东. 中国草地生态系统碳储量及碳过程研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1845
- [7] YUAN J Y, OUYANG Z Y, ZHENG H, et al. Ecosystem carbon storage following different approaches to grassland restoration in south-eastern Horqin Sandy Land, Northern China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 26: e01438
- [8] 刘兴元, 冯琦胜. 藏北高寒草地生态系统服务价值评估[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3152
- [9] YANG Y H, FANG J Y, TANG Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592
- [10] TESSEMA B, SOMMER R, PIKKI K, et al. Potential for soil organic carbon sequestration in grasslands in East African countries: a review[J]. *Grassland Science*, 2020, 66(3): 135
- [11] 杨婷婷, 吴新宏, 王加亭, 等. 中国草地生态系统碳储量估算[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(3): 127
- [12] 崔博超, 郑江华, 吐尔逊·哈斯木, 等. 塔里木河流域草地净初级生产力时空分异特征研究[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 1
- [13] 李东. 基于CENTURY模型的高寒草甸土壤有机碳动态模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011
- [14] 秦彧, 宜树华, 李乃杰, 等. 青藏高原草地生态系统碳循环研究进展[J]. 草业学报, 2012, 21(6): 275
- [15] 王军邦, 黄玫, 林小惠. 青藏高原草地生态系统碳收支研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 123
- [16] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 等. 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 8
- [17] 常天军, 王建林, 李鹏, 等. 藏北高寒草地植被的碳密度与碳贮量[J]. 生态科学, 2007, 26(5): 437
- [18] 苏玉波. 黑河上游草地生态系统碳储量及价值评估[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015
- [19] 李洋. 青海湖流域草地生态系统碳储量及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2015
- [20] 苏淑兰. 三江源草地生态系统碳储量及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2015
- [21] 赵苗苗, 赵海凤, 李仁强, 等. 青海省1998—2012年草地生态系统服务功能价值评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 418
- [22] 王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4096
- [23] 辛玉春. 论青海天然草地分类系统[J]. 青海草业, 2015, 24(3): 23
- [24] 农业部畜牧兽医司. 中国草地资源数据[M]. 北京: 农业出版社, 1994
- [25] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491
- [26] 查向浩, 王泽, 刘耘华, 等. 新疆西部天然草地生物量与根冠比特征[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(10): 1943
- [27] 周华坤, 赵新全, 温军, 等. 黄河源区高寒草原的植被退化与土壤退化特征[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 1
- [28] 李永华, 王学全, 罗天祥, 等. 青海共和盆地草地叶面积指数与生物量随海拔梯度变化的规律[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25): 13989
- [29] 曹广民. 中国生态系统定位观测与研究数据: 草地与荒漠生态系统卷·青海海北站(2001—2006)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
- [30] 袁焯城, 李宝林, 王双, 等. 基于GF-1/WFV数据的三江源草地月度NPP反演研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(12): 1799
- [31] 王瑞杰, 覃志豪, 王桂英. 呼伦贝尔草原产草量及载畜平衡研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(12): 1782
- [32] 王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 797
- [33] 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
- [34] 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: 以我国东北地区为例[J]. 土壤, 2003, 35(3): 236
- [35] 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[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2279
- [36] 邵月红, 潘剑君, 许信旺, 等. 浅谈土壤有机碳密度及储量的估算方法[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 1007
- [37] 钟聪, 杨忠芳, 夏学齐, 等. 青海省土壤有机碳储量估算及其源汇因素分析[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 896
- [38] 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[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693
- [39] 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[J]. 地理学报, 2006, 61(7): 720
- [40] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 727
- [41] 王荔, 曾辉, 张扬建, 等. 青藏高原土壤碳储量及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3506
- [42] 郭小伟, 韩道瑞, 张法伟, 等. 青藏高原高寒草原碳增贮潜力的初步研究[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 740

Carbon storage and distribution of grassland ecosystems in Qinghai Province

ZHANG Chenyue¹⁾ ZHAO Xia^{1, 2)} XIN Yuchun³⁾ TANG Wenjia⁴⁾ WANG Lei¹⁾

(1) College of Geographical Sciences, Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Natural Resources and Environment Modeling Laboratory, Qinghai Normal University, 810008, Xining, Qinghai, China; 2) Academy of Plateau Science and Sustainability - Plateau Soil Information Science Research Team, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, 810008, Xining, Qinghai, China; 3) Qinghai General Station of Grassland, 810008, Xining, Qinghai, China; 4) Qinghai Ecological Environment Monitoring Center, 810099, Xining, Qinghai, China)

Abstract Based on the soil map from the second soil census and grassland resource inventory map, the carbon storage of grassland in Qinghai province was estimated by literature collection and measured data. And it turns out, carbon storage was about 6.12 Pg, with an average carbon surface density of $18.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Aboveground vegetation carbon storage (including litters) was 0.0097 Pg, with an average carbon surface density of $0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Carbon storage of underground vegetation was 0.0967 Pg, with average carbon surface density at $0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Soil organic carbon storage was 6.01 Pg, carbon surface density at $17.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Soil was found to store > 54 times as much carbon as vegetation. Of the nine grassland types in the region, total carbon storage was: alpine meadow (3.64 Pg), alpine steppe (0.94 Pg), lowland meadow (0.61 Pg), warm steppe (0.35 Pg), warm desert (0.33 Pg), warm desert steppe (0.08 Pg), mountain meadow (0.08 Pg), alpine meadow steppe (0.05 Pg), alpine desert (0.04 Pg). Of the five functional areas, total carbon storage was: Sanjiangyuan region, Qaidam Basin, Qilian Mountain area, Qinghai Lake basin, Hehuang Valley. The total carbon surface density in the nine different grassland types was highest in lowland meadow ($57.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$), lowest in warm steppe ($14.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$). Total carbon density in five functional areas was highest in Qaidam Basin ($24.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) but lowest in Hehuang Valley ($14.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$).

Keywords grassland ecosystem; carbon storage; carbon surface density; vegetation; soil organic carbon; Qinghai province

【责任编辑:刘先勤】