环青海湖区退化芨芨草群落的土壤碳密度特征

曹生奎[1,2,3]，陈克龙[1,2]，曹广超[1,2]，朱锦福[2]，卢宝梁[4]

(1. 青海师范大学 生命与地理科学学院，青海 西宁 810008；
2. 青海师范大学 青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁 810008；
3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所，甘肃 兰州 730000；4. 中国科学院 青海盐湖研究所，青海 西宁 810000)

摘 要：通过对环青海湖区退化芨芨草群落的土壤容重和有机碳含量的测定分析，确定了退化芨芨草群落的土壤碳密度特征。结果显示，重度退化芨芨草群落的土壤容重显著大于中度退化芨芨草群落的土壤容重。重度退化芨芨草群落土壤有机碳含量普遍低于中度退化芨芨草群落，特别是两者表层土壤有机碳含量差异极为显著($p<0.001$)。在 0—100 cm 剖面上，中度退化芨芨草群落土壤有机碳含量总体呈减少趋势，重度退化的则呈现减少和先增加后减小的两种变化趋势。芨芨草群落土壤有机碳密度跟有机碳含量变化趋势一致；芨芨草群落土壤有机碳主要集中在 0—30 cm 土层，中度和重度退化下该深度土壤有机碳密度分别为 7.35 和 2.92 kg/m^2，占整个剖面有机碳密度的 57.45%和 63.06%；环青海湖区中度和重度退化芨芨草群落剖面土壤有机碳密度为 12.79 和 4.63 kg/m^2。

关键词：退化群落；高寒草地；土壤剖面；有机碳密度

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2014)02-0073-05 **中图分类号**：S812，S153.6

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.016

Characteristics of Soil Organic Carbon Density in Degraded *Achnatherum Splendens* Communities Around Qinghai Lake

CAO Sheng-kui[1,2,3], CHEN Ke-long[1,2], CAO Guang-chao[1,2], ZHU Jin-fu[2], LU Bao-liang[4]

(1. *College of Life and Geography Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai* 810008, *China*; 2. *Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai* 810008, *China*; 3. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*; 4. *Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai* 810008, *China*)

Abstract: Based on measurements of soil bulk density and organic carbon content, this paper studied the characteristics of soil organic carbon density in degrading *Achnatherum splendens* communities around the Qinghai Lake. Results showed that soil bulk density under the heavily degraded *Achnatherum splendens* communities was apparently greater than that in the moderately degraded communities. Soil organic carbon content in the moderately degraded *Achnatherum splendens* communities was generally higher than that in the heavily degraded. Especially, there existed an extreme apparent difference in surface soil organic carbon content between them. In the 0—100 cm soil profile, soil organic carbon content showed a decreasing trend in the moderately degraded *Achnatherum splendens* communities and however, the heavily degraded communities displayed two kinds of trend, i.e., decreasing trend and the trend of first increasing and then decreasing with soil depth. Soil organic carbon density showed the same trend as its content. Soil organic carbon was mainly distributed in the 0—30 cm soil layer. Soil organic carbon densities in the layer in the moderately and heavily degraded *Achnatherum splendens* communities were 7.35 and 2.92 kg/m^2, respectively, occupying 57.45% and 63.06% of the total soil organic carbon densities in the whole soil profile. In the profiles,

收稿日期：2013-04-10 **修回日期**：2013-05-21

资助项目：国家自然科学基金项目"青海湖内陆高寒湿地景观尺度碳库动态测定与模拟"(41261020)；国家社科基金项目(10CJY015)；中科院"西部之光"[科发人教字(2012)179 号]；青海师范大学科技创新计划项目

作者简介：曹生奎(1979—)，男(汉族)，青海省西宁市人，博士，教授，主要从事全球变化生态学及陆地生态系统碳循环方面的研究。E-mail: caoshengkui@163.com。

soil organic carbon densities in the moderately and heavily degraded *Achnatherum splendens* communities around the Qinghai Lake were 12.79 and 4.63 kg/m^2, respectively.

Keywords: degraded community; alpine grassland; soil profile; soil organic carbon density

陆地生态系统碳循环因与全球变化密切相关而成为当前的研究热点[1-3]，草地是陆地上第二大碳库，其总碳贮量约为 9 216 Pg[4]，草地生态系统在全球碳循环中占有非常重要的地位。在我国，草地是最大的陆地生态系统类型，目前中国草地面积为 3.31×10^6 km^2，其碳库约为 29.1 Pg，其中 96.6%的碳储存于土壤有机质中[5]。为此，大量学者[6-10]对整个中国和不同区域的草地土壤有机碳库进行了估算，但研究结果间存在较大差异和不确定性。其中碳密度计算不精确是主要原因之一，为此，必须深入测算和研究各类草地的土壤碳密度。

芨芨草（*Achnatherum splendens*）属禾本科（Gramineae）芨芨草属（*Achnatherum*），为多年生密丛性植物[11]，具有耐寒、耐旱、耐盐、适应性广等特征[12]，是优良的饲用植物、纤维植物及水土保持植物[13]。我国的芨芨草资源十分丰富，总面积约 2.50×10^6 hm^2，可利用面积 2.20×10^6 hm^2[14]。在我国东部高寒草甸草原到西部荒漠区及青藏高原东部高寒草原区均有分布，主要分布在青海、西藏、四川、新疆、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西等省区[15]。众多学者对芨芨草的群落特征[16-17]、生物多样性[18]、环境胁迫响应[19]和生境[20]等方面开展了研究，取得了丰硕成果，但对芨芨草土壤碳库方面的研究报道较少。青藏高原东部地区，特别是环青海湖盆地、共和盆地等形成了大面积的芨芨草群落，常称为芨芨草草原[21]，占据显域地境而成为地带性植被[17]。芨芨草群落在青海湖湖滨呈环带状分布[17]，是青海湖地区温性草原的代表群落，也是重要景观生态类型之一。它不仅为草地畜牧业发展提供不可缺少的物质基础，而且在抗风固沙，保持水土等维护自然环境稳定性方面起着重要作用，同时也是鸟类的重要栖息地[18]。近几十年来，由于人为开垦和过度放牧等人为不合理利用，致使芨芨草草原遭到严重破坏，退化加剧，面积急剧减少，物种多样性大量丧失[22]。为此，本研究对环青海湖区退化芨芨草群落土壤碳密度特征进行研究，以期为该区域芨芨草草原持续利用和高寒地区退化草地碳变化研究提供基础数据和理论参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

青海湖是我国最大的内陆咸水湖，湖水面积近 4 300 km^2，流域面积约 29 660 km^2，地理位置介于东经 97°50′—101 °20′，北纬 36°15′—38°20′之间，东西长 106 km，南北宽 63 km，周长约 360 km，湖水面积 4 282.3 km^2，水面海拔 3 191.59 m[23]。研究区属典型的高原大陆性气候，以干旱、寒冷、多风为主要特征。环青海湖区 1958—2008 年多年气温平均值为 −3.08 ℃，多年平均降水量为 379.09 mm。降水量分布特点为湖心向湖周山区递增，5—9 月降水量占全年的 85%～89%；降水量年际变化较小，多年平均蒸发量约 800～1 100 mm[24]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与分析 根据环青海湖区芨芨草群落的生长环境，选择其典型生境，由于环青海湖区芨芨草群落已普遍出现不同程度的退化，且以中度和重度退化为主。为此，以群落建群种仍以芨芨草为主的依据，根据芨芨草群落盖度，将群落盖度低于 50%的定为严重退化，群落盖度在 50%～75%的定为中度退化，分别选取了中度和重度退化芨芨草群落各 4 个样地，在每个样地，设置 1 m×1 m 样方作为采样点（表 1），在每个采样点首先调查其主要优势植物类型，然后用直径 5 cm 的土钻在 1 m×1 m 的样方内随机钻去 0—100 cm 深度（采样间隔为 10 cm）的 3 个土壤样品，然后混合为 1 个样品装入土壤布袋；最后，挖开剖面用环刀取原状土测定各层土壤容重。所有土壤样品带回实验室后经自然风干、除杂，研磨后过 80 目筛，样品密封保存并贴好标签备用。用重铬酸钾容量—外加热法测定土壤有机碳含量[25]。

1.2.2 数据计算与分析 一般认为土壤有机碳密度是由土壤有机碳质量分数、>2 mm 砾石体积百分比和土壤容重共同决定的。土壤剖面内某一土层 i 的土壤有机碳密度 SOC_{di}（kg/m^2）计算公式为[26]：

$$SOC_{di}=C_iB_iD_i(1-\delta_i)/100$$

式中：C_i——第 i 层土壤有机碳质量分数（g/kg）；B_i——第 i 层土壤容重（g/cm^3）；D_i——第 i 层土层厚度（cm）；δ_i——第 i 层土壤中>2 mm 的砾石体积百分比。

采用 SPSS 16.0 单因素方差分析进行不同深度和不同退化下土壤容重、土壤有机碳含量和有机碳密度的差异显著性检验，采用 Tukey's 进行组间多重比较；所有数据均表示为平均值±标准差。

表 1　环青海湖区退化芨芨草群落土壤采样点位置

样点	经度	纬度	海拔/m	退化程度	盖度/%	优势植物
1	37°14′	99°46′	3 280	中度退化	75	芨芨草、小蒿草(*Kobresia pygmaea*)、早熟禾(*Poa pratensis*)
2	37°15′	99°59′	3 236	中度退化	60	芨芨草、冰草(*Agropyron cristatum*)、小蒿草
3	37°17′	100°11′	3 265	中度退化	60	芨芨草、小蒿草、冰草
4	37°13′	100°26′	3 276	中度退化	70	芨芨草、垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、小蒿草、马莲〔*Iris lacteal* Pall. var. *chinensis* (Fisch.) Koidz〕
5	37°09′	100°32′	3 246	重度退化	50	芨芨草、小蒿草、冰草、紫菀(*Aster tataricus*)
6	36°50′	100°48′	3 300	重度退化	45	芨芨草、小蒿草、冰草
7	36°48′	100°47′	3 237	重度退化	50	芨芨草、小嵩草、冰草
8	36°42′	100°47′	3 244	重度退化	40	芨芨草、冰草、狼毒

2　结果与分析

2.1　退化芨芨草群落的土壤容重特征

由环青海湖区退化芨芨草群落土壤容重测定结果所示(表 2),中度退化芨芨草群落土壤容重随深度增加而增大,在 80—90 cm 土层深度出现最大值,容重差异主要表现在深层(80—100 cm)与表层各层间的差异($p<0.05$);重度退化的则是先增大后减小,在 60—70 cm 深度处出现最大值,但各层土壤容重间没有显著差异($p>0.05$)。同一深度不同类型间的差异主要表现在表层 0—10 cm 和 40—70 cm 深度($p<0.05$),重度退化芨芨草群落的土壤剖面平均容重显著大于中度退化的($p<0.001$)。

2.2　退化芨芨草群落的土壤有机碳含量变化

由环青海湖退化芨芨草群落土壤有机碳含量变化情况可以看出(图 1),中度和重度退化土壤有机碳含量随深度增加总体呈减小趋势,但也稍有不同,中度退化芨芨草群落土壤有机碳含量在 0—10 cm 表层最高;而重度退化芨芨草群落土壤有机碳含量在剖面上呈现两种变化趋势:一种是随土壤深度加深而减少,在 0—10 cm 表层有机碳含量最高;另一种是先从表层增加而后波动减小,最高有机碳含量出现在 20—30 cm 或者 30—40 cm。相同土层深度下,中度退化的土壤有机碳含量普遍高于重度退化的。中度和重度退化下 0—100 cm 剖面有机碳平均含量分别为 14.49和 4.24 g/kg。

表 2　环青海湖区退化芨芨草群落的土壤容重

深度/cm	中度退化/(g·cm^{-3})	重度退化/(g·cm^{-3})
0—10	0.84±0.04cA	1.12±0.10aB
10—20	0.85±0.01cA	1.11±0.11 aA
20—30	0.92±0.02bcA	1.15±0.10 aA
30—40	0.86±0.03cA	1.22±0.07aB
40—50	0.89±0.04bcA	1.19±0.10aB
50—60	0.89±0.03bcA	1.21±0.08aB
60—70	0.92±0.04bcA	1.27±0.06aB
70—80	0.97±0.03abA	1.19±0.09aA
80—90	1.02±0.05aA	1.17±0.09aA
90—100	0.97±0.05abA	1.13±0.13aA
平均值	0.91±0.01A	1.18±0.03B

注:表中小写字母表示同一类型在不同深度的差异,大写字母表示同一深度不同类型间的差异,不同字母代表差异显著($p<0.05$)。

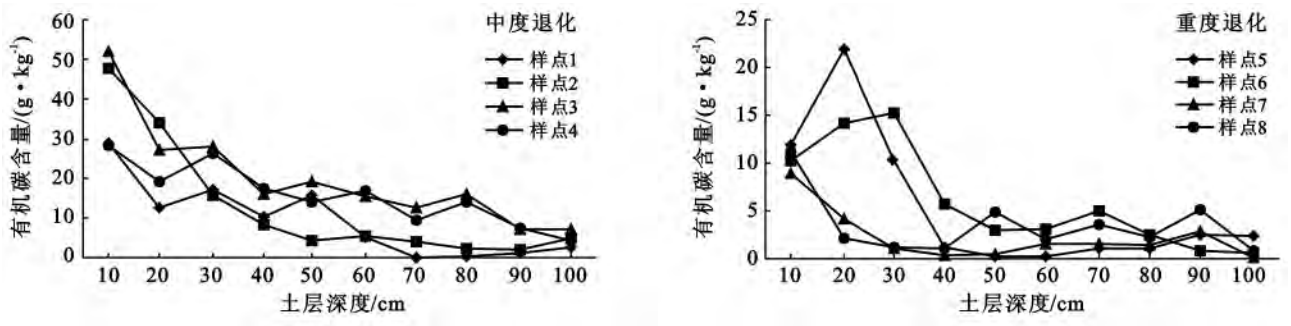


图 1　环青海湖退化芨芨草群落的土壤有机碳含量变化

2.3　环青海湖退化芨芨草群落的土壤有机碳密度变化

环青海湖区退化芨芨草群落土壤有机碳密度变化结果(图 2)显示,在剖面上,土壤有机碳密度变化与有机碳含量变化趋势基本一致,土壤有机碳密度最高值一般出现在 0—10 cm 的表层。40 cm 以下重度退化芨芨草群落土层土壤有机碳密度普遍低于 0.5 kg/m^2。中度和重度退化下土壤剖面有机碳密度平均值分别为 12.79 和 4.63 kg/m^2。

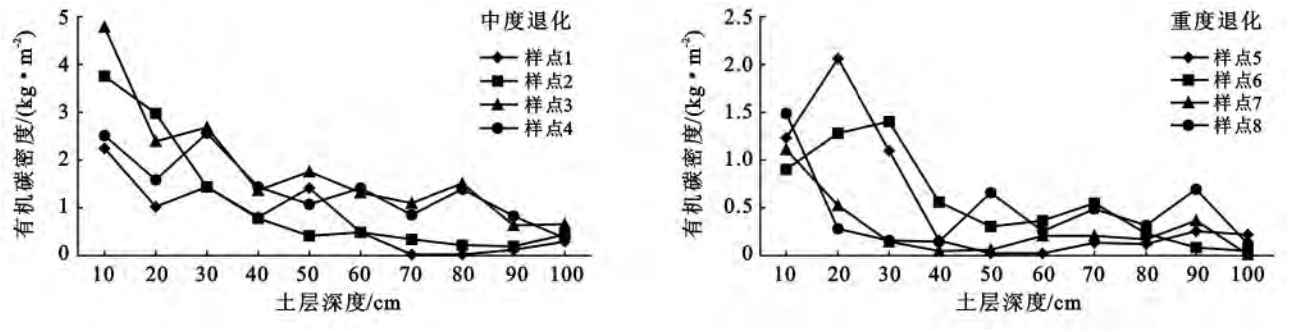


图 2 环青海湖退化芨芨草群落的土壤有机碳密度变化

3 结果讨论

土壤有机碳来源于植物残体分解，而又通过土壤呼吸、土壤淋溶等过程而流失，具有不同的稳定性和周转的特征[27]。草原植被光合作用所同化有机产物中 92%以上分布在地下[28]，因此，根系是形成土壤碳的重要来源，地下部分所占比重相对减少，根系归还土壤有机碳的量减少[29]。环青海湖区芨芨草是多年生草本植物，属于须根系植物，群落植物根系的垂直分布直接影响输入到土壤剖面各个层次的有机碳数量。根据对芨芨草群落根系分布的研究结果，芨芨草主要根系着生于植株基部，根系总生物量在 0—30 cm 土层深度最大，并随土层深度依次减小[30-31]，环青海湖区芨芨草群落 0—10 cm 的地下生物量高达 1 408.78 g，占总地下生物量的 84%以上[32]。因此，环青海湖区芨芨草群落有机碳含量的垂直变化特征主要与其根系分布有关。芨芨草群落土壤有机碳含量随深度而减少的结果与其他研究者结果一致[33-34]。在本研究中，中度和重度退化芨芨草群落 0—30 cm 土壤平均有机碳含量为 28.14 和 9.37 g/kg，分别高出剖面平均有机碳含量的 94.23%和 121.05%，说明芨芨草群落土壤有机碳主要集中在土壤表层。中度和重度退化下芨芨草群落土壤有机碳含量差异显著，特别是表层土壤有机碳含量差异极显著（$p<0.001$），中度退化芨芨草群落 0—30 cm 土壤有机碳含量平均高出 18.77 g/kg，这表明随着芨芨草群落退化程度加剧，土壤环境和质量恶化，输入土壤有机碳量明显低于输出量，导致有机碳被分解释放进入大气。这与冯瑞章等[35]、杨凯等[36]的研究结果一致，这些研究也表明随草地退化程度的加剧，土壤有机碳表现出逐渐降低的趋势。

土壤有机碳碳密度反映单个土壤剖面或土体的碳储量，它是进入土体植物残体量及其在土壤微生物作用下分解损失量二者之间平衡的结果[37]。环青海湖区退化芨芨草群落土壤有机碳密度变化特征说明芨芨草群落土壤的有机碳主要集中在 0—30 cm 深度，中度和重度退化下该深度土壤有机碳密度分别为 7.35 和 2.92 kg/m^2，占整个剖面有机碳密度的 57.45%和 63.06%，与青藏高原整个高寒草原 0—30 cm 土壤有机碳含量相比（2.94 kg/m^2）[7]，本研究结果略高于此值，但远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（8.0～10.5 kg/m^2）[38]。环青海湖区中度和重度退化芨芨草群落土壤有机碳密度为 12.79 和 4.63 kg/m^2，两者平均为 8.71 kg/m^2，比我国草地土壤平均有机碳密度（8.5 kg/m^2）[5]和青藏高原高寒草地 1 m 深平均有机碳密度（6.5 kg/m^2）[7]稍高。考虑到芨芨草在我国的分布面积，在进行草地碳循环研究时，不能忽视芨芨草温性草原土壤的碳库和储量变化。

草地生态系统退化会导致土壤碳库的释放和损失，且随着退化程度加强其土壤碳储量依次减小。在环青海湖区芨芨草群落内，中度退化芨芨草土壤碳密度与张法伟等在青海湖地区所测的芨芨草碳密度（11.87 kg/m^2）[32]较为接近，重度退化下土壤碳密度要比他们所测的“黑土滩型”或裸土地退化草地的碳密度（1.65 kg/m^2）高，与环青海湖区表层 0—20 cm 栗钙土碳密度相比较（8.19 kg/m^2）[39]，本研究中 0—20 cm 土壤碳密度明显偏低，中度和重度退化芨芨草群落分别为 5.31 和 2.22 kg/m^2。以上结果从另一方面说明，芨芨草群落的严重退化会导致其土壤向大气释放碳素表现为土壤碳流失。张凡等[40]在青海湖北部不同退化梯度草地的土壤碳储量研究结果也证实随着草地退化程度加剧，土壤碳储量呈减小趋势。而且严重退化芨芨草群落土壤碳密度垂直变化说明退化对表层土壤有机碳产生了较大扰动，加速了碳的损失。究其环青海湖区芨芨草退化原因，超载放牧是其首要原因。青海湖区夏秋季可承载 260 万只羊单位的牲畜量，冬春季合理载畜率为 200 万只羊单位。但目前青海湖区实际大小牲畜折合成羊单位为 500 万只。牲畜数量增加，草地严重超载，使牧草生产受

到抑制,产草量下降,草地大面积退化。草地退化导致土壤孔隙度减小,土壤透水和通气功能变差,土壤有效水分减少,植物根系生长受阻,甚至使植物受到损伤,地下根系生物量和枯落物积累量减少,有机质分解加速,从而加剧土壤碳的流失,结果就是本文研究结果中所表现出的有机碳密度减少。据报道[41],过度放牧导致的中国草地土壤有机碳损失量最大,达到 0.23 kg/(m^2 · a)。可见,需要对环青海湖区芨芨草退化草原进行保护和恢复,增强其碳储存功能,并保证草地畜牧业持续健康发展。

4　结 论

(1) 环青海湖区芨芨草群落土壤有机碳含量主要集中在 0—30 cm 土壤表层,中度和重度退化下土壤有机碳含量随深度增加总体呈减小趋势,同一深度下,中度退化的土壤有机碳含量普遍高于重度退化的。土壤有机碳密度变化与有机碳含量变化趋势基本一致,土壤有机碳密度最高值一般出现在 0—10 cm 表层。中度和重度退化下土壤剖面有机碳密度值分别为 12.79 和 4.63 kg/m^2,两者平均为 8.71 kg/m^2,稍高于我国草地和青藏高原高寒草地平均有机碳密度,说明在我国草地碳循环研究中不能忽视芨芨草温性草原土壤碳库和储量变化。

(2) 芨芨草群落的严重退化会导致其土壤向大气释放碳素,表现为土壤碳流失。超载放牧是其首要原因,草地严重超载,导致草地退化,土壤透水和通气功能变差,植物根系生长受阻,土壤有机质得不到及时补充而减少,从而加剧土壤碳的流失。因此,需要对环青海湖区芨芨草退化草原进行保护和恢复,增强其碳储存功能,保证草地畜牧业持续健康发展。

[参 考 文 献]

[1] Falkowski P, Scholes R J, Boyyle E, et al. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system[J]. Science, 2000, 290(13):291-296.

[2] Fang Jingyun, Chen Anping, Peng Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(22):2320-2322.

[3] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社,2003:1-460.

[4] 耿元波, 董云社, 孟维奇. 陆地碳循环研究进展[J]. 地理科学进展,2000,19(4):297-306.

[5] 方精云, 杨元合, 马文红,等. 中国草地生态系统碳库及其变化[J]. 中国科学:生命科学,2010,40(7):566-576.

[6] Piao Shilong, Fang Jingyun, Ciais P, et al. The Carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009,458(23):1009-1013.

[7] Yang Yuanhe, Fang Jingyun, Tang Yanhong, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. Global Change Biol., 2008, 14(7):1592-1599.

[8] 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[J]. 应用生态学报,2003,14(5):699-704.

[9] 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):693-700.

[10] Zhang Yongqiang, Tang Yanhong, Jiang Jie, et al. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qinghai—Tibetan Plateau[J]. Sci. China: D, 2007,50(1):113-120.

[11] 刘尚武. 青海植物志[M]. 3 卷. 青海 西宁:青海人民出版社,1999:156-157.

[12] 张雨军. 对芨芨草草场资源在鄂尔多斯市开发利用的建议[J]. 内蒙古草业,2002,14(2):28-29.

[13] 卫东,王彦荣. 芨芨草种子发芽检验方法的研究[J]. 草业科学,1998,15(4):29-32.

[14] 吕永光. 苴蓖草在伊克昭盟的分布特点及其发展利用[J]. 香根草通讯,1998,2(2):3-4.

[15] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京:科学出版社,1980.

[16] 淮虎银,魏万红,张镱锂. 青藏铁路沿线温性草原区芨芨草(*Achnatherum splendens*)群落特征[J]. 生态学报,2007,27(2):497-503.

[17] 陈桂琛, 彭敏. 青海省芨芨草草原的群落特征及其分布规律[J]. 西北植物学报,1993,13(2):154-162.

[18] 周国英,陈桂琛,赵以莲, 等. 青海湖地区芨芨草群落特征及其物种多样性研究[J]. 西北植物学报,2003,23(11):1956-1962.

[19] 张明娟,刘茂松,徐驰, 等. 不同密度条件下芨芨草空间格局对环境胁迫的响应[J]. 生态学报,2012,32(2):595-604.

[20] 张翼飞,王炜,梁存柱,等. 内蒙古典型草原区芨芨草群落适生生境[J]. 生态学报,2012,32(4):1193-1201.

[21] 周立华, 孙世洲. 青海省植被图(1∶1 000 000)[M]. 北京:中国科学技术出版社,1990.

[22] 周国英,陈桂琛,魏国良,等. 青海湖地区芨芨草群落主要种群分布格局研究[J]. 西北植物学报,2006, 26(3): 579-584.

[23] 陈克龙,李双成,周巧富,等. 近 25 年来青海湖流域景观结构动态变化及其对生态系统服务功能的影响[J]. 资源科学, 2008, 30(2): 274-280.

[24] 董春雨,王乃昂,李卓仑,等. 基于水热平衡模型的青海湖水位变化趋势预测[J]. 湖泊科学,2009,21(4):587-593.

[25] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978:250-380.

(下转第 82 页)

聚体呈极显著正相关($p<0.01$)。因此,研究土壤团聚体对指导红壤旱地水土保持工作具有指导意义。

[参 考 文 献]

[1] 蔡立群,齐鹏,张仁陆. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(2): 141-145.

[2] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报,1994,31(1): 18-25.

[3] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. Soil & Tillage Research, 1988, 11(3/4):199-238.

[4] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses [J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936,28(5):337-351.

[5] 杨如萍,郭贤仕,吕军峰. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(1):252-256.

[6] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[7] 石辉. 转移矩阵法评价土壤团聚体的稳定性[J]. 水土保持通报,2006,26(3):91-95.

[8] 赵其国,谢为民,贺湘逸,等. 江西红壤[M]. 江西 南昌:江西科学技术出版社,1988:76-89.

[9] 陈永强. 侵蚀红壤肥力退化评价指标体系[J]. 水土保持学报,2001,15(2):72-75.

[10] 孙波,赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地球科学进展,1999,18(2):118-128.

[11] 肖荣诂. 江西省水土流失现状及其防治对策[J]. 水土保持学报, 1994,14(3): 39-43.

[12] 卿太明. 苎麻保持水土效益初步研究[J]. 中国水土保持, 1991(8):29-30,57.

[13] 廖绵清,李靖,黄欠如. 低丘红壤坡耕地苎麻与花生水土保持效果对比研究[J]. 土壤,2011, 43(4):657-661.

[14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.

[15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科技出版社,1978.

[16] 吕文星,张洪江,王伟. 重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J]. 水土保持学报,2010,24(4):192-197.

[17] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展[J]. 水土保持研究,2002,9(1):81-85.

[18] 骆东奇,侯春霞,魏朝富,等. 紫色土团聚体抗蚀特征研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):20-23.

[19] 孙永丽,梅再生. 贵阳市白云岩地区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 贵州师范大学学报, 2006, 24(2): 27-31.

[20] 刘文利,罗广军. 不同林型下土壤物化性质的差异研究[J]. 吉林林业科技,2006,35(1): 26-34.

[21] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学 2007,40(9): 1973-1979.

(上接第 77 页)

[26] 徐艳,张凤荣,段增强,等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 土壤通报,2005,36(6):836-839.

[27] 李鸿博,史锟,徐德应. 植物过程对土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报,2005,26(6):1163-1168.

[28] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展,2005, 20(1):99-105.

[29] 鄢燕,张建国,张锦华, 等. 西藏那曲地区高寒草地地下生物量[J]. 生态学报,2005, 25(11):2817-2823.

[30] 晨乐木格,刘茂松,黄峥,等. 我国西北地区芨芨草—苦豆子群落根系分布与种间关系[J]. 植物生态学报,2009,33(4):748-754.

[31] 张法伟,韩道瑞,郭小伟,等. 青藏高原芨芨草型温性草原不同土地利用方式的理论碳增汇潜力比较[J]. 西北植物学报,2011,31(9):1866-1872.

[32] 周国英,陈桂琛,徐文华,等. 围栏封育对青海湖地区芨芨草草原生物量的影响[J]. 干旱区地理,2010,33(3):434-441.

[33] 吴雅琼,刘国华,傅伯杰,等. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究[J]. 环境科学学报,2008,28(2): 362-367.

[34] 汤洁,韩维峥,李娜,等. 吉林西部草地生态系统不同退化演替阶段土壤有机碳变化研究[J]. 生态环境学报 2010,19(5): 1182-1185.

[35] 冯瑞章,周万海,龙瑞军,等. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究[J]. 土壤通报,2010,41(2): 263-269.

[36] 杨凯,高清竹,李玉娥,等. 藏北地区草地退化空间特征及其趋势分析[J]. 地球科学进展,2007,22(4):410-416.

[37] Post W M, King A M, Wullschleger S D. Soil organic matter models and global estimates of soil organic carbon[C] // Powlson D S. Evaluation of Soil Organic Matter Models. Berlin: Heidelberg: Springererlag, 1996: 201-224.

[38] 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[J]. 地理科学进展,2005,20(4):384-393.

[39] 胡卫国,曹军骥,韩永明,等. 青海湖环湖区表土有机碳氮储量估算[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(9): 85-88.

[40] 张凡,祁彪,温飞,等. 不同利用程度高寒干旱草地碳储量的变化特征分析[J]. 草业学报,2011,20(4):11-18.

[41] 石锋,李玉娥,高清竹,等. 管理措施对我国草地土壤有机碳的影响[J]. 草业科学,2009,26(3): 9-15.