DOI: 10.5846/stxb201408051561
张靖,同丽嘎,李政海,鲍雅静,孙振,胡志超,周丽娜.内蒙古乌审旗有机碳库变化分析及其增汇调控途径.生态学报,2016,36(9): - .
Zhang J, Tong L G, Li Z H, Bao Y J, Sun Z, Hu Z C, Zhou L N.Analysis of organic carbon sink increment and management in Uxin Banner, Inner Mongolia, China.Acta Ecologica Sinica,2016,36(9): - .

内蒙古乌审旗有机碳库变化分析及其增汇调控途径

张 靖[1],同丽嘎[2],李政海[1,*],鲍雅静[1],孙 振[3],胡志超[4],周丽娜[3]

1 大连民族大学环境与资源学院,大连 116600
2 包头师范学院资源与环境学院,包头 014030
3 内蒙古大学生命科学学院,呼和浩特 010021
4 呼和浩特市气象局,呼和浩特 010020

摘要:干旱区面积占陆地总面的积 30—40 %,在全球碳循环过程中占有十分重要的地位。本文以乌审旗陆地生态系统为研究对象,通过对该区域 1977—2012 年间半灌木及草本植被、草甸与沼泽、盐生植被等几种主要植被和土壤有机碳密度进行调查,在 InVEST 碳储与吸收模块支持下,结合 5 期植被类型图,估算了该旗有机碳储量;并以 2012 年为基准年,采用 8 种不同的土地利用情景,对其生态系统碳增汇潜力进行估算,并提出适应该旗地域特点的碳增汇调控途径。结果表明:在 1977—2012 年 35 a 中,乌审旗陆地生态系统有机碳储量呈“V”型变化,平均碳库为 47.38 Tg C(1Tg = 1×10^{12}g = 100 万吨),1977—1997 年为有机碳库储量减少阶段,减少 1.68 Tg C,1997—2012 年为有机碳库储量增加阶段,增加 0.80 Tg C;通过情景分析表明,乌审旗沙地生态系统存在较大的碳增汇潜力,增加森林植被覆盖度、转变土地利用方式、湿地保育等措施是适宜该地区有效的碳增汇途径。通过该研究,以期为权衡生态环境保护和社会经济发展、为形成适合该地区的碳增汇调控途径和措施提供科学依据。

关键词:碳增汇;调控途径;情景分析;InVEST;乌审旗

Analysis of organic carbon sink increment and management in Uxin Banner, Inner Mongolia, China

ZHANG Jing[1], TONG liga[2], LI Zhenghai[1,*], BAO Yajing[1], SUN Zhen[3], HU Zhichao[4], ZHOU Lina[3]

1 *College of Environment and Resources, Dalian Nationalities University, Dalian* 116600, *China*
2 *Faculty of Resources and Environment, Baotou Teacher's College, Baotou* 014030, *China*
3 *College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot* 010021, *China*
4 *Hohhot Meteorological Bureau, Hohhot* 010020, *China*

Abstract: Modifications of land surface through human activity have become an important factor affecting the global carbon cycle. Land surface changes can result in the release of carbon from terrestrial ecosystems. Additionally, through reasonable land use and management, land surface alterations can also serve to increase carbon sinks. In dryland ecosystems, which occupy 30—40% of Earth′s land surface and play an important role in the global carbon cycle, harsh natural conditions combined with frequent human activities release carbon stored in the ‘plant-soil’ continuum as CO_2 into the atmosphere. Given the increased rates of desertification due to climate change, the expansion of arid land surfaces may have a profound impact on the global carbon balance. Therefore, we selected Uxin Banner (equal to county), located in Mu Us Sandy Land, Inner Mongolia, China, as a case study. To assess the increment of organic carbon sinks and the management regulations for arid land, we classified six vegetation categories and 16 sub-categories using cloud-free Landsat images

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DC201501070201, DC201501070403);环境保护部公益性行业科研专项资助项目(201109025-3);大连民族大学人才启动基金资助项目(0701-110088)
收稿日期:2014-08-05; **网络出版日期**:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: li-lzhh@263.net

across five decades (1977, 1987, 1997, 2007, and 2012) using ArcGIS 10.0. Carbon density, including aboveground organic carbon, belowground organic carbon, and soil organic carbon, was also analyzed for each category. Combining vegetation maps and carbon density data, we analyzed organic carbon storage using Cellular Automata-Markov model implemented in InVEST software package to develop different scenarios of carbon sink increment of this area. (1) The results showed that during the 35 years, from 1977 to 2012, carbon storage in Uxin Banner averaged at 47.38 Tg C (1 Tg = 1 × 1012 g = 1 million tons). Patterns revealed that carbon decreased by 1.69 Tg C from 1977 to 1997 and carbon storage increased by 0.77 Tg C from 1997 to 2012. These patterns are similar to those of desertification, where changes in climate coupled with human influence enhanced recovery of vegetation in the region, thereby increasing the carbon sink. (2) The results from the scenario analysis indicate that the potential for carbon sink increment in Uxin Banner is relatively large if effective regulatory approaches, such as increasing the forest vegetation coverage, transferring land use patterns, and wetland conservation, are applied. According to the policy scenario, terrestrial ecosystem carbon stocks of Uxin would increase by 3.83 Tg C compared to those in 2012. Given the dry and rainless climate in the region, drought-tolerant shrubs and indigenous shrubs should be selected in the project for sand fixation and afforestation to reduce the consumption of region's ecological water. According to four desertification scenarios, changes in land use patterns are feasible ways to increase carbon sinks. After stabilization of mobile and semi-fixed sand land, organic carbon pool might increase by 6.98 Tg C compared to the levels in 2012. Changes in land use practice, such as enclosing grassland, forbidding open grazing, extending artificial grassland, and drylot feeding, might help to reduce grazing pressure on grasslands and enhance carbon sink function. Wetland is one of the major vegetation types involved in carbon sequestration in Uxin, which has higher grazing utilization by herdsmen. For the protection of wetland, government should establish regulatory approaches to promote wetland area recovery such as limiting grazing intensity, affording ecological compensation, and establishing reasonable water use of the wetland area. The present research, using scientific output, provides recommendations to encourage balancing between protection of the natural environment and the development of social economy through regulatory approaches and measures suitable for the increment of carbon sinks.

Key Words: carbon sink increment; regulatory approach; scenario analysis; InVEST; Uxin Banner

干旱区面积占陆地总面积 30—40 %,不仅是陆地生态系统的重要组成部分,而且在全球碳循环过程中占有十分重要的地位[1],超过全球陆地生态系统碳储量的 20 %存储在干旱区[2]。严酷的自然条件和频繁的人类活动,使得原本敏感而脆弱的生态系统面临着退化的威胁[3],将“植物—土壤”连续体中所固定的碳以 CO_2 的形式释放到大气中[4]。特别是在未来全球气候变化的背景下,干旱区面积可能会扩大,将对全球碳平衡和气候变化产生更深远影响[5]。由于地域的特殊性,干旱区生态系统有机碳库变化常常表现出和湿润区截然不同的变化特征,如在湿润区人类的土地利用通常会导致碳汇损失[6],而干旱区农业开发通常被认为是碳汇过程[7]。目前,对干旱区生态系统碳库储量变化的研究多集中在:估算干旱区生态系统碳储量变化[8-10],研究不同环境因素对干旱区碳循环的影响[11]、模拟不同气候变化情景下碳汇效应[12-13]、分析土地利用变化对陆地生态系统有机碳库的影响[7, 14]等方面,但对如何促进干旱区生态系统碳增汇方面研究相对较少。

毛乌素沙地从 20 世纪 80 年代末沙漠化扩展的趋势得到抑制,植被覆盖状况恢复明显[15],那么该地区有机碳贮存量发生了怎样的变化,其陆地生态系统是否存在碳增汇的潜力,主要的增汇途径如何。本文以乌审旗为研究区,在揭示该旗有机碳库储量变化特征的基础上,根据当地的特点设定不同土地利用变化情景,对该地区碳增汇潜力进行分析。以期为形成适合该地区的碳增汇调控途径和措施提供科学依据,为陆地生态系统碳增汇技术和对策研究这一科学问题提供理论补充。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

乌审旗位于内蒙古自治区最南端,鄂尔多斯高原东南部,毛乌素沙地腹地。属温带大陆性气候,年均气温

6.8℃,年均降水量约 350 mm,年蒸发量>2200 mm;海拔高度在 1300—1400 m;地貌类型包括:梁地、滩地、固定沙地、半固定沙丘、流动沙丘、内陆湖淖等;土壤类型有:梁地上发育的栗钙土,沙地发育的各类风沙土,滩地、丘间低地等发育的草甸土、盐碱土;境内分布以本氏针茅(*Stipa bungeana*)建群地带性植被,及沙丘地上发育的油蒿(*Artemisia ordosica*)群落和油蒿-中间锦鸡儿(*Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu)群落和沙地先锋植物群落等,滩地、丘间低地、湖滨低地等分布着草甸植被和盐生植被等非地带性植被。

1.2　数据来源及处理

对乌审旗有机碳库储量的估算包括植被有机碳库和土壤有机碳库两部分。2011—2012 年分别设置 33 个调查样地,采样时间为 7 月中旬至 8 月下旬。草本植物样方获得植物分种地上生物量、地上凋落物,使用根钻法获得地下生物量;灌木样方则测量灌木高度、冠幅,采用标准株的方法,计算样方内生物量,通过标准株法得到地下生物量。在各植被样方内分层获得地下 1 m 的土样(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—60 cm、60—100 cm);使用环刀法获得各层土壤容重。使用 EA3000 元素分析仪测定各种植物和不同土壤类型有机碳含量。由于部分植被类型样方只有地上生物量(面积约占乌审旗总面积的 13.89 %),本文从相关文献中查阅根茎(根冠)比例系数,并使用系数 0.45 将生物量转换为有机碳量[16];从文献中获得部分缺乏的土壤有机碳密度值。乌审旗植被类型含碳量数据见表 1。

表 1　不同植被类型的植被地上、植被地下和土壤有机碳含量

Table 1　The organic carbon content of aboveground, belowground and soil among different vegetation types

植被类型一级类 Vegetation categories level I	植被类型 二级类(代码) Vegetation categories level II(Code)	土地利用/覆被类型 Land-use and land-cover categories	2012 年面积百分比 Area ratio of 2012/%	植被地上含碳量 Aboveground carbon content /(g/m²)	植被地下含碳量 Belowground carbon content /(g/m²)	土壤含碳量 Soil carbon content /(g/m²)
森林 Forest	人工林(VGT1)	林地	0.56%	550.7 [a]	72.5[a]	3772.1±34.88
沙地半灌木及草本植被 Semi-shrub in sandy land and herbaceous vegetation	固定沙地上的油蒿群落(VGT2)	固定沙地	25.12%	143.4±19.96	71.8±6.26	4093.6±321.53
	臭柏群落(VGT3)		2.08%	242.7±21.33	80.9±57.20	4682.0±74.22
	柠条、油蒿群落(VGT4)		5.84%	69.7±17.60	124.9±81.24[b]	4859.5±779.02
	油蒿、苦豆子、牛心朴子群落(VGT5)		0.85%	165.6±90.86	103.6±66.22	3505.1±364.07
	沙地柳湾林(VGT6)		7.43%	223.9±70.61	49.3±17.15	2122.1±94.89
	半固定沙地上的油蒿群落(VGT7)	半固定沙地	10.17%	124.4±59.62	45.2±25.07	2887.7±855.95
	牛心朴子、苦豆子、沙米、油蒿群落(VGT8)		0.86%	123.0±53.99	32.2±2.4	2807.2±936.52
	流动沙丘、沙地先锋植物群落(VGT9)	流动沙地	30.68%	87.2±29.64	20.9±7.48	1946.0±60.58
草甸与沼泽 Meadow andmarsh vegetation	寸草滩及禾草滩(VGT10)	沼泽地	7.72%	313.4±198.27	1332.1±842.64	13624.9±392.83
	芨芨草滩(VGT11)		2.21%	185.8±55.17	789.7±234.48	5175.9±556.23
盐生植被 Halophytic vegetation	碱蓬及碱蓬、盐角草群落(VGT12)	盐碱地	1.07%	235.0±165.54	998.6±703.53	890.0 [c]
	盐爪爪及西伯利亚白刺群落(VGT13)		0.08%	236.0±65.87	1063.7±277.50	970.0 [c]
农业群落 Cropland	农田(VGT14)	耕地	4.14%	0	0	2787.5 [d]
其他 Miscellaneous	水体(VGT15)	水域	1.00%	0	0	76.8 [e]
	城镇村(VGT16)	城镇村	0.20%	0	0	1946.0±60.58 [f]

平均值±标准误;a. 根茎比例系数为 0.51[17];b. 根茎比例系数 3.95[18];c. 土壤有机碳含量来源于郑姚闽(2013)[19];d. 农田土壤含碳量数据来源于丁越岿[20];e. 根据吕昌伟的水体碳密度(0.64×10⁴ μmol/L)计算而来[21];f. 本文认为城镇村土壤碳储量为与流动沙地相同。

收集 1977 年 Landsat 3 MSS,1987 年、1997 年和 2007 年的 Landsat 5 TM,2012 年 HJ-1A CCD2 等多期遥感数据,经过几何校正、波段合成,目视解译获得 5 期植被覆盖图(解译过程中参考 1987 年《乌审旗植被图》,植被类型见表 1,该表同时包括植被类型和土地利用/覆盖类型两种分类系统)。将处理好的植被类型图与各植被类型碳密度实测值,应用 InVEST 3.1.0 软件的碳储与吸收模型,计算不同时期的陆地生态系统固碳量。

1.3 碳库变化情景分析

情景预测使用 IDRISI Selva 软件的 CA-Markov 模型,其综合了约束性细胞自动机(Constrained Cellular Automaton)及马尔可夫链模型(Markov)的优点,提高传统细胞自动机模型的模拟精度。各情景均以 2012 年为基准年,模拟终期为 2050 年。情景 1,各植被类型面积变化根据 2007—2012 年 Markov 模型生成的面积转移矩阵发展变化。情景 2,当地政府力争将森林覆盖率提高到 26 %,森林植被包括:人工林群落,臭柏群落,柠条、油蒿群落和沙地柳湾林。为了研究该地区沙漠化变化情况对有机碳库储量的贡献,采用了土地覆盖变化极值的形式设计了情景 3-6:情景 3(沙漠化逆转 1),组成半固定、流动沙地的植被全部转变成固定沙地植被;情景 4(沙漠化逆转 2),组成半固定、流动沙地的植被 50 %面积转变为固定沙地植被;情景 5(沙漠化扩展 1),组成固定、半固定沙地的植被全部转变成流动沙地的植被;情景 6(沙漠化扩展 2)固定、半固定沙地的植被 50 %面积转变成流沙地植被。低湿地植被面积约占乌审旗总面积的 10 %,因此本文设计了情景 7(低湿地植被面积增加 100 %)和情景 8(低湿地植被面积减少 100 %,转变为流动沙地植被),考虑低湿地变化对有机碳库的影响。应用 InVEST 3.1.0 软件的碳储与吸收模型,计算不同情景下乌审旗的陆地生态系统固碳量。

2 结果

2.1 乌审旗陆地生态系统碳库储量变化

以 1977 年乌审旗生态系统有机碳库储量为碳增汇研究的起点。过去 35 a 该旗机碳库变化如表 2 所示。1977 年有机碳库起始值为 47.58 Tg C,经 1987 年减少(47.01 Tg C),到 1997 年有机碳储量减少到最低值(45.90 Tg C),其后有机碳储量开始增加,到 2012 年达到最大值(48.38 Tg C),平均有机碳库是 47.37 Tg C。从各个研究时段碳汇年变化来看:

1977—1987、1987—1997 年,有机碳储量分别减少 0.06 Tg C/a 和 0.11 Tg C/a,变化相对平稳。有机碳储量减少 1.68 Tg C,有机碳库减少区域为 1502.48 km^2,碳库增加区域 1424.60 km^2。1997—2007 年碳汇增量变化较大,年均增汇 0.21 Tg C,增汇现象明显;而 2007—2012 年碳汇增量减弱,为 0.08 Tg C/a,碳库储量相对于 1977 年增加 0.80 Tg C。期间碳库减少区域 1160.40 km^2,碳库增加区域 2176.41 km^2。

2.2 乌审旗陆地生态系统碳增汇潜力分析

不同发展情景下乌审旗有机碳库储量如图 1 所示:情景 1、2、3、4 和 7 的乌审旗陆地生态系统有机碳汇都超过 2012 年参考情景,其中情景 7(低湿地植被面积增加)有机碳库增量最为显著,其次为情景 3(沙漠化逆转,固定沙地面积增加),两者分别较 2012 参考年有机碳库增加 13.40 Tg C 和 6.98 Tg C;情景 5 和 6 是沙漠化扩展情景,情景 8 是低湿地植被面积减少情景,这 3 个情景相对于 2012 参考年有机碳库减少量分别为 10.37 Tg C、4.98 Tg C 和 12.10 Tg C。

一切如常情景(情景 1),有机碳库较 2012 参考年增加 0.41 Tg C;在情景 2 中(政策情景),乌审旗陆地生态系统碳库有了明显的增加,较情景 1 和 2012 年分别增加 1.59 Tg C 和 2.00 Tg C;沙漠化逆转情景(情景 3 和 4),相对于情景 1 有机碳库增加 6.57 Tg C 和 4.33 Tg C,而沙漠化扩展情景(情景 5 和 6),有机碳库量相对于情景 1 减少 10.78 Tg C 和 5.39 Tg C;当低湿地面积增加 1 倍(情景 7)或全部消失时(情景 8),其有机碳库量较情景 1 分别增加 12.99 Tg C 和减少 12.51 Tg C。

3 讨论

3.1 乌审旗陆地生态系统有机碳储量特征

根据研究结果,乌审旗不同植被类型生态系统有机碳储量差异较大,除低湿地和盐生植被的有机碳密度

表 2　不同年份各植被类型面积和有机碳储量变化情况

Table 2　Changes of area and organic carbon storage of different vegetation types at different years

植被类型二级类 Vegetation categories level II	1977 年 Year 1977		1987 年 Year 1987		1997 年 Year 1997		2007 年 Year 2007		2012 年 Year 2012	
	面积 Area/(Km^2)	有机碳储量 Organic carbon storage/(Tg)	面积 Area/(Km^2)	有机碳储量 Organic carbon storage/(Tg)	面积 Area/(Km^2)	有机碳储量 Organic carbon storage/(Tg)	面积 Area/(Km^2)	有机碳储量 Organic carbon storage/(Tg)	面积 Area/(Km^2)	有机碳储量 Organic carbon storage/(Tg)
人工林 (VGT1) Artificial forest	50.03	0.22	56.92	0.25	61.13	0.27	64.56	0.28	65.62	0.29
固定沙地上的油蒿群落(VGT2) *Artemisia ordosica* community in fixed sandy land	2676.34	11.53	2369.47	10.21	2555.31	11.01	2949.30	12.71	2934.32	12.64
臭柏群落 (VGT3) *Sabina vulgaris* community	200.71	1.00	204.62	1.02	194.95	0.98	241.97	1.21	243.26	1.22
柠条、油蒿群落 (VGT4) *Caragana intermedia*, and *Artemisia ordosica* community	755.57	3.82	716.58	3.62	783.58	3.96	706.40	3.57	682.26	3.45
油蒿、苦豆子、牛心朴子群落 (VGT5) *Artemisia ordosica*, *Sophora alopecuroides* and *Cynanchum hancockianum* community	121.01	0.46	109.65	0.41	88.94	0.34	102.82	0.39	99.12	0.37
沙地柳湾林 (VGT6) *Salix mongolica* community	503.36	1.21	509.96	1.22	651.27	1.56	872.88	2.09	867.83	2.08
半固定沙地上的油蒿群落(VGT7) *Artemisia ordosica* community in semi-fixed sandy land	776.64	2.37	697.37	2.13	824.08	2.52	859.80	2.63	1187.20	3.63
牛心朴子、苦豆子、沙米、油蒿群落 (VGT8) *Cynanchum hancockianum*, *Sophora alopecuroides*, *Agriophyllum squarrosum* and *Artemisia ordosica community*	99.09	0.29	92.49	0.27	107.78	0.32	100.90	0.30	99.89	0.30
流动沙丘、沙地先锋植物群落 (VGT9) Pioneer plant community in moving sandy land	4717.42	9.69	5100.20	10.48	4807.70	9.88	3900.37	8.01	3583.04	7.36
寸草滩及禾草滩 (VGT10) *Carex duriuscula* community and marsh grass	911.01	13.91	933.28	14.25	804.18	12.28	891.09	13.61	901.82	13.77
芨芨草滩 (VGT11) *Achnatherum splendens*community	324.80	2.00	323.85	1.99	288.09	1.77	257.04	1.58	258.23	1.59
碱蓬及碱蓬、盐角草群落(VGT12) *Suaeda glauca*and *Salicornia europaea* community	105.61	0.22	113.50	0.24	121.37	0.26	113.30	0.24	125.27	0.27
盐爪爪及西伯利亚白刺群落 (VGT13) *Kalidium foliatum* and *Nitraria sibirica* community	13.08	0.03	16.61	0.04	11.27	0.03	8.79	0.02	8.79	0.02
农田 (VGT14) Cropland	288.86	0.81	301.71	0.84	257.59	0.72	465.87	1.30	483.29	1.35
水体 (VGT15) Water body	132.32	0.01	127.94	0.01	114.26	0.01	121.29	0.01	116.43	0.01
城镇村 (VGT16) Town and village	3.51	0.01	5.21	0.01	7.87	0.02	22.96	0.04	22.96	0.04
合计 Total	11679.35	47.58	11679.35	47.01	11679.35	45.90	11679.35	47.99	11679.35	48.38

http://www.ecologica.cn

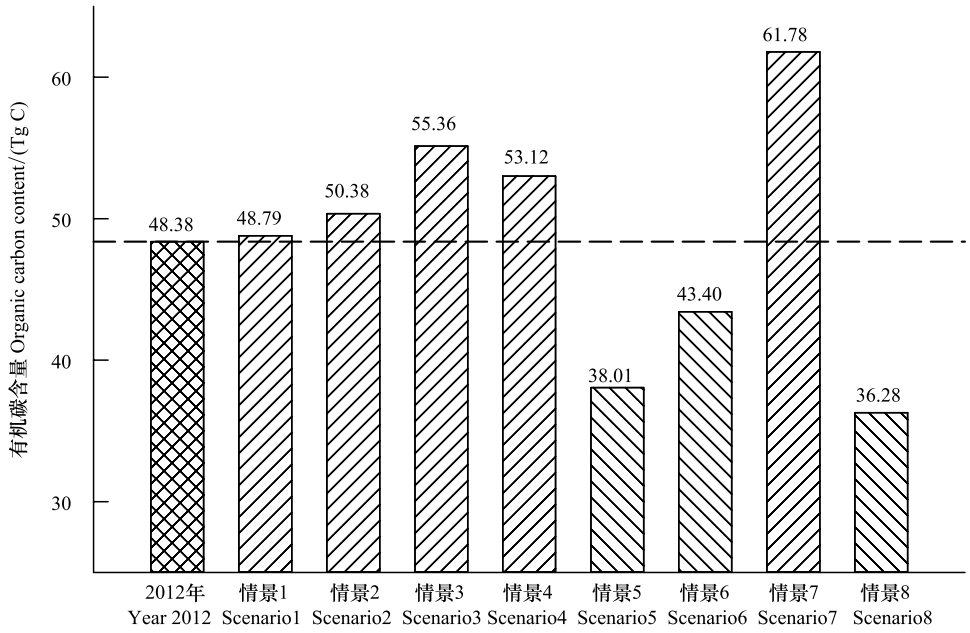

图 1 不同发展情景下乌审旗有机碳库储量

Fig. 1 The organic carbon storage of Uxin under different scenarios

超过或接近 1 kg C/m^2、人工林群落有机碳密度较高外(0.62 kg C/m^2),其他类型的植物群落有机碳密度较少。该旗植被平均有机碳含量为 0.31 kg C/m^2,略低于我国草地植被单位面积有机碳密度 0.32—0.35 kg C/m^2[16, 22],远低于中国陆地生态系统平均有机碳密度 1.47 kg C/m^2[23]。风沙土是主要土壤类型(固定沙地的风沙土有机碳含量仅为 3.51—4.86 kg C/m^2之间),都低于一些学者得出的中国土壤有机碳含量 7.23—19.10 kg C/m^2[23-25],只有草甸与沼泽植被土壤中有机碳含量在这个范围内(13.62 kg C/m^2)。乌审旗陆地生态系统有机碳平均含量为 4.06 kg C/m^2,低于全国 8.01—10.83 kg/m^2的平均范围[26-27]。该旗流动和半固定沙地的面积约占全旗的 50 %,若该部分植被恢复,则可以为乌审旗碳库增加 6.98 Tg C,表明乌审旗沙地生态系统有着一定的碳增汇潜力。

总体来说,乌审旗有机碳库储量变化与其沙漠化变化的趋势基本吻合,且呈“V”型变化。研究表明,20 世纪 90 年代后乌审旗土地沙漠化发生了逆转,人为因素延缓气候作用,并促进该地区植被的恢复[15],进而提高了区域有机碳储量。本研究显示 1977—1997 年该旗有机碳库储量减少,主要因为沙地半灌木及草本植被和草甸与沼泽植被面积减少所致,此阶段沙漠化扩展加剧:寸草滩及禾草滩(面积减少 106.69 km^2,有机碳库减少 1.63 Tg C)、固定沙地上的油蒿群落(面积减少 120.93 km^2,有机碳库减少 0.52 Tg C)、芨芨草滩(面积减少 36.68 km^2,有机碳库减少 0.23 Tg C)、油蒿、苦豆子、牛心朴子群落(面积减少 32.05 km^2,碳库减少 0.12 Tg C)。1997—2012 年有机碳库储量增加阶段,其中 1997—2007 年碳汇增量变化较大,增汇现象明显。其主要原因是流动沙地植被面积(共减少 1224.80 km^2)、固定沙地植被面积(共增加 336.31 km^2)和半固定沙地植被面积(共增加 571.78 km^2)的增加、农田面积(增加 225.82 km^2)的增加等。其中主要碳增汇的植被类型为:固定沙地上的油蒿群落(增加 1.63 Tg C)、寸草滩及禾草滩(增加 1.49 Tg C)、半固定沙地上的油蒿群落(增加 1.11 Tg C)、农田(增加 0.63 Tg C)、沙地柳湾林(增加 0.52 Tg C)。20 世纪 60 年代后,乌审旗地区降水趋于减少、气温逐渐升高,气候因素有利于该区沙漠化发展,但是,20 世纪 90 年代后乌审旗土地沙漠化发生了逆转,人为因素延缓气候作用,并促进该地区植被的恢复[15],如:“双权一制”政策的逐步推行[28],90 年代后期实施的“退耕还林还草”、“禁牧”等政策[29],促进了该地区植被恢复,因此对其有机碳库储量的增加起到了积极的影响。

3.2 乌审旗碳增汇调控途径

根据情景分析的结果,本文认为增加森林覆盖率、转变土地利用方式、湿地保育等措施,是适宜增强该区

域碳增汇能力的有效途径。

(1)增加森林覆盖率,提高乌审旗陆地生态系统固碳能力。该地区森林植被有机碳库储量约占乌审旗总储量的 14 %。根据政策情景(森林覆盖率增加到 26 %),乌审旗陆地生态系统碳库较 2012 年增加 3.83 Tg C。人工植树造林和合理的森林管理措施将可能大大提高生态系统的碳固定能力,如实施飞播造林、加强“三北工程”建设和管护等,在恢复沙地植被的同时提高碳固持能力;在固沙造林活动中,考虑到该地区干旱少雨的特点,应选择耐旱的灌木作为造林的主体树种,不应种植蒸腾耗水量大的速生树种,减少对该地区生态用水的消耗。

(2)转变土地利用方式,恢复区域植被。在理想状态下该地区流动和半固定沙地固定后,有机碳库较 2012 年可以增汇 6.98 Tg C。将占全旗面积较大的流动沙地和半固定沙地固定下来、恢复植被、增加碳汇,转变土地利用方式是可行的措施之一。研究表明轻牧或无牧可以提高区域尺度碳增汇能力[30],通过“围封和禁牧”、“推广人工草场和舍饲技术”等措施减轻对草地的放牧压力,增强草地碳汇功能。同时,通过土地利用集约化程度——促进“粗放型畜牧业向集约型畜牧业转变”和土地利用方式的转变。乌审旗牧户家庭拥有牧业和农业生产技能,鼓励开辟高效地,种植人工草地,“以地养地”,供给牲畜充足草料,减轻放牧压力、恢复植被。最后,积极发展第三产业,鼓励有经济条件的家庭发展特色旅游业等。通过这些措施转变传统的粗放型土地利用方式。

(3)湿地保育,增加固碳潜力。低湿地植被有机碳库含量约为乌审旗碳库储量的 30 %,是主要的固碳植被类型之一。通过情景分析发现(情景 7),乌审旗碳库储量较 2012 年增加 13.40 Tg C,碳增汇效果非常明显。然而,因为湿地植被生长较好,对其放牧利用强度往往较其他区域大。自 1977 年以来,该旗湿地损失碳储量 0.52 Tg C,特别是研究时段 1977—1997 年湿地退化明显。在低湿地保护和恢复过程中,充分发挥政府管理的作用,制定相应的政策,发挥生态补偿的作用,合理引导、限制放牧强度,建立湿地水资源合理利用机制,保障湿地生态用水,促进湿地面积恢复。

3.3　对模型研究精度的讨论

碳计量方法通常还包括模型估算法和 CO_2 通量观测法等。前者包括气候模型、遥感反演模型、光能利用率模型和生态系统过程模型等[30-31]。与其他的碳计量模型相比,InVEST 碳储与吸收模型具有直接、技术简单等优点,特别适用于拥有多期植被类型(土地利用/覆盖)图形或统计数据的快速碳评估。但其假定每一植被类型的碳密度基本保持不变,碳储量变化只能随着植被类型(土地覆盖)类型变化。因此,在研究中计算该旗陆地生态系统碳储量存在着一定的误差,如可能过高估计一些植被群落土壤有机碳含量。植被覆盖的变化或恢复并不意味着土壤有机质的恢复,如流动沙地固定后其新成土经过 40 多年才能演变倾向于区域性的土壤[32];而固定沙地向流动沙地演变后,土壤有机碳损失速度较快[33]。在情景分析中,可能高估了情景 1、2、3、4、7 的碳存储量,而低估情景 5、6 和 8 的碳贮存量。

另外,土壤无机碳是土壤碳的重要组成部分,特别在干旱区无机碳约占土壤含碳量的 30 %。在干旱沙区固沙植被建立后,沙丘表层土壤向地带性的钙积正常干旱土方向演变,随着植被恢复时间延长,土壤无机碳含量不断增加。土壤无机碳在植被演替中的响应相对缓慢,无机碳保持是碳储量长期处于相对稳定的状态[34]。如赵洋等通过研究腾格里沙漠土壤中无机碳密度含量分析发现,天然植被区、各年代固沙区的无机碳含量虽略高于流沙区,但差异不显著[35]。在本研究中由于数据获取的限制没有考虑土壤无机碳在土壤碳库中的地位,低估了陆地生态系统中实际碳储量,因此,在今后的研究中应加强土壤无机碳方面的研究。

4　结论

结论如下:(1)在 1977—2012 年乌审旗陆地生态系统碳库储量呈“V”型变化。研究时段 1977—1997 年是碳库储量减少阶段,减少 1.68 Tg C;研究时段 1997—2012 年处于碳增汇阶段,相对于 1977 年和 1997 年分别增加 0.80 Tg C 和 2.48 Tg C。(2)乌审旗陆地生态系统存在较大的碳增汇潜力。根据情景分析的结果,本

文认为增加森林覆盖度、转变土地利用方式、湿地保育等措施,是适合该地区提高有机碳库储量的可行措施。

参考文献(References):

[1] Lal R. Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems. Environmental Management, 2004, 33(4): 528-544.

[2] Watson R T, Noble I R, Bolin B, Ravindranath N H, Verardo D J, Dokken D J. Land Use, Land-Use Change, and Forestry: A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

[3] 樊恒文, 贾晓红, 张景光, 马凤云, 李新荣. 干旱区土地退化与荒漠化对土壤碳循环的影响. 中国沙漠, 2002, 22(6): 525-533.

[4] Helldén U, Tottrup C. Regional desertification: a global synthesis. Global and Planetary Change, 2008, 64(3/4): 169-176.

[5] 缑倩倩, 屈建军, 韩致文, 肖建华. 西北干旱半干旱区生态系统碳循环研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(35): 205-210.

[6] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global Change Biology, 2002, 8(4): 345-360.

[7] 陈耀亮, 罗格平, 叶辉, 赵树斌, 王渊刚, 韩其飞. 近30年土地利用变化对新疆森林生态系统碳库的影响. 地理研究, 2013, 32(11): 1987-1999.

[8] 陶冶, 张元明. 中亚干旱荒漠区植被碳储量估算. 干旱区地理, 2013, 36(4): 615-622.

[9] Muñoz-Rojas M, De la Rosa D, Zavala L M, Jordán A, Anaya-Romero M. Changes in land cover and vegetation carbon stocks in Andalusia, Southern Spain (1956—2007). Science of the Total Environment, 2011, 409(14): 2796-2806.

[10] Padilla F M, R H, Vidal B, Sánchez J, Pugnaire F I. Land-use changes and carbon sequestration through the twentieth century in a Mediterranean mountain ecosystem: implications for land management. Journal of Environmental Management, 2010, 91(12): 2688-2695.

[11] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(2): 175-188.

[12] 韩其飞, 罗格平, 李超凡, 叶辉, 冯异星. 基于 Biome-BGC 模型的天山北坡森林生态系统碳动态模拟. 干旱区研究, 2014, 31(3): 375-382.

[13] Li C F, Zhang C, Luo G P, Chen X. Modeling the carbon dynamics of the dryland ecosystems in Xinjiang, China from 1981 to 2007-The spatiotemporal patterns and climate controls. Ecological Modelling, 2013, 267: 148-157.

[14] 许文强, 陈曦, 罗格平, 张清, 张豫芳, 唐飞. 基于 CENTURY 模型研究干旱区人工绿洲开发与管理模式变化对土壤碳动态的影响. 生态学报, 2010, 30(14): 3707-3716.

[15] 吴晓旭, 邹学勇, 王仁德, 钱江, 格日乐. 内蒙古乌审旗土地沙漠化退化过程研究. 水土保持研究, 2009, 16(1): 136-140.

[16] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.

[17] 吴小山. 杨树人工林生物量碳计量参数研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.

[18] 牛存洋, 阿拉木萨, 宗芹, 骆永明, 押田敏雄, 孙贵凡, 刘谦. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿地上-地下生物量分配格局. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1980-1986.

[19] 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏, 戴永久, 上官微. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. 科学通报, 2013, 58(2): 170-180.

[20] 丁越岿. 毛乌素沙地不同植被类型土壤有机碳库研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.

[21] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.

[22] 朴世龙, 方精云, 贺金生, 肖玉. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491-498.

[23] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学(D 辑:地球科学), 2003, 33(1): 72-80.

[24] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, Li A B. Soil organic carbon storage in China. Pedosphere, 2004, 14(4): 491-500.

[25] 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.

[26] 韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 张法伟, 李以康, 林丽, 李婧, 唐艳鸿, 古松. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力. 生态学报, 2011, 31(24): 7408-7417.

[27] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2), doi: 10.1029/2001GB001844.

[28] Jiang H. Cooperation, land use, and the environment in Uxin Ju: the changing landscape of a mongolian-chinese borderland in China. Annals of the Association of American Geographers, 2004, 94(1): 117-139.

[29] 王玉华, 杨景荣, 丁勇, 宁争平, 张宏林. 近年来毛乌素沙地土地覆被变化特征. 水土保持通报, 2008, 28(6): 53-57.

[30] Han Q F, Luo G P, Li C F, Xu W Q. Modeling the grazing effect on dry grassland carbon cycling with Biome-BGC model. Ecological Complexity, 2014, 17: 149-157.

[31] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458(7241): 1009-1013.

[32] 杨丽雯, 周海燕, 樊恒文, 贾晓红, 刘立超, 李爱霞. 沙坡头人工固沙植被生态系统土壤恢复研究进展. 中国沙漠, 2009, 29(6): 1116-1123.

[33] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 赵学勇. 不同退化沙地土壤碳的矿化潜力. 生态学报, 2004, 24(2): 372-378.

[34] 崔丽峰, 刘丛强, 涂成龙, 李龙波, 丁虎. 黄土地区不同覆被下土壤无机碳分布及同位素组成特征. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1187-1194.

[35] 赵洋, 陈永乐, 张志山, 吴攀, 回嵘, 虎瑞, 高艳红. 腾格里沙漠东南缘固沙区深层土壤无机碳密度及其垂直分布特征. 水土保持学报, 2012, 26(5): 206-210.