DOI: 10.5846/stxb201803060444

王博,段玉玺,王伟峰,李晓晶,刘宗奇.库布齐东段不同植被恢复阶段荒漠生态系统碳氮储量及分配格局.生态学报,2019,39(7): - . Wang Bo, Duan Yuxi^{*}, Wang Weifeng, Li X J, Liu Z Q.Carbon and nitrogen storage and distribution patterns of desert ecosystems at different vegetation restoration stages in the eastern Hobq Desert.Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

库布齐东段不同植被恢复阶段荒漠生态系统碳氮储量 及分配格局

王 博,段玉玺*,王伟峰,李晓晶,刘宗奇

内蒙古自治区林业科学研究院,呼和浩特 010010

摘要:为科学评价植被恢复促进沙漠化逆转对碳氮储量的影响,以流动沙地、半固定沙地、油蒿固定沙地、柠条固定沙地、沙柳固定沙地 5 个阶段荒漠生态系统为研究对象,采用时空替代法分析植被恢复过程中荒漠生态系统碳氮储量及分配格局。结果表明:不同恢复阶段碳氮储量均表现为:流动沙地(3320.97 kg C/hm²、346.69 kg N/hm²) <半固定沙地(4371.46 kg C/hm²、435.95 kg N/hm²) <油蒿固定沙地(6096.50 kg C/hm²、513.76 kg N/hm²) <柠条固定沙地(9556.80 kg C/hm²、926.31 kg N/hm²) <沙柳固定沙地(19488.54 kg C/hm²、982.11 kg N/hm²)。植被层碳氮储量均呈现随植被恢复逐渐增加的趋势,除流动沙地外,其他阶段碳氮储量均以灌木层为主,占比分别为 66.65%—91.41%和 52.94%—93.39%,草本和凋落物占比较小。灌木各器官生物量及碳储量分配均为:茎>根>叶,氮储量分配无明显规律,草本各器官生物量及碳氮储量分配均为地上部分高于地下部分。土壤层是荒漠生态系统碳氮储量的主体,碳储量占比为 68.64%—99.62%,氮储量占比为 89.26%—99.89%,同样呈现随植被恢复逐渐增加的趋势。碳氮储量随主层加深逐渐降低,具有明显的表层富集特征,且随植被恢复过程富集性显著加强。这说明人工建植促进植被演替实现沙漠化逆转可以显著增强荒漠生态系统的碳氮固存能力。

关键词:荒漠生态系统; 生物量; 碳氮储量; 分配格局; 植被恢复

Carbon and nitrogen storage and distribution patterns of desert ecosystems at different vegetation restoration stages in the eastern Hobq Desert

WANG Bo, DUAN Yuxi^{*}, WANG Weifeng, LI Xiaojing, LIU Zongqi Inner Mongolia Forestry Research Institute, Hohhot 010010, China

Abstract: Storage of carbon (C) and nitrogen (N) in ecosystems is the result of long-term accumulation in vegetation and the soil stratum. In this study, a spatial series analysis was performed, that represented a temporal series to accurately estimate the total C and N reserves of the eastern Hobq Desert ecosystems. Fixed sand was selected for the standard plots to identify the C and N storage and distribution patterns at different restoration stages and in various vegetation and plant organs. The aim of the study was to clarify the effects of vegetation restoration and the reversion process of desertification on the C and N storage in a mobile dune, semi-fixed sand, *Artemisia ordosica* fixed sand, *Caragana korshinskii* fixed sand, and in *Salix cheilophila*. The results revealed that the change trends for the total C and N storage in the desert ecosystems at different restoration stages were the same: mobile dune (3320.97 kg C/hm² and 346.69 kg N/hm²) < semi-fixed sand (4371.46 kg C/hm² and 435.95 kg N/hm²) < *Artemisia ordosica* fixed sand (6096.50 kg C/hm² and 513.76 kg N/hm²) < *Caragana korshinskii* fixed sand (19488.54 kg

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201404204);内蒙古自治区 2016 应对气候变化及低碳发展财政专项资金项目(2740046);林业科技创 新平台项目(2017-LYPT-DW-009)

收稿日期:2018-03-06; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: nmg.dyx@163.com

http://www.ecologica.cn

 C/hm^2 and 982.11 kg N/hm²). Except for the mobile dune, the plant C and N stores at the other sites were mainly distributed in the shrub layer. At these sites, the C and N reserve in shrubs accounted for 66.65%—91.41% and 52.94%—93.39% of the plant layer, respectively. However, the C and N reserve of the herbaceous plants and litter only accounted for a small proportion of the plant layer. Additionally, different organs in the plants had different C and N storage characteristics; the biomass and C reserve of the shrubs both showed the following, stem > root > leaf. The distribution of N storage in the different organs of the shrubs was not significant. The above-ground biomass and the C and N storage of the herbaceous pants were greater than the underground biomass. Like other ecosystems, the main components of a desert ecosystem are the C and N storage in the soil layer, which accounted for 68.64%—99.62% and 89.26%—99.89% of the desert ecosystem, respectively. When the sand was gradually fixed and vegetation cover rate increased, the C and N storage of the shallow soil was greater than that of the deep soil. This revealed an obvious enrichment phenomenon in the surface soil. Additionally, with the reversion of vegetation and soil development, the reversion of desertification could promote the absorption and fixation of C and N in desert ecosystems.

Key Words: desert ecosystem, biomass, C and N storage, distribution pattern, vegetation restoration

生态系统碳氮储量是碳氮长期积累的结果,是植物碳氮、凋落物碳氮和土壤碳氮储量的总和^[1],其大小 会因生态系统类型、区域环境条件以及人为活动干预而变化,这是人们通过土地利用/覆被变化提高生态系统 碳氮储量的理论基础^[2]。植物碳氮含量及储量是植物参与生态系统物质循环和能量流动的主要组分,是衡 量植被动态及其生态功能的主要参数^[34];土壤有机碳含量及储量是反映土壤质量的重要指标,土壤氮储量 作为评价土壤肥力的指标,其含量和密度直接影响植物净初级生产力^[5]。由于生态系统碳和氮氧化物排放 是导致全球气候变暖的直接或间接参与者,使得碳氮生物地球化学循环一直处于气候变化研究的核心^[6]。 因此,明确荒漠生态系统的碳氮固存现状,对合理利用和管理荒漠、评价荒漠生态系统碳氮固存潜力及生态服 务功能具有重要作用。

我国是荒漠化最严重的国家之一,荒漠化面积占国土面积的34%。库布齐沙漠是我国第七大沙漠,位于 鄂尔多斯高原北部和黄河南岸的狭长地带,是我国北方主要的沙源地之一。对于荒漠生态系统,李玉强等^[7] 对科尔沁沙地植被-土壤系统碳氮储量进行的研究表明以提高植被盖度、促进沙地固定和改善土壤质地为目 的的生态恢复和植被建设,能够增加该生态系统碳氮储量,从植被恢复的角度可以认为干旱、半干旱地区荒漠 化土地有较高的碳氮固存潜力。但对于气候、环境条件皆不相同的库布齐沙漠,目前的研究多集中于土壤碳 氮密度^[8]、植被群落结构^[9]、生物多样性、生物量和碳氮含量^[10],尚缺乏对该区域荒漠生态系统碳氮储量的系 统研究。因此,本研究依据人工建植方式、建植年代及植被盖度,以空间代替时间,将沙地划分为五个植被恢 复阶段,通过对植物、凋落物、土壤碳氮含量的测定,分析地上、地下部分碳氮储量特征。旨在准确评估库布齐 荒漠生态系统碳氮储量现状及不同植被恢复阶段碳氮储量的变化,阐明人工建植促进植被恢复实现沙漠化逆 转对荒漠生态系统各组分碳氮固存的影响,为合理评价荒漠在陆地生态系统碳氮循环中的作用提供科学 依据。

1 试验地概况

试验地点位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗境内的布尔陶亥治沙站(110°48′29.28″E,40°03′42.13″N),海拔1100—1300 m,属库布齐东段典型沙漠地貌类型。该区为温带大陆性气候,季节变化明显,干旱多风,昼夜温差大。水热同期,年均气温 6.1—7.1℃,月均最高气温为7月达 23.5℃,年均降水量 240—360 mm, 主要集中于7、8、9月,年均蒸发量 2560 mm。年均日照时数 3138 h,无霜期 130—140 d,年均风速 3.3 m/s。 试验区内土壤以风沙土为主,植被主要包括沙柳(Salix cheilophila)、柠条(Caragana korshinskii)、杨柴 (Hedysarum mongolicum)、油蒿(Artemisia ordosica)等灌木,猪毛菜(Salsola collina)、沙竹(Psammochloa villosa)、沙米(Agriophyllum squarrosum)、狗尾草(Setaria viridis)、蒙古蒿(Artemisiamongolica)、雾冰藜(Bassia dasyphylla)、灌木亚菊(Ajania fruticulosa)等草本。

2 研究方法

2.1 样地设置

根据不同植被恢复阶段划分样地类型,恢复初期的流动沙地(Md)为裸沙地,基本无地表覆被,风蚀严重; 恢复中期的半固定沙地(Sf)因天然落种而少量生长先锋灌木油蒿及其他一年生草本,风蚀减弱;经人工建植 促进植被进一步恢复,地表覆盖度增大,形成恢复后期的固定沙地,基本无风蚀,固定沙地根据不同建植方式 和建群种又细分为3类:飞播后形成油蒿固定沙地(Ar)和柠条固定沙地(Ca),后者地表发育有藻类地衣混合 结皮;沙柳固定沙地(Sa)为人工行带式扦插沙柳枝条,促进植被恢复,形成沙柳优势群落,且成林后地表发育 苔藓结皮。3类固定沙地地形基本一致,均处于沙丘迎风坡,气候背景值和生长环境基本相同。各类型样地 随机布设3块10m×10m灌木样地及5块1m×1m草本和凋落物样方进行植被特征调查,同时在每块灌木 样地内随机挖取3个土壤剖面,分层取土样带回实验室测定相关指标,各样地基本情况见表1。

			Table 1 Collution	is of unferen	it sample typ	hee			
	建植方式	<i>休白</i> #1		草本 H	Ierbage		灌木 Shrub		
样地类型 Sample type	vegetation restoration means	恢复期 Recovery period	优势植物 Dominant plants	株高 Height/cm	密度 Density/ (株/m ²)	株高 Height/cm	冠幅 Canopy/m ²	密度 Density/ (株/hm ²)	盖度 Coverage/%
Md	_	_	猪毛菜(Salsola collina)、沙竹 (Psammochloa villosa)	9.7	10	—	_	_	2.7
Sf	_	_	油蒿(Artemisia ordosica)、 猪毛菜	9.5	48	51.2	1.3	15	15.2
Ar	飞播	2002—2017	油蒿、杨柴(Hedysarum mongolicum) 、猪毛菜	10.4	62	78.3	1.5	135	45.3
Ca	飞播	2002—2017	柠条(Caragana korshinskii)、 油蒿、杨柴、猪毛菜	19.3	169	130.4	1.8	25	52.6
Sa	人工植苗	2002—2017	沙柳(Salix psammophila)、油蒿、 杨柴、狗尾草(Setaria viridis)	5.4	51	119.5	2.5	148	60.2

表 1 样地基本信息 Table 1 Conditions of different sample types

Md:流动沙地, mobile dune; Sf:半固定沙地, semifixed sand; Ar:油蒿固定沙地, Artemisia ordosica fixed sand; Ca: 柠条固定沙地, Caragana korshinskii fixed sand; Sa: 沙柳固定沙地, Salix cheilophila fixed sand

2.2 植被层生物量及碳氮含量测定

每块灌木样地内分植物种统计所有灌木株高、冠幅、基径、分枝数等生长参数并计算平均值,依此选择标 准株3株,采用全挖法获取灌木地下根系,地上部分进行茎叶分离,分别测定根、茎、叶总鲜重并取样。草本样 方地上部分采取刈割法,地下部分全挖,分别测定鲜重并取样。凋落物采用收获法获得样方地表所有枯枝落 叶,测定鲜重并取样。植被层所有样品均取200g(不足200g则按全部计)带回实验室,烘箱内105℃杀青2 h,85℃烘干至恒重,由此计算样本生物量。样品经烘干、粉碎、过筛后进行有机碳、全氮含量测定,前者采用重 铬酸钾—浓硫酸氧化外加热法测定,后者采用凯式定氮法测定。

2.3 土壤层容重及碳氮含量测定

每个灌木样地内分6层(0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm)挖取3个土壤剖面,每一层 采用环刀法测定原状土容重,用以计算各层单位面积土壤质量。对每一层混合取样后带回实验室阴干,粉碎、 过筛后测定土壤有机质、全氮含量,测定方法同2.2。 2.4 碳氮储量计算

(1) 植被层碳氮储量计算:

灌木(草本、凋落物)碳氮储量=灌木(草本、凋落物)生物量×灌木(草本、凋落物)含碳率/含氮率 (2)土壤层碳氮储量计算:

$$SOC(N) = \sum_{i=1}^{n} 100 \times C(N)_{i} \times D_{i} \times H_{i} \times (1 - G_{i})$$

式中,SOC(N)为土壤层碳氮储量(kg/hm²), $C(N)_i$ 为第 i 土层有机碳或全氮含量(g/kg), D_i 为第 i 土层容重 (g/cm³), H_i 为第 i 土层厚度(cm), G_i 为第 i 土层砾石体积含量(%)。

2.5 数据处理

试验数据处理及作图采用 Excel 及 Sigmaplot 12.5 软件进行,并采用 SPSS 20.0 软件进行统计检验,选取 最小显著极差法(LSD)进行差异显著性检验(α=0.05)。

3 结果与分析

3.1 生物量分配格局

荒漠生态系统不同恢复阶段植被层生物量差异显著(P<0.05),并随植被恢复及覆盖度增加明显增大,如表2,各阶段生物量分别为:流动沙地(2.95 g/m²)<半固定沙地(63.13 g/m²)<油蒿固定沙地(300.08 g/m²)< 柠条固定沙地(650.36 g/m²)<沙柳固定沙地(893.86 g/m²)。除流动沙地地表没有灌木生长外,其他阶段生 物量均以灌木为主,且不同沙地灌木生物量差异显著(P<0.05),占总生物量比例分别为:半固定沙地 (51.56%)<油蒿固定沙地(83.79%)<柠条固定沙地(85.41%)<沙柳固定沙地(92.06%)。在不同恢复阶段, 灌木各器官生物量差异显著且分配比例表现为:茎(49.86%—60.95%)>根(22.39%—31.80%)>叶(16.66%— 18.55%),但因不同阶段建群种不同,各器官分配比例随植被恢复程度并无明显变化规律。

		14010 2 21011	灌木 Shrub	and the second sec	草本 H	lerbage		总生物量
样地类型 Sample type	植物种 Plants	根 Root /(g/m ²)	茎 Stem /(g/m ²)	叶 Leaf /(g/m ²)	地上部分 Aboveground /(g/m ²)	地下部分 Underground /(g/m ²)	凋落物 Litter/ (g/m ²)	Total biomass/ (g/m ²)
Md	_	—	—	—	2.13 ± 0.56 c	$0.82{\pm}1.02{\rm c}$	—	2.95e
Sf	油蒿	$0.72 \pm 0.12 e$	$1.02 \pm 0.17 e$	$0.84{\pm}0.14{\rm e}$	$16.32 \pm 1.91 \mathrm{b}$	5.67±1.32a	8.59±4.11c	63.13d
	杨柴	$9.63{\pm}2.83{\rm d}$	$15.21{\pm}4.47\mathrm{d}$	5.13 ± 1.51 d				
Ar	油蒿	$34.76 \pm 18.37 c$	$122.76{\pm}64.89\mathrm{b}$	$32.12{\pm}16.98\mathrm{c}$	$13.11{\pm}10.39\mathrm{b}$	$2.60{\pm}2.35{\rm b}$	$32.92{\pm}22.53\mathrm{b}$	300.08c
	杨柴	$21.55{\pm}5.83{\rm c}$	$30.50 \pm 8.26c$	$9.76{\pm}2.64\mathrm{d}$				
Ca	柠条	$138.98 \pm 47.23 \mathrm{b}$	$302.04 \pm 102.65 a$	$90.00{\pm}30.58\mathrm{b}$	33.63±6.7a	6.58±0.98a	$54.44 \pm 8.85a$	650.36b
	油蒿	$3.73 \pm 2.36e$	$10.22{\pm}6.49\mathrm{d}$	$3.73 \pm 2.36 \mathrm{d}$				
	杨柴	$2.32{\pm}1.25{\rm e}$	$3.57{\pm}1.92{\rm e}$	$0.85 \pm 0.45 e$				
Sa	沙柳	223.52±119.35a	$360.48 \pm 192.49a$	138.72±74.07a	$0.77 \pm 0.18 c$	$0.23{\pm}0.08{\rm c}$	69.98±40.30a	893.86a
	油蒿	$22.40 \pm 11.96c$	41.61±22.21c	$10.40{\pm}5.55\mathrm{d}$				
	杨柴	$9.61{\pm}6.82{\rm d}$	$12.66{\pm}8.99\mathrm{d}$	$3.49{\pm}2.48\mathrm{d}$				

表 2 不同恢复阶段植被层生物量分配特征

同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

荒漠地区草本植物多为一年生且植株矮小、叶片退化,导致草本层在总生物量中占比较小,且呈现随植被恢复而减小的趋势:流动沙地(100%)>半固定沙地(34.83%)>柠条固定沙地(6.18%)>油蒿固定沙地(5.24%)>沙柳固定沙地(0.11%)。不同恢复阶段草本层生物量差异显著(P<0.05),器官分配均为地上部分(72.20%—83.64%)>地下部分(16.36%—27.80%),但分配比例随植被恢复无明显变化规律。流动沙地由于植被稀少且风蚀严重,地表无凋落物积累,而其他沙地随植被恢复地表凋落物生物量逐渐增大且差异显著

(P<0.05),表现为半固定沙地(8.59 g/m²)<油蒿固定沙地(32.92 g/m²)<柠条固定沙地(54.44 g/m²)<沙柳固 定沙地(69.98 g/m²),但由于灌木生物量的显著增加,导致凋落物在总生物量中的占比逐渐减小。

3.2 植被层碳氮储量分配格局

3.2.1 植被层碳氮含量

不同种类植物和同一植物的不同器官中碳氮含量不同。植被层含氮率总体表现为:灌木(1.38%)>凋落物(0.87%)>草本(0.75%),含碳率为灌木(46.72%)>草本(44.29%)>凋落物(43.28%)。灌木各器官含氮率特征为:叶(2.18%)>根(1.03%)>茎(0.92%),含碳率为茎(47.65%)>根(46.45%)>叶(46.06%);草本各器官含氮率表现为地上部分(1.11%)>地下部分(0.39%),含碳率为地下部分(44.80%)>地上部分(43.78%)。不同恢复阶段凋落物含氮率总体表现为:油蒿固定沙地(0.68%)<半固定沙地(0.81%)<柠条固定沙地(0.94%)<沙柳固定沙地(1.05%);含碳率为:沙柳固定沙地(38.23%)<柠条固定沙地(42.88%)<半固定沙地(45.28%)<油蒿固定沙地(46.72%)。

3.2.2 植被层碳氮储量

荒漠生态系统植被层碳氮储量随植被恢复不断增大,各阶段碳氮储量差异显著(P<0.05)。如表 3,植被 层碳储量表现为:流动沙地(12.55 kg C/hm²)<半固定沙地(294.37 kg C/hm²)<油蒿固定沙地(1431.78 kg C/ hm²)<柠条固定沙地(2997.30 kg C/hm²)<沙柳固定沙地(4114.05 kg C/hm²),植被层氮储量为:流动沙地 (0.37 kg N/hm²)<半固定沙地(6.63 kg N/hm²)<油蒿固定沙地(28.07 kg N/hm²)<沙柳固定沙地(67.43 kg N/hm²)<柠条固定沙地(99.46 kg N/hm²)。除流动沙地无灌木生长外,其余各阶段沙地植被层碳氮储量均以 灌木为主,碳氮储量平均分别占植被层的 89.03%和 88.02%。不同恢复阶段灌木碳储量差异显著(P<0.05), 沙柳固定沙地(3842.04 kg C/hm²)>柠条固定沙地(2584.24 kg C/hm²)>油蒿固定沙地(1207.79 kg C/hm²)> 半固定沙地(155.84 kg C/hm²);灌木氮储量差异同样显著(P<0.05),柠条固定沙地(90.92 kg N/hm²)>沙柳 固定沙地(59.99 kg N/hm²)>油蒿固定沙地(24.49 kg N/hm²)>半固定沙地(4.42 kg N/hm²)。各阶段灌木层 各器官中碳储量分配均以茎为主,平均占比为 55.19%,根次之(27.55%),叶碳储量最小(17.26%);各器官氮 储量分配不尽相同,半固定及油蒿固定沙地为茎>叶>根,柠条固定沙地为茎>根>叶,沙柳固定沙地则为叶>茎 >根。

草本层碳氮储量在植被层中占比最小,分别仅为4.14%和3.36%,并有随植被恢复占比减小的趋势,其中 碳储量表现为:流动沙地(100%)>半固定沙地(33.85%)>柠条固定沙地(5.99%)>油蒿固定沙地(4.90%)>沙 柳固定沙地(0.11%);氮储量为:流动沙地(100%)>半固定沙地(22.94%)>油蒿固定沙地(4.80%)>柠条固定 沙地(3.47%)>沙柳固定沙地(0.12%)。各阶段草本层各器官碳氮储量分配均以地上部分为主,其碳储量平 均占草本层 77.53%,氮储量占 89.96%。凋落物层碳氮储量在植被层中占比略大于草本层,分别为 7.84%和 7.61%。在植被恢复过程中凋落物碳氮储量逐渐增加,表现为沙柳固定沙地>柠条固定沙地>油蒿固定沙地> 半固定沙地。

3.3 土壤层碳氮储量分配格局

3.3.1 土壤层碳氮含量

不同植被恢复阶段土壤有机碳和全氮含量差异显著(P<0.05),且均随植被恢复逐渐增加,其中有机碳含量表现为:流动沙地(0.24 g/kg)<半固定沙地(0.29 g/kg)<油蒿固定沙地(0.35 g/kg)<柠条固定沙地(0.48 g/kg)<沙柳固定沙地(1.17 g/kg);全氮含量为:流动沙地(0.02 g/kg)<半固定沙地(0.03 g/kg)<油蒿固定沙地(0.04 g/kg)<柠条固定沙地(0.06 g/kg)<沙柳固定沙地(0.07 g/kg)。土层深度对土壤有机碳和全氮含量能够产生显著影响,如图1,二者均随深度增加呈减小趋势。

3.3.2 土壤层碳氮储量

荒漠生态系统不同植被恢复阶段土壤层碳氮储量差异显著(P<0.05),如表4,土壤层碳氮储量表现为:流 动沙地(3308.42 kg C/hm²、346.32 kg N/hm²)<半固定沙地(4077.10 kg C/hm²、429.32 kg N/hm²)<油蒿固定





图 1 不同恢复阶段土壤全氮和有机碳含量



Md:流动沙地, mobile dune; Sf:半固定沙地, semifixed sand; Ar:油蒿固定沙地, Artemisia ordosica fixed sand; Ca: 柠条固定沙地, Caragana korshinskii fixed sand; Sa:沙柳固定沙地, Salix cheilophila fixed sand

3.4 荒漠生态系统碳氮储量分配格局

荒漠生态系统总碳储量为 42834 kg C/hm²,氮储量为 3204 kg N/hm²,且碳氮储量在不同植被恢复阶段分 配存在较大差异(Ca 与 Sa 氮储量差异不显著)。如图 2,生态系统碳氮储量呈现随植被恢复不断增大的趋势,表现为流动沙地(3320.97 kg C/hm²、346.69 kg N/hm²)<半固定沙地(4371.46 kg C/hm²、435.95 kg N/ hm²)<油蒿固定沙地(6096.50 kg C/hm²、513.76 kg N/hm²)<柠条固定沙地(9556.80 kg C hm/hm²、926.31 kg N hm/hm²)<沙柳固定沙地(19488.54 kg C hm/hm²、982.11 kg N hm/hm²)。不同恢复阶段各层碳氮储量分配

0-10

3.6

					灌木 Shrub	D			,		erbage		调落物 Lit	.er/(kg/m ²)
羊地型	植物种	¥	₹ Root/		娄 Stem/		□† Leaf/		地上部	公	地下	部分		2
Sample	Plants		kg/m ²)		(kg/m^2)		(kg/m ²)		Abovegrou (kg/m ²	, (Under (kg	ground/ /m ²)		
type		氮储量	碳储量	氮储。	量 碳储	里	储量碱	诸星 多	悥储量	碳储量	氮储量	碳储量	氮储量	碳储量
РW								- 0.3	34±0.05b 8	80±1.17c}	$0.03\pm0.01b$	3.75±0.81c	I	I
X	油蒿	0.02±0.01d	3.23±0.41	lf 0.05±0.	.01e 4.82±0	.33f 0.1	l±0.03c 4.00	9±0.69f 1.3	30±0.26b 73	(.58±18.55b	$0.22 \pm 0.15a$	26.05±9.92a	$0.69{\pm}0.07c$	$38.89 \pm 0.42 c$
	杨柴	$1.15\pm0.17c$	45.79±6.8⁄	4d 1.79±1.	29c 73.37±5.	3.06d 1.30)±0.72c 24.5 [∠]	t±13.64e						
Ar	油蒿	1.43±0.79c	164.76±91.9	91c 4.98±1.	.13c 594.81±1.	34.43b 6.20)±0.81b 156.0	6±20.15c 1.2	24±0.59b 58	.48±37.12b	0.11±0.04a	$11.71 \pm 6.89b$	2.23±2.07b	$153.81 \pm 101.08b$
	杨柴	2.83±0.91c	103.31±33.	34c 5.90±2.	.19c 143.82±5	53.33c 3.0	5±1.10c 45.05	}±16.26d						
Ca	柠条	$31.24\pm13.55_{\hat{e}}$	i 633.01±274.	65b 35.37±1.	3.43a 1428.59±	542.45a 21.7	4±7.50a 405.44	t±139.75b 3.1	19±0.74a 15	0.02±45.32a	$0.27 {\pm} 0.08a$	29.62±6.61a	5.09±1.43a	233.42±34.89a
	油蒿	$0.15\pm0.07c$	17.68±8.1(0e 0.41±0.	25c 49.52±2	9.93d 0.7.	}±0.39c 18.1	2±9.67e						
	杨柴	$0.31{\pm}0.13c$	11.12±6.5′	2e 0.69±0.	.50c 16.83±0).68e 0.2	⁷ ±0.14c 3.9′	2±2.01f						
Sa	沙柳	7.11±1.31b	1036.89±191	.55a 17.99±1	.40b 1720.75±1	134.38a 25.4	4±7.42a 604.2t	5±176.33a 0.0	37±0.01c 3	}.43±0.98c	$0.01{\pm}0.002\mathrm{b}$	$1.04\pm0.45c$	7.36±3.93a	267.54±150.54a
	油蒿	$0.92 \pm 0.43c$	106.17±49.9	99c 1.69±0.	40c 201.56±4	17.92c 2.0	t±0.37c 50.5	3±9.19d						
	杨柴	1.26±1.09c	46.07±25.2	2.45±1.	.62c 59.70±3.	2.97d 1.0)±0.56c 16.1	0±7.94e						
总计	- Total	46.42	2168.03	71.3.	2 4293.	78 (2.06 13	328.10	6.14	294.31	0.63	72.16	15.37	693.66
						表4 不同	蛃复阶段土 攘碳§	悥储量分配特征	н					
				Table 4	1 Carbon and ni	trogen storage	allocation characte	vristics of soil at	t different stag	tes of recover	ry			
	П	Md	N		34/		Ar/		Ca/		Sa⁄		合计Tot	al/
Ĥ,	14	(kg/h	um ²)	(kg⁄	(hm ²)	(k	∕/hm²)	(kg	√hm²)		(kg/hm^2)		(kg/hm	5)
1 1100	ayer	氮储量	碳储量	氮储量	碳储量	氮储量	碳储量	氮储量	碳储量	氮作	诸量	炭储量	氮储量	碳储量
0-1() cm 5	52.66±10.77b	643.39±32.06a	99.19±17.91a	741.27±32.19b	$103.42\pm 34.53i$	i 1137.44±158.13a	133.05±30.81b	1547.34±276	.78a 280.55=	±29.01a 3861.	75±419.19a	668.87	7931.19
10-2	0 cm 4	46.96±1.71b	525.46±68.71b	$69.68{\pm}10.24\mathrm{b}$	677.91±41.73b	72.83±5.92b	895.23±70.29b	$104.04{\pm}5.73c$	1110.83±105	.50b 158.48-	±27.42b 2327.0	64±159.81b	451.98	5537.08
20—4	0 cm 8	33.67±5.06a	799.29±73.03a	91.70±9.97a	1050.78±120.66a	104.97±3.16a	1042.96±199.76a	175.74±24.58a	1429.69±231	.22a 195.22 .	±32.41b 3155.	78±518.66a	651.29	7478.50
40—6	0 cm 6	€0.12±20.13b	582.59±153.75b	60.13±9.96b	699.97±203.85b	78.29±19.47	691.10±124.16b	i 150.19±0.18a	935.03±109	.51b 117.62:	±28.94c 2180.	86±578.59b	466.35	5089.55
60 - 8	0 cm 5	53.75±14.60b	449.33±45.61b	$56.59 \pm 10.28 \mathrm{b}$	588.12±134.13b	66.78±3.52b	$536.46\pm46.38c$	$138.19\pm 23.10b$	802.12±67.	11c 90.45=	±21.67c 2069.0	09±453.54b	405.77	4445.12

7 期

http://www.ecologica.cn

王博 等:库布齐东段不同植被恢复阶段荒漠生态系统碳氮储量及分配格局

3502.79 33984.2

358.63 3002.8

72.36±12.60c 1779.38±349.91c 15374.49

734.48±67.26c 6559.50

361.52±36.21d 125.66±27.78b 826.85

 $59.42\pm9.73b$ 485.70

 $319.04{\pm}109.24c$ 4077.10

 $52.04{\pm}8.73\mathrm{b}$ 429.32

 $308.36\pm 25.88c$ 3308.42

 $49.15\pm11.82b$ 346.32

 $80{--}100~{\rm cm}$ 总计 Total

4664.71

914.68

比例不同,流动沙地为土壤层(99.62%、99.89%)>草本层(0.38%、0.11%),半固定沙地为土壤层(93.27%、 98.48%)>灌木层(3.57%、1.01%)>草本层(2.28%、0.35%)>凋落物层(0.89%、0.16%),而油蒿、柠条和沙柳固 定沙地均为土壤层>灌木层>凋落物层>草本层。总体来说,荒漠生态系统碳氮储量随植被恢复逐渐增大,处 于植被演替初期的流动沙地碳氮储量仅占整个荒漠生态系统的7.75%和10.82%,而植被盖度最大、生境最稳 定的沙柳固定沙地总碳氮储量占比却可达45.50%和30.64%;如图2,土壤层是各恢复阶段荒漠生态系统碳氮 储量的主体,碳储量占比为68.64%—99.62%,氮储量占比为89.26%—99.89%。





Fig.2 Carbon and nitrogen storage allocation characteristics of desert ecosystems at different stages of recovery

4 讨论

4.1 植被恢复对荒漠生态系统生物量的影响

干旱、半干旱地区的荒漠化土壤呈现高度粗粒化和单一化,较差的持水性和贫瘠的养分状况限制了植物 的生长,仅通过自然恢复力短期内很难实现沙漠化逆转[11]。但通过人工植被的建立,可以有效促进荒漠生态 系统植被恢复进程^[12]。植被覆盖度和生物量是衡量植物群落发展的量化参数,可以客观反映荒漠化土地的 植被恢复程度^[13]。本研究中不同植被恢复阶段地表覆盖度和生物量差异显著,从流动沙地到沙柳固定沙地, 植被覆盖度由 2.7%增加到 60.2%,总生物量由 2.95 g/m²增长到 893.86 g/m²,表明人工建植促进植被恢复可 以显著增加荒漠生态系统生物量,这与学者对科尔沁沙地的研究结果相同[7],毛乌素沙地通过飞播造林,在 植被恢复过程中地上、地下生物量明显增长[14],腾格里沙漠流动沙地封育后促进植被演替,植被盖度和生物 量随封育年限逐渐增加[15]。荒漠生态恢复的最终目的是建立具有生物多样性、抗逆性强的近自然植物群落, 首要任务是选择合适的建群植物种和建植方式,保证演替的快速良性发展[16]。本研究中通过人工植苗形成 的沙柳群落植被覆盖度和生物量均显著高于飞播形成的油蒿和柠条固定沙地,这是因为沙柳作为库布齐沙漠 优良的固沙树种,具有生长迅速、萌蘖力强、成活率高的特点,人为栽植后可在较短时间形成枝叶茂密的沙柳 林带,并扩展出发达的水平根系。另一方面,荒漠地表由于风蚀强烈和极端干旱,阻碍飞播后种子萌发和幼苗 生长,导致短期内无法形成结构稳定的植物群落,减缓植被恢复进程[14]。郝璐[17]在荒漠草原的研究也表明 飞播或自然恢复短期内很难成林,人工植苗造林后的植被盖度、高度和生物量均显著高于前者,具有更强的物 质输入和能量固定。由此可知,适地适树并选择合适的建植方式,对于荒漠生态系统的植被恢复,地表植被盖 度和生物量的增加至关重要。同时,本研究中库布齐沙漠东段平均生物量为 382.07 g/m²,与北美 Chihuahuan 荒漠生态系统相似(320 g/m²)^[18],但低于 Sonoran 沙漠(640 g/m²)^[19]和全球荒漠生态系统生物量的平均水 平(700-800 g/m²)^[20],较低的生物量和净初级生产力充分表明该地区生态系统十分脆弱,虽然已出现植被 的正向演替,但很容易因气候变化和人为干扰中断演替甚至出现逆向演替^[21],合理的土地利用和管理是防止 沙漠化反复的重要措施。

4.2 植被恢复对荒漠生态系统土壤碳氮的影响

在植被恢复进程中,植物群落的发育和演替过程,实际上伴随着植物自身对生境土壤的不断适应和改造 过程,二者是荒漠生态系统中紧密联系的两个子系统,通过相互促进协同作用实现沙漠化逆转[22]。流动沙地 土壤以松散易蚀、干旱贫瘠为特征,当植被开始恢复,植物生长固定土壤的同时会改变其理化性质并增加养分 含量。土壤有机碳和全氮是土壤养分的重要组成部分,也是生态系统物质循环的重要参与者^[23],二者含量主 要取决于碳氮元素输入和输出,输入来源主要是植物残体的形成和分解^[24]。在植被恢复过程中,植被盖度和 生物量增加的同时返还地表的凋落物也逐渐积累,为植物残体的形成提供充足基材^[25]。而且植物的生长有 效改善土壤水热条件,为微生物的生长繁殖提供有利空间,提高生命活性,进而加速对植物残体的分解速率, 利于碳氮元素回归土壤[26]。同时,风蚀容易造成表层土壤碳氮流失,但随植被恢复,地表覆盖程度增大和生 物结皮的发育,可有效减弱风沙流活动,从而起到保护土壤碳氮的作用^[27]。本研究中,从流动沙地到沙柳固 定沙地, 凋落物生物量由0增加到69.98 g/m², 土壤有机碳和全氮含量也因凋落物的累积显著增加, 前者由 0.24 g/kg增至 1.17 g/kg,后者由 0.02 g/kg 增致 0.07 g/kg,充分说明植被恢复能够有效提高荒漠土壤养分含 量,促进土壤形成发育,这与齐雁冰等[28]的研究结果一致,李尝君等[29]在塔克拉玛干沙漠的研究也得到相同 结论。当土壤水肥条件得到改善,又可为植物生长提供更多营养物质,使植被得以更好恢复,这种植被-土壤 的协同作用、相互影响的反馈关系,成为荒漠生态系统良性发展的驱动力^[30]。研究发现土壤碳氮储量随土层 加深而逐渐降低,0-20 cm 碳储量占土壤层总碳储量的(34.81%-43.58%), Veldkamp^[31]也提出荒漠土 0-30 cm 土层碳储量占比达到 39—70%,表明荒漠土壤具有明显的养分表层富集现象,这是因为植物与土壤的 交互作用主要发生在根际环境,而研究区中沙柳、油蒿等灌木根系 70% 生物量集中于 0-30 cm 土层,表层土 体必然成为根系吸收养分和根系分泌物改造土壤质地的主要场所^[32]。

4.3 植被恢复对荒漠生态系统碳氮储量的影响

土地利用方式变化对生态系统碳氮储量具有重要影响,尤其在荒漠生态系统中,通过人工建植加速植被恢复,可以有效提高地表植被覆盖程度,且随油蒿、柠条和沙柳等荒漠灌丛的生长,土壤资源聚集于灌丛下,形成水土气生较好的"肥力岛"^[33],改变荒漠地貌类型,促使土壤沙漠化过程发生逆转,增加生态系统碳氮储量。本研究中,从流动沙地到沙柳固定沙地,生态系统碳储量从3320.97 kg C hm/hm² 增至 19488.54 kg C hm/hm²,氮储量从 346.69 kg N hm/hm² 增至 982.11 kg N hm/hm²,表明在植被恢复过程中,荒漠生态系统碳氮储量具有显著增加的趋势,这与周欣等^[34]的研究结果一致,而赵哈林^[35]则从植被退化的角度证明沙漠化会导致生态系统碳氮储量严重损失。植被层和土壤层是碳氮存储的主体,植被恢复能够显著增加植被层和土壤层碳氮输入,是影响荒漠生态系统碳氮储量的直接因素,同时植被恢复是一个复杂的生物和生态过程,受到诸多环境因素影响,而这些因素也将成为影响荒漠生态系统碳氮储量的间接因素。本研究中,在人工植被建立后,气候是驱动植被向地带性群落演替最重要的外在动力^[36],决定着库布齐沙漠碳氮储量的终值;植物的生存策略是植被恢复演替的内在动力,植物的繁殖方式、生长规律、能量分配及植被-土壤协同作用决定了不同阶段荒漠生态系统碳氮固存的速率^[37],这是分别以油蒿、柠条和沙柳为建群种的固定沙地碳氮储量存在差异的主要原因。

5 结论

库布齐东段荒漠生态系统在植被恢复过程中,碳氮储量具有明显的随植被恢复而逐渐增加的趋势,不同恢复阶段碳氮储量差异显著。从流动沙地逐步演变到沙柳固定沙地的过程中,地表植被盖度和生物多样性逐渐增大,植被层生物量和碳氮储量亦显著增加,其中又以灌木层为主体,草本层和凋落物层占比较小,并且灌木及草本层生物量及碳储量的垂直空间分布特征均为地上部分高于地下。在植被恢复过程中,植物的生长及

其变化影响土壤的形成和发展,改良土壤理化性质,从而增加土壤层碳氮储量,且由于根系与土壤的交互影响 及植物残体的分解输入,使得碳氮表层富集现象十分明显。总体来说,荒漠生态系统通过人工建植促进植被 恢复,可有效实现沙漠化逆转,增加各组分碳氮储量,具有较好的碳氮固存潜力,是陆地碳氮循环中重要的 "汇"。

参考文献(References):

- [1] 冯进, 袁伟影, 高俊琴, 安菁, 张晓雅. 青藏高原海北高寒湿地和草甸生态系统碳库对比. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2293-2298.
- [2] 于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春, 刘颖慧. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础. 地理科学进展, 2011, 30(7): 771-787.
- [3] Zhang C, Lu D S, Chen X, Zhang Y M, Maisupova B, Tao Y. The spatiotemporal patterns of vegetation coverage and biomass of the temperate deserts in Central Asia and their relationships with climate controls. Remote Sensing of Environment, 2016, 175: 271-281.
- [4] Li C P, Xiao C W. Above- and belowground biomass of Artemisia ordosica communities in three contrasting habitats of the Mu Us desert, Northern China. Journal of Arid Environments, 2007, 70(2): 195-207.
- [5] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 10-21.
- [6] 刘顺, 罗达, 刘千里, 张利, 杨洪国, 史作民. 川西亚高山不同森林生态系统碳氮储量及其分配格局. 生态学报, 2017, 37(4): 1074-1083.
- [7] 李玉强,赵哈林,移小勇,左小安,陈银萍.沙漠化过程中科尔沁沙地植物-土壤系统碳氮储量动态.环境科学,2006,27(4):635-640.
- [8] 姚斌, 王锋, 冯益明. 中国土地荒漠化对土壤碳的影响研究综述. 西南林业大学学报, 2014, 34(3): 100-106.
- [9] Xu H, Li Y, Xu G Q, Zou T. Ecophysiological response and morphological adjustment of two central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation. Plant Cell & Environment, 2007, 30(4): 399-409.
- [10] Fan J W, Wang K, Harris W, Zhong H P, Hu Z M, Han B, Zhang W Y, Wang J B. Allocation of vegetation biomass across a climate-related gradient in the grasslands of Inner Mongolia. Journal of Arid Environments, 2009, 73(4/5): 521-528.
- [11] 苏永中,赵哈林,张铜会,李玉霖.科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性.植物生态学报,2004,28(1): 93-100.
- [12] 赵平. 退化生态系统植被恢复的生理生态学研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2031-2036.
- [13] 李向婷,白洁,李光录,罗格平,古丽・加帕尔,李均力.新疆荒漠稀疏植被覆盖度信息遥感提取方法比较.干旱区地理,2013,36(3): 502-511.
- [14] 钱洲, 俞元春, 俞小鹏, 高桿东, 吕荣, 张文英. 毛乌素沙地飞播造林植被恢复特征及土壤性质变化. 中南林业科技大学学报, 2014, 34 (4): 102-107.
- [15] 王继和,马全林,杨自辉,刘虎俊, 詹科杰.干旱区沙漠化土地逆转植被的时空格局及其机制研究.中国沙漠, 2004, 24(6): 729-733.
- [16] 郭帅,赵宏霞.恢复生态学领域的植被演替研究综述.聊城大学学报:自然科学版,2011,24(3):59-63.
- [17] 郝璐, 王静爱, 张化. 北方草地畜牧业生态系统健康综合评价与诊断. 生态学报, 2008, 28(4): 1456-1465.
- [18] Havstad K M, Huenneke L F, Schlesinger W H. Structure and Function of a Chihuahuan Desert Ecosystem: The Jornada Basin Long-Term Ecological Research Site. Oxford and New York: Oxford University Press, 2006: 1-24.
- [19] Búrquez A, Martínez-Yrízar A, Núñez S, Quintero T, Aparicio A. Aboveground biomass in three Sonoran Desert communities: variability within and among sites using replicated plot harvesting. Journal of Arid Environments, 2010, 74(10): 1240-1247.
- [20] Houghton R A, Hall F, Goetz S J. Importance of biomass in the global carbon cycle. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(G2): G00E03.
- [21] Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, Kapustin G. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia. Journal of Arid Environments, 2005, 62(2): 285-308.
- [22] 徐丽恒,王继和,李毅,马全林,张德魁,刘有军,陈芳.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征.中国沙漠,2008, 28(4):690-695.
- [23] 董志玲. 干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮储量分布规律及影响因子研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [24] 杨梅焕,朱志梅,曹明明,王春杰,谢艳.毛乌素沙地东南缘不同沙漠化阶段土壤-植被关系研究.西北农林科技大学学报:自然科学版, 2010,38(5):181-187,192-192.
- [25] 曹成有,朱丽辉,蒋德明,富徭,高菲菲.科尔沁沙地不同人工植物群落对土壤养分和生物活性的影响.水土保持学报,2007,21(1): 168-171.
- [26] Feng Q, Endo K N, Cheng G D. Soil carbon in desertified land in relation to site characteristics. Geoderma, 2002, 106(1/2): 21-43.
- [27] 蒋德明,曹成有,李雪华,周全来,李明.科尔沁沙地植被恢复及其对土壤的改良效应.生态环境,2008,17(3):1135-1139.

7 期

- [28] 齐雁冰,常庆瑞,刘梦云,刘京,陈涛.荒漠化土壤对人工植被恢复工程的响应.干旱地区农业研究,2011,29(3):180-185.
- [29] 李尝君,曾凡江,郭京衡,热甫开提,刘波. 植被恢复程度与沙地土壤性质——以塔克拉玛干沙漠南缘为例. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1061-1067.
- [30] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, Jiang Y, Liang W J, Cui Z B. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of *Caragana microphylla* Lam. plantations in the Horqin sandy land of northeast China. Applied Soil Ecology, 2008, 40(1): 78-85.
- [31] Veldkamp E. Soil Organic Carbon Dynamics in Pastures Established After Deforestation in the Humid Tropics of Costa Rica[D]. Wageningen: Agricultural University, 1993.
- [32] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423-436.
- [33] 左小安,赵学勇,赵哈林,云建英,王少昆,苏娜,冯静.沙地退化植被恢复过程中植被的空间异质性.生态环境学报,2010,19(7): 1513-1518.
- [34] 周欣, 左小安, 赵学勇, 王少昆, 罗永清, 岳祥飞, 张腊梅. 半干旱沙地生境变化对植物地上生物量及其碳、氮储量的影响. 草业学报, 2014, 23(6): 36-44.
- [35] 赵哈林,李玉强,周瑞莲.沙漠化对科尔沁沙质草地生态系统碳氮储量的影响.应用生态学报, 2007, 18(11): 2412-2417.
- [36] Jackson L L, Lopoukhine D, Hillyard D. Ecological restoration: a definition and comments. Restoration Ecology, 1985, 3(2): 71-75.
- [37] 赵哈林, 苏永中, 周瑞莲. 我国北方沙区退化植被的恢复机理. 中国沙漠, 2006, 26(3): 323-328.