

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第21期 Vol.32 No.21 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 21 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目次

白洋淀富营养化湖泊湿地厌氧氨氧化菌的分布及对氮循环的影响.....	王衫允,祝贵兵,曲冬梅,等 (6591)
造纸废水灌溉对滨海退化盐碱湿地土壤酶活性的响应.....	夏孟婧,苗颖,陆兆华,等 (6599)
图们江下游湿地生态系统健康评价.....	朱卫红,郭艳丽,孙鹏,等 (6609)
适应白洋淀湿地健康评价的 IBI 方法.....	陈展,林波,尚鹤,等 (6619)
基于 MODIS 的洞庭湖湿地面积对水文的响应.....	梁婕,蔡青,郭生练,等 (6628)
崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性.....	章振亚,丁陈利,肖明 (6636)
中国东部亚热带地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 方位变化的谐波分析.....	赵兴云,李宝惠,王建,等 (6647)
甘肃臭草型退化草地优势种群空间格局及其关联性.....	高福元,赵成章 (6661)
川西亚高山/高山森林土壤氧化还原酶活性及其对季节性冻融的响应...	谭波,吴福忠,杨万勤,等 (6670)
模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响.....	邓华卫,布仁仓,刘晓梅,等 (6679)
苹果三维树冠的净光合速率分布模拟.....	高照全,赵晨霞,张显川,等 (6688)
拟茎点霉 B3 与有机肥配施对连作草莓生长的影响.....	郝玉敏,戴传超,戴志东,等 (6695)
落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系.....	苏冬雪,王文杰,邱岭,等 (6705)
人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究.....	张永宽,陶冶,刘会良,等 (6715)
山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例.....	王强,袁兴中,刘红 (6726)
荣成俚岛人工鱼礁区游泳动物群落特征及其与主要环境因子的关系.....	吴忠鑫,张磊,张秀梅,等 (6737)
北黄海秋、冬季浮游动物多样性及年间变化.....	杨青,王真良,樊景凤,等 (6747)
鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建.....	蒙古军,朱利凯,杨倩,等 (6755)
村落文化林与非文化林多尺度物种多样性加性分配.....	高虹,陈圣宾,欧阳志云 (6767)
不同生计方式农户的环境感知——以甘南高原为例.....	赵雪雁 (6776)
两种预测模型在地下水动态中的比较与应用.....	张霞,李占斌,张振文,等 (6788)
四川黄龙沟少花鹤顶兰繁殖成功特征.....	黄宝强,寇勇,安德军 (6795)
硝化抑制剂对蔬菜土硝化和反硝化细菌的影响.....	杨扬,孟德龙,秦红灵,等 (6803)
新疆两典型微咸水湖水体免培养古菌多样性.....	邓丽娟,娄恺,曾军,等 (6811)
白洋淀异养鞭毛虫群落特征及其与环境因子的相关性.....	赵玉娟,李凤超,张强,等 (6819)
双酚 A 对萼花臂尾轮虫毒性及生活史的影响.....	陆正和,赵宝坤,杨家新 (6828)
孵化温度对双斑锦蛇初生幼体行为和呼吸代谢的影响.....	曹梦洁,祝思,蔡若茹,等 (6836)
黄玛草蛉捕食米蛾卵的功能反应与数值反应.....	李水泉,黄寿山,韩诗畴,等 (6842)
互惠-寄生耦合系统的稳定性.....	高磊,杨燕,贺军州,等 (6848)
超微七味白术散对肠道微生物及酶活性的影响.....	谭周进,吴海,刘富林,等 (6856)
专论与综述	
氮沉降对森林生态系统碳吸存的影响.....	陈浩,莫江明,张炜,等 (6864)
全球 CO_2 水平升高对浮游植物生理和生态影响的研究进展.....	赵旭辉,孔繁翔,谢薇薇,等 (6880)
跨界自然保护区——实现生物多样性保护的新手段.....	石龙宇,李杜,陈蕾,等 (6892)
研究简报	
会同和朱亭 11 年生杉木林能量积累与分配.....	康文星,熊振湘,何介南,等 (6901)
退化草地阿尔泰针茅生殖株丛与非生殖株丛的空间格局.....	任珩,赵成章,高福元,等 (6909)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 35 * 2012-11



封面图说: 白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊湿地。淀区内沟壕纵横交织错落,村庄、苇地、园田星罗棋布,在水文、水化学、生物地球化学循环以及生物多样性等方面,具有非常复杂的异质性。随着上游城镇污废水、农田径流进入水域,淀区富营养化日益加剧。复杂的水环境特点、高度的景观异质性和良好的生物多样性,使得该地区成为探索规模性厌氧氨氧化反应的良好研究地点(详见本期第 6591—6598 页)。

彩图提供:王为东博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail: wdwangh@yahoo.com

DOI: 10.5846/stxb201110051452

张永宽, 陶冶, 刘会良, 张道远, 吴小波. 人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征与空间格局对比研究. 生态学报, 2012, 32(21): 6715-6725.

Zhang Y K, Tao Y, Liu H L, Zhang D Y, Wu X B. Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of *Eremosparton songoricum* populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(21): 6715-6725.

人工固沙区与流沙区准噶尔无叶豆种群数量特征 与空间格局对比研究

张永宽^{1,2}, 陶 冶^{1,2}, 刘会良¹, 张道远^{1,*}, 吴小波¹

(1. 中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:准噶尔无叶豆(*Eremosparton songoricum*)是中亚荒漠特有小半灌木,稀有种,在我国仅片段化分布于新疆古尔班通古特沙漠;它是流动沙丘的先锋物种,也能成功定居于人工固沙区(草方格)。对比研究了人工固沙区及自然流沙区的准噶尔无叶豆群落物种组成、种群密度、高度、盖度、生物量等特征及种群空间分布格局。结果表明:人工固沙区内的准噶尔无叶豆群落物种的科、属、种数均明显多于流沙区,而且2种生境物种相似性指数仅为0.522,表明人工固沙生境显著改变了群落物种组成与结构。除植株密度外,人工固沙区种群的高度、盖度、地上、地下及总生物量密度,单株地上、地下及总生物量等数量特征均显著高于流沙区。2种生境中准噶尔无叶豆种群空间分布的关联维数均接近2.0,体现了较强的个体空间相关性和空间占据能力。2种尺度(1 m和2 m)下的聚集度分析表明,2种生境中种群基本为随机分布。因而,人工固沙生境并未明显改变种群空间分布格局,这可能是种群的固有特性。人工固沙区的土壤有机质、全氮和有效氮含量显著高于流沙区,且与种群数量特征(植株密度除外)呈显著正相关。总之,与流沙区相比,人工固沙使地表得到固定,提高了土壤有机质和氮素含量,明显改变了定居于其中的准噶尔无叶豆种群主要数量特征,增强了种群的生存和适应能力。该结论对荒漠濒危植物的保育具有重要指示意义。

关键词:植物保护;珍稀植物;准噶尔无叶豆;土壤养分;物种组成;生物量;空间格局

Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of *Eremosparton songoricum* populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China

ZHANG Yongkuan^{1,2}, TAO Ye^{1,2}, LIU Huiliang¹, ZHANG Daoyuan^{1,*}, WU Xiaobo¹

1 Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: *Eremosparton songoricum* is a rare desert perennial shrub found only in Central Asia. In China, its distribution is limited to the Gurbantunggut Desert. *Eremosparton songoricum* is a pioneer species that can become established on bare sand, where it acts as a sand stabilizer, and also occurs in artificial sand fixed areas, created using sand fences. In the sand fixed areas, the increased stability from the fences leads to the existence of biological soil crusts. This further stabilizes the surface physical structure and enhances the soil nutrient content, thus creating favorable plant growth conditions which,

基金项目:国家国际科技合作计划项目(2010DFA92720-06);国家自然科学基金资助项目(31070472,31100399)

收稿日期:2011-10-05; **修订日期:**2012-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangdy@ms.xjb.ac.cn

in turn, increase plant species diversity. In contrast, the natural bare sand is barren with high mobility due to high winds and thus no stability develops to create plant growth conditions. The spatial distribution patterns of *E. songoricum* were investigated in both bare sand areas and artificial sand fixed areas by plotting coordinates of every *E. songoricum* ramet in each sample plot. To assess the quantitative population characteristic differences of *E. songoricum* between artificial sand fixed areas and natural bare sand areas, species composition, abundance, height, coverage and biomass were assessed in both habitats. Results showed that the numbers of families, genera and species of *E. songoricum* communities in the artificial sand fixed habitat were significantly higher than those in the bare sand habitat. The similarity index value between communities in the two habitats was only 0.522, indicating that the artificial sand fixed habitat changed the species composition and structure of the *E. songoricum* community greatly. The quantitative characteristics of height, coverage, above ground, below ground and total biomass densities and above ground, below ground and total biomass per individual were also significantly higher ($P < 0.05$ or $P < 0.01$) in the artificial sand fixed habitat than those in the bare sand habitat. The correlation dimension values of the population spatial distribution in the two habitats were all close to 2.0, indicating strong spatial relevance and holding space ability for individuals. The aggregation analysis at two scales (1 m and 2 m) indicated that almost all of the populations were randomly distributed; thus the artificial sand fixed habitat had no effect on the degree of spatial aggregation. Random distribution pattern may therefore be part of the intrinsic properties of *E. songoricum* populations and it is possible that it forms the same way regardless of habitat. The organic matter, total nitrogen and available nitrogen contents in the artificial sand fixed habitat were significantly ($P < 0.01$) higher than those in the bare sand habitat, and were significantly ($P < 0.05$ or $P < 0.01$) positively correlated with the population quantitative characteristics except for abundance of *E. songoricum* individuals. In comparison with the bare sand habitat, the surface of the artificial sand fixed habitat was stable and the soil organic matter and nitrogen contents were higher. This meant that the coverage, height, biomass densities and biomass per individual of the *E. songoricum* population were markedly different and that the survival and adaptation ability of *E. songoricum* is stronger in these plots. This conclusion is important for the protection and conservation of this and other endangered desert species.

Key Words: plant protection; rare species; *Eremosparton songoricum*; soil nutrient content; species composition; biomass; spatial pattern

生物多样性的丧失不仅大大加速了物种的绝灭,同时还造成种群、群落、生态系统、景观和全球水平基因和功能多样性的消失^[1]。生物多样性急需保护逐渐成为世界各国的共识^[2],而稀有种的保护现状已成为评价生物多样性保护热点地区的重要指标^[3]。荒漠是世界陆地生态系统的重要组成部分,约占陆地总面积的18.5%^[4]。荒漠生态系统生物多样性和生态系统稳定性较低,因而其极易受到人类活动和全球变化的影响,而荒漠地区的珍稀和濒危植物可能首当其冲。因此,如何便捷有效地实现该类植物的保护和扩繁是目前众多专家学者重要的研究目标和亟待解决的问题^[5]。

近几十年来,人类活动(尤其是工程开发)对荒漠地区的破坏日益加重,但与此同时,一些保护性措施也在实施^[6]。以新疆古尔班通古特沙漠为例,工程扰动沙面后,人工固沙措施广泛应用,而且收到了良好的效果。目前应用于该荒漠的人工固沙措施主要是物理(草方格)、生物(如栽植梭梭)及二者相结合的方法,其中物理固沙区的基本单位为1 m × 1 m的草方格,固沙年限最长达10a,地表均已覆盖不同厚度的生物结皮(以藻结皮为主),因而形成了人工固沙结皮区和自然流沙区2种不同的生境类型。人工固沙结皮区由于草方格和生物结皮的存在,其地表稳定性得到加强,伴随着生物结皮的发育及草方格捕获的大气粉尘的不断积累,人工固沙区土壤粘粒含量、养分含量也得到提高,土壤条件得到很大改善,如此在人工固沙区定居的新物种逐渐增多,植物种多样性增加^[7-8]。自然流沙区因为土壤贫瘠、流动性大而呈现出与人工固沙区不同的特点。因此,对比研究人工固沙结皮区和自然流沙区植物种群的数量特征及其分布格局对于揭示荒漠植物的生存机

制、进行合理的防风固沙具有重要意义。关于人工固沙的技术方法、人工固沙区的土壤养分变化、土壤生物群落演替、植被盖度等方面有不少相关研究^[9-11],但对自然定居于人工固沙区的植物与原始生境的对比研究鲜见报道。

准噶尔无叶豆(*Eremosparton songoricum*)是中亚荒漠特有小半灌木,稀有种,主要分布在中亚的巴尔喀什湖附近,在我国仅片段化分布于古尔班通古特沙漠中部腹地和东部地区,而西部地段未见有分布^[12]。因此,该种分布区狭窄,是依赖风蚀流沙地存在的窄域种^[13-15]。准噶尔无叶豆自然生境以流沙区为主,是流沙区先锋物种之一,极少出现于固定沙地。该种存在有性繁殖障碍,加上人类因素,使其种群受胁程度逐渐严重,自然分布区逐渐缩小^[16]。但近年调查发现,该种群能成功自然定居于人工固沙区(草方格),而且表现出较好的生长态势。关于准噶尔无叶豆的研究最早见于蒋进对其水分生理生态学特征的报道^[17],近年来,关于准噶尔无叶豆的濒危机制、遗传基因、种群生态、地理分布、传粉生态学及种子库等方面也得到了大量的研究^[12-16, 18-22]。在该种的保护与扩繁方面,民勤沙生植物园和吐鲁番沙漠植物园均成功将其引种繁殖^[23-24]。尽管如此,对该种的就地保护方面的研究仍不够深入。

为此,本文利用人工固沙创造的新生境与流沙区原生境的对比,探讨了准噶尔无叶豆种群主要数量特征及空间分布格局的变化,试图通过2种生境中一些种群特征的差异,比较生境的优劣,为荒漠濒危物种的保护提供新的思路和可行的途径。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠(44°11'N—46°20' N, 84°31' E—90°00' E)面积约 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国第二大沙漠,也是我国最大的固定和半固定沙漠。年均蒸发量2 000—2800 mm,而年均降水量仅70—150 mm,且主要集中于冬季(降雪)和春季(降雨);年均温5—8℃,极端高温为40℃以上,极端气温为-40℃以下, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温可达3 000—3 500℃,空气相对湿度平均50%—60%,5—8月通常<45%;该沙漠沙丘主要为南北方向延伸,高度10—50 m;风系主要为NW和NE风系,起沙风($\geq 6 \text{ m/s}$)集中于4—9月,其中以4—6月最为强盛^[25]。人工固沙区是指在古尔班通古特沙漠输水明渠和沿渠公路两侧为了保证水渠正常运营而人工采取防沙固沙措施的地带,主要运用1 m×1 m的草方格固沙。采取草方格固沙的区域,沙丘流动性大大减弱,有利于植物定居,并随着土壤生物结皮的出现,沙土基质逐渐得到改良。

该沙漠共计208种植物,有18种植物群落类型和11种植物生活型,其中沙漠腹地主要由白梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)群落、白茎绢蒿(*Seriphidium terraealbae*)群落和准噶尔沙蒿(*Artemisia songarica*)群落组成^[26],准噶尔无叶豆(*E. songoricum*)群落仅片段化分布于沙漠中部和东部^[16]。短命和类短命植物广泛分布,成为早春荒漠生态系统的重要组成部分。此外,沙漠地表发育有良好的生物土壤结皮(包括藻结皮、地衣结皮、苔藓结皮等),成为维持地表稳定的重要生物因子^[27]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与数据采集

2010年5月底—6月初,在古尔班通古特沙漠东部设置21个准噶尔无叶豆群落样地,其中流沙区(BS)11个(以BS1-BS11顺序编号),人工固沙区(AS)10个(以AS1-AS10顺序编号)。考虑其种群面积大小,确定样地大小为10 m×10 m,划分为16个2.5 m×2.5 m小样方,详细记录样物种数、植株数,测定样地内全部准噶尔无叶豆的高度、冠幅,并用GPS测定记录各样地经纬度和海拔。物种鉴定参照《中国沙漠植物志》和《新疆植物志》进行。

在每个样地内随机采集5个点的0—10 cm层土样,然后混合为一份,装入封口袋带回实验室自然风干、过筛。测定的土壤因子包括有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、pH值和电导率(EC),具体方法参见文献^[28]。

1.2.2 种群特征的选择与计算

选择有代表性的种群特征比较人工固沙区与自然流沙区准噶尔无叶豆种群间的差异:植株密度、盖度、高

度、生物量密度(地上、地下和总体)、单株生物量(地上、地下和总体)等。准噶尔无叶豆为典型克隆植物,单株(克隆片段)没有独立的根系,本文仅以样地内准噶尔无叶豆全部地下生物量和植株数的比值作为单株地下生物量。人工固沙区 10 个重复,流沙区 11 个重复,均以平均值 $\pm$ SE 表示。

准噶尔无叶豆地上生物量采用模型法($M_A = 4.27 \times 10^{-2} \times CV^{2.130}$, $n=20$, $R^2=0.940$, 其中 CV =盖度 $\times$ 高)估算,地下生物量采用根冠比($n=5$)计算。由于准噶尔无叶豆是典型克隆植物,植株无独立的根系,因而以 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 小样方为基本单位,采用挖掘法获取根冠比。挖掘深度 1.5—2.0 m,用筛子筛取根系,用自来水冲洗后装袋标记,与地上部分一同置于 70 °C 烘箱内烘 72 h,用精度 0.01 g 天平称重。

1.2.3 空间格局计算方法

在人工固沙区和流沙区各选择 5 个样地($10\text{ m} \times 10\text{ m}$),人工固沙区分别是 AS4、AS5、AS8、AS9、AS10,流沙区分别是 BS5、BS6、BS8、BS10、BS11,用卷尺详细测量并记录每株点坐标。以关联维数和 3 种聚集度指标表征种群空间格局特征。

(1) 关联维数

关联维数大小反映种群个体的空间相关程度和种群整体对空间的占据程度的高低,其值介于 1 和 2 之间,越大表明种群占据空间能力越强。关联维数值大于 2 和小于 1 均没有意义。

其计算公式如下^[29]:

$$Dc = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log_{10}(C(\varepsilon))}{\log_{10}(\varepsilon + 1)}$$

首先利用 ENVI 4.6.1 软件将样地内所有植株间的欧氏距离计算出来,然后给定一个距离值(ε),查找小于该距离的欧氏距离个数(N_i);变换距离值,可以得到一系列 N_i ;通过每一距离个数与距离总个数(N)的比值得到 $C(\varepsilon)$ 。将 $C(\varepsilon)$ 与 $(\varepsilon+1)$ 在双对数坐标下进行直线拟合,其斜率即为关联维数。根据本研究实际样方大小($10\text{ m} \times 10\text{ m}$),确定最大距离为 10 m,变换步长为 0.5 m。

(2) 聚集度指标

植物种群的空间分布主要有 3 种类型:即随机分布、均匀分布和集群分布。应用方差均值比、Morisita 指数和聚块性指数来综合判断和比较种群空间格局在 1 m 和 2 m 尺度上的聚集类型和强度。

各指数计算方法如下^[30]:

1) 方差均值比 $C = S^2 / m$, 是检验种群扩散是否属于随机性的一个系数,其统计学基础是 Poisson 分布。当 $C=1$ 时为随机分布, <1 为均匀分布, >1 为集群分布。该值的显著性可用 t -检验($t = (S^2 / m - 1) / \text{SQRT}(2 / (n-1))$)测定,当 $t > t_{0.05}(n-1)$ 时集群分布显著, $t > t_{0.01}(n-1)$ 时集群分布极显著。

2) Morisita 指数 $I_\delta = n (\sum x_i^2 - \sum x_i) / (\sum x_i (\sum x_i - 1))$ 。 $I_\delta = 1$ 为随机分布; <1 趋于均匀分布; >1 则为集群分布。可用 F 检验, $F = (I_\delta (\sum x_i - 1) + n - \sum x_i) / (n-1)$, $v_1 = n$, $v_2 = \infty$ 。

3) 聚块性指数 m^* / m 定义为平均拥挤度(m^*)与平均密度(m)的比率, $m^* = \sum x_i^2 / \sum x_i - 1$,当 $m^* / m = 1$ 时为随机分布, >1 时为集群分布, <1 时为均匀分布。

上述各公式中, n 为每个样地的样方数(分别为 100 和 25), x_i 为每个样方中的植株个数的观测值, m 为每个样地各样方中观测值的平均值, S^2 为样本方差。

1.2.4 统计分析

对 2 种生境中准噶尔无叶豆种群的主要数量特征进行独立样本 t -test,对土壤养分与上述种群特征进行 Pearson 相关分析,二者均在 SPSS 13.0 中实现。常规数据分析在 EXCEL 2003 中完成,作图在 ORIGIN 7.5 中完成。

2 结果与分析

2.1 2 种生境中准噶尔无叶豆群落物种组成特征

2 类生境 21 个样地共出现 16 科 32 属 34 种植物(表 1),物种数最多的科是菊科和藜科,各有 7 个物种。

仅含 1 个物种的科有 10 个,其物种数占总物种数的 26.5%;非单种科 6 个,物种数占 73.5%。由物种生活型划分可知,34 个物种内,灌木有 5 种,多年生长营养期植物 3 种、多年生短营养期植物 7 种、1 年生长营养期植物 4 种、1 年生短营养期植物 15 种。

人工固沙区内有 13 科 28 属 29 种,仅粗柄独尾草、东方虫实、蛇麻黄、淡枝沙拐枣、卷果涩芥未见分布。5 种生活型(顺序同上)植物物种数分别为 3、3、6、4 和 12 种。流沙区内仅有 9 科 17 属 18 种植物,5 种生活型植物物种数分别为 5、2、1、3 和 7 种。人工固沙区内准噶尔无叶豆群落平均物种数(11.2 ± 1.15)显著($P < 0.01$)高于流沙区(6.45 ± 0.49),二者物种相似性指数仅为 0.522。2 种生境均具有一些指示(特有)物种,如尖喙牻牛儿苗、琉苞菊、角果藜、齿稈草等仅分布于人工固沙区,而准噶尔沙蒿、羽毛针禾等固沙先锋植物基本分布于流沙区,沙蓬和对节刺则在 2 类生境中广泛分布。

可见,人工固沙生境明显提高了准噶尔无叶豆群落的物种丰富度,并改变了群落物种组成与结构。

表 1 2 种生境中准噶尔无叶豆群落物种分布及其生活型

Table 1 Species and their life-forms in *E. songoricum* communities in two habitats

科名 Family	种名 Species	生活型 Life-form	人工固沙区 Artificial sand-fixation area	流沙区 Bare sand area
菊科 Compositae	琉苞菊 <i>Hyalea pulchella</i>	ASVP	+	
	沙生千里光 <i>Senecio subdebtatus</i>	ASVP	+	+
	准噶尔沙蒿 <i>Artemisia songarica</i>	Shrub	+	+
	白茎绢蒿 <i>Seriphidium terraealbae</i>	Shrub	+	+
	刺头菊 <i>Cousinia affinia</i>	PLVP	+	
	砂蓝刺头 <i>Echinops gmelinii</i>	ASVP	+	+
	沙地粉苞苣 <i>Chondrilla ambigua</i>	PLVP	+	+
藜科 Chenopodiaceae	倒披针叶虫实 <i>Corispermum lehmannianum</i>	ASVP	+	+
	东方虫实 <i>C. orientale</i>	ASVP		+
	沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	ALVP	+	+
	刺沙蓬 <i>Salsola ruthenica</i>	ALVP	+	+
	对节刺 <i>Horaninowia ulicina</i>	ALVP	+	+
	角果藜 <i>Ceratocarpus arenarius</i>	ALVP	+	
	尖翅地肤 <i>Kochia odontoptera</i>	ASVP	+	
豆科 Fabaceae	准噶尔无叶豆 <i>Eremosparton songoricum</i>	Shrub	+	+
	弯花黄芪 <i>Astragalus flexus</i>	PSVP	+	
	速生黄芪 <i>A. arpilobus</i>	ASVP	+	+
禾本科 Poaceae	羽毛针禾 <i>Stipagrostis pennata</i>	PLVP	+	+
	齿稈草 <i>Schismus arabicus</i>	ASVP	+	
	东方旱麦草 <i>Eremopyrum orientale</i>	ASVP	+	
百合科 Liliaceae	粗柄独尾草 <i>Eremurus andersonii</i>	PSVP		+
	小山蒜 <i>Allium pallasii</i>	PSVP	+	
紫草科 Boraginaceae	狭果鹤虱 <i>Lappula semiglabra</i>	ASVP	+	
	小花天芥菜 <i>Heliotropium micranthum</i>	ASVP	+	+
牻牛儿苗科 Geraniaceae	尖喙牻牛儿苗 <i>Erodium oxyrrhynchum</i>	ASVP	+	
十字花科 Cruciferae	卷果涩芥 <i>Malcolmia scorpioides</i>	ASVP		+
大戟科 Euphorbiaceae	土大戟 <i>Euphorbia turczaninowii</i>	ASVP	+	
石竹科 Caryophyllaceae	沙生蝇子草 <i>Silene olgiana</i>	PSVP	+	
鸢尾科 Iridaceae	细叶鸢尾 <i>Iris tenuifolia</i>	PSVP	+	
车前科 Plantaginaceae	小车前 <i>Plantago minuta</i>	ASVP	+	
莎草科 Cyperaceae	囊果苔草 <i>Carex physodes</i>	PSVP	+	
蓼科 Polygonaceae	淡枝沙拐枣 <i>Calligonum leucocladum</i>	Shrub		+
麻黄科 Ephedraceae	蛇麻黄 <i>Ephedra distachya</i>	Shrub		+
伞形科 Umbelliferae	簇花芹 <i>Soranthus Ledeb</i>	PSVP	+	
总物种数 Total number of species (34)			29	18

Shrub:灌木; PLVP:多年生长营养期植物 Perennials with long vegetative period; PSVP:多年生短营养期植物 Perennials with short vegetative period; ALVP:1 年生生长营养期植物 Annuals with long vegetative period; ASVP:1 年生短营养期植物 annuals with short vegetative period

2.2 2 种生境中噶尔无叶豆种群主要数量特征

人工固沙区准噶尔无叶豆种群植株密度 (2.69 ± 0.24) 稍小于流沙区 (3.01 ± 0.20), 但二者差异不显著 (表 2); 前者种群盖度和高度分别为 25.3% 和 51.63 cm, 明显大于后者 (分别为 14.4% 和 44.12 cm) (表 2)。人工固沙区准噶尔无叶豆的根冠比 (1.22 ± 0.29) 也明显高于流沙区 (0.83 ± 0.17) ($F=6.83$, $P=0.031$), 而且前者地上生物量密度 (51.40 g/m^2)、地下生物量密度 (62.55 g/m^2)、总生物量密度及单株地上生物量 (20.11 g)、单株地下生物量 (24.47 g) 和单株总生物量均显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 高于流沙区 (分别为 39.25 g/m^2 , 32.41 g/m^2 , 14.04 g 和 11.60 g) (图 1), 表明人工固沙不仅提高了准噶尔无叶豆地下生物量比例, 也增大了个体生物量。

表 2 2 种生境中准噶尔无叶豆种群植株密度、盖度及高度

Table 2 Density, coverage and height of <i>E. songoricum</i> in two habitats			
生境 Habitat	密度 Density / (个/m ²)	盖度 Coverage/%	高度 Height/cm
人工固沙区 Artificial sand-fixation area	2.69±0.24 a	25.30±2.16 A	51.63±0.81 A
流沙区 Bare sand area	3.01±0.20 a	14.40±1.65 B	44.12±1.68 B

不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)

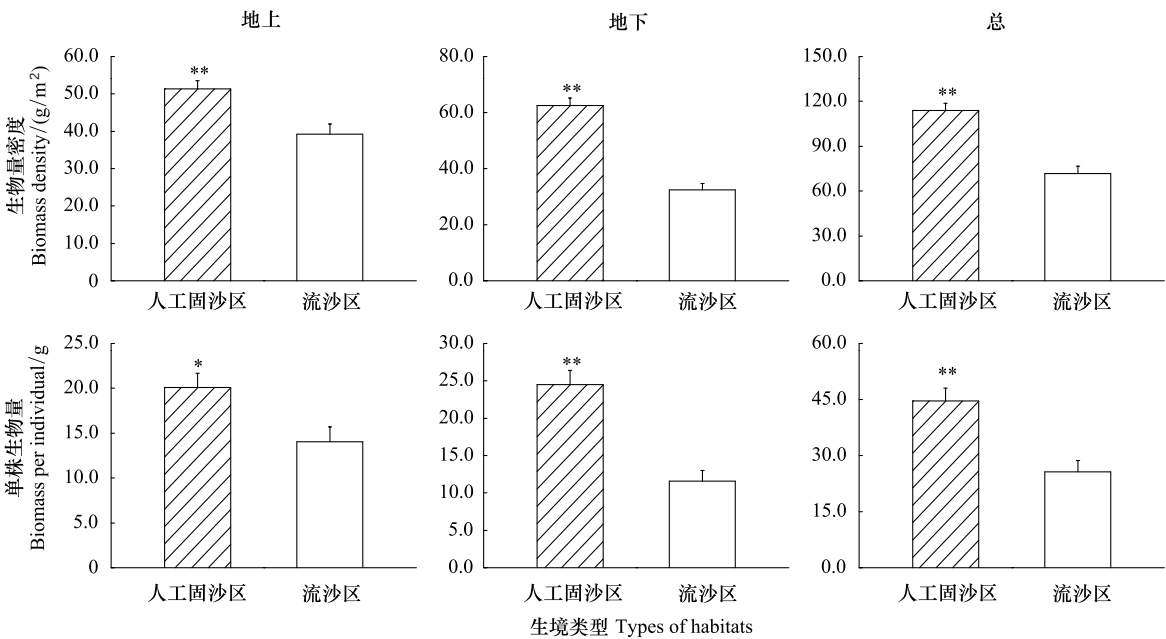


图 1 2 种生境中准噶尔无叶豆种群生物量密度及单株生物量对比

Fig. 1 Biomass density and biomass per individual of *E. songoricum* in two habitats

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

2.3 2 种生境中准噶尔无叶豆种群空间格局特征

2.3.1 关联维数

人工固沙区准噶尔无叶豆种群空间分布的关联维数均大于 1.93, 平均值为 1.96 ± 0.008 , 最大值出现在 AS8 号样地 (1.9873); 流沙区种群关联维数以 BS5 号样地 (1.755) 最小, 其余均大于 1.93, 平均值为 1.90 ± 0.036 (图 2)。T-test 表明, 2 种生境中种群关联维数值差异不显著 ($F=2.367$, $P=0.162$)。由于所有种群关联维数值均接近于 2, 但未大于 2, 因此 2 种生境中准噶尔无叶豆种群均具有较强的个体空间相关程度和空间占据程度。

2.3.2 聚集度指标

2 种尺度 (1 m 和 2 m) 下, 3 种聚集度指标对准噶尔无叶豆种群空间分布格局的判断结果基本一致 (表

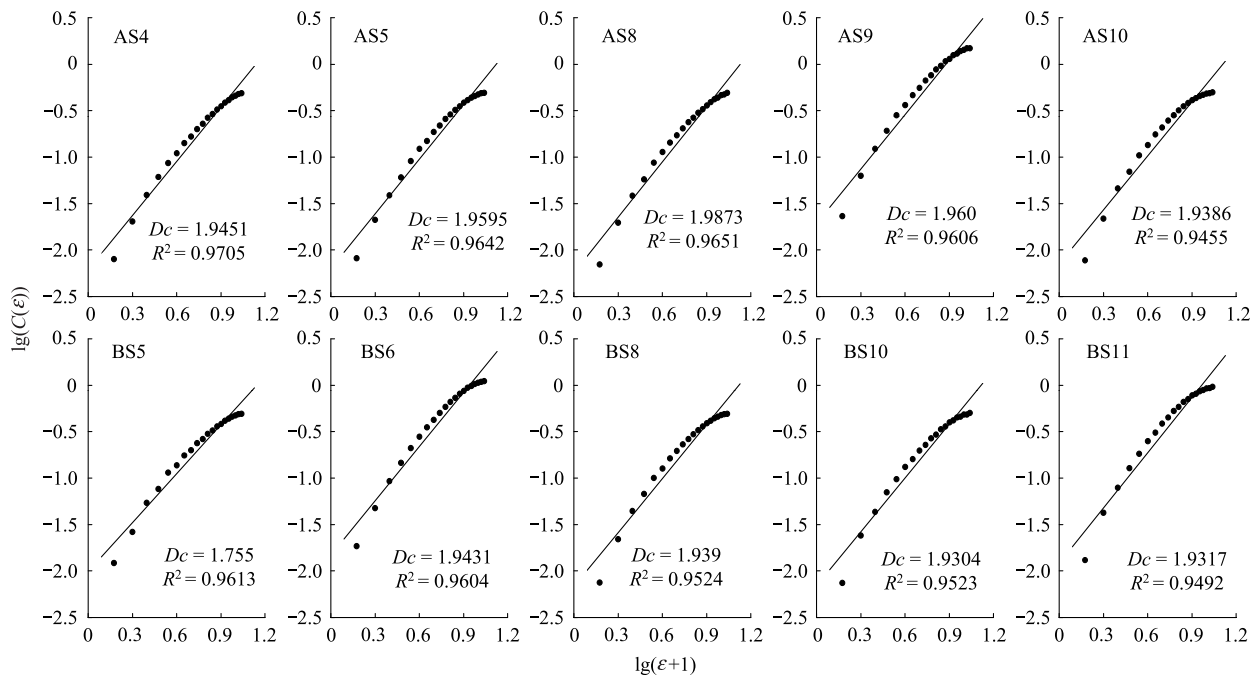


图 2 2 种生境中准噶尔无叶豆种群空间分布的关联维数
Fig. 2 Correlation dimensions of spatial distribution pattern of *E. songoricum* populations in two habitats
AS:人工固沙区样地编号; BS:流沙区样地编号

3)。除流沙区 BS5 号样地方差均值比 *t*-test 达到显著水平的集群分布外,其余样地的 3 种指数值均接近于 1.0,表现出典型的随机分布特征。因而,人工固沙生境并未明显改变种群的空间分布格局。

表 3 2 种生境中准噶尔无叶豆种群 3 种聚集度指数及格局类型

Table 3 Three aggregation indices (Means ± SE) and distribution patterns of <i>E. songoricum</i> populations in two habitats											
尺度/m	聚集度指数	人工固沙区 Artificial sand-fixation area					流沙区 Bare sand area				
Scale	Aggregation indices	AS4	AS5	AS8	AS9	AS10	BS5	BS6	BS8	BS10	BS11
1	方差均值比 S^2/m	1.100	1.143	0.960	1.218	1.007	2.478**	1.277	0.975	1.046	1.072
	Morisita 指数 I_δ	1.033	1.056	0.976	1.044	0.999	1.470	1.066	0.988	1.015	1.016
	聚块性指数 m^*/m	1.037	1.060	0.980	1.046	1.003	1.475	1.069	0.991	1.019	1.019
	格局类型 Pattern	R	R	R	R	R	C	R	R	R	R
2	方差均值比 S^2/m	1.551	0.813	1.038	1.405	1.566	4.489*	1.104	1.540	1.335	0.892
	Morisita 指数 I_δ	1.046	0.977	1.000	1.019	1.047	1.268	1.004	1.041	1.029	0.990
	聚块性指数 m^*/m	1.050	0.981	1.005	1.021	1.051	1.272	1.006	1.044	1.033	0.993
	格局类型 Pattern	R	R	R	R	R	C	R	R	R	R

C 聚集分布; R 随机分布; * 和 ** 表示经 *t*-test 达到显著和极显著水平的集群分布

2.4 准噶尔无叶豆种群特征与土壤养分的关系

人工固沙区土壤有机质、全氮及有效氮含量均极显著高于流沙区,而全磷、全钾、pH 值和电导率间无显著差异(表 4)。Pearson 相关分析表明(表 5),除植株密度外,有机质和氮素与准噶尔无叶豆种群特征均呈显著或极显著正相关。

3 讨论

3.1 准噶尔无叶豆分株种群特征

干扰创造生境异质性,并导致群落的生物多样性发生变化^[31]。本研究区的人工固沙措施已实施 8—10a,草方格固沙区地表已形成藻结皮和部分早期地衣结皮,这使固沙区土壤特性发生了重大改变。结皮的存在增加了其下层土壤的容重,提高了土壤细颗粒含量,并提高了结皮层以下土壤的有机质、全 N、全 P、速效 N、速

效 P 等养分含量^[6]。高度约 10 cm 的人工固沙草方格还能有效截获枯枝落叶,扩展有机养分来源。人工固沙区生物结皮形成后,土壤有机质和氮素含量得到显著提高,更有利于一些 1 年生或多年生植物定居和繁殖。本文研究结果表明,人工固沙区总物种数和平均物种数均显著高于流沙区。这与人工固沙措施提高了地表稳定性和土壤养分条件有关,与李新荣等^[32]的研究结果一致。

表 4 2 种生境中准噶尔无叶豆群落土壤养分特征

Table 4 Soil nutrients (Means $\pm$ SE) of *E. songoricum* communities in two habitats

生境 Habitat	有机质 SOM/(g/kg)	全氮 TN/(g/kg)	全磷 TP/(g/kg)	全钾 TK/(g/kg)	有效氮 AN/(μ g/kg)	pH	电导率 EC/(μ s/cm)
人工固沙区 Artificial sand-fixation area	2.01 $\pm$ 0.07 A	0.105 $\pm$ 0.003 A	0.247 $\pm$ 0.004 a	29.48 $\pm$ 2.25 a	16.14 $\pm$ 0.55 A	8.33 $\pm$ 0.03 a	38.84 $\pm$ 1.70 a
流沙区 Bare sand area	0.47 $\pm$ 0.05 B	0.028 $\pm$ 0.002 B	0.243 $\pm$ 0.006 a	26.45 $\pm$ 1.34 a	5.48 $\pm$ 0.72 B	8.30 $\pm$ 0.03 a	41.93 $\pm$ 1.91 a

不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$); 不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)

表 5 准噶尔无叶豆主要种群特征与土壤养分间的相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients between soil nutrients and main population characteristics of *E. songoricum*

土壤养分 Soil nutrient	密度 Density	高度 Height	盖度 Coverage	ABD	BBD	TBD	ABI	BBI	TBI
有机质/(g/kg)	-0.324	0.648 **	0.616 **	0.645 **	0.898 **	0.825 **	0.593 **	0.840 **	0.751 **
全氮/(g/kg)	-0.298	0.681 **	0.646 **	0.601 **	0.873 **	0.792 **	0.553 **	0.809 **	0.715 **
全磷/(g/kg)	-0.094	-0.018	-0.106	0.043	0.125	0.097	0.152	0.156	0.157
全钾/(g/kg)	-0.226	0.171	0.125	0.259	0.295	0.288	0.290	0.324	0.316
速氮/(μ g/kg)	-0.174	0.549 *	0.642 **	0.651 **	0.888 **	0.821 **	0.514 *	0.758 **	0.668 **
pH	0.047	0.065	0.129	0.041	0.132	0.101	-0.023	0.072	0.033
EC/(μ s/cm)	0.071	-0.362	-0.262	-0.093	-0.175	-0.149	-0.006	-0.100	-0.062

ABD 地上生物量密度 Aboveground biomass density; BBD 地下生物量密度 Belowground biomass density; TBD 总生物量密度 Total biomass density; ABI 单株地上生物量 Aboveground biomass per individual; BBI 单株地下生物量 Belowground biomass per individual; TBI 单株总生物量 Total biomass per individual; * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

植物投影盖度和高度能直接或间接反映植物体的生长状况和获取阳光、土壤水分和养分等生活资源的相对空间范围,指示植物体的竞争和适应能力。生物量大小直接表明它对群落有机物质的占有程度,最能反映一个种在群落中的功能和作用大小^[33]。人工固沙区准噶尔无叶豆分株种群盖度、高度、地上生物量密度、地下生物量密度、总生物量密度、单株地上生物量、单株地下生物量和单株总生物量均明显大于流沙区,说明在人工固沙区准噶尔无叶豆种群生长较有优势。

王建成等^[14-15]对河边沙丘、沙漠腹地沙丘两种不同水分条件下准噶尔无叶豆分株种群的研究表明,沙漠种群的分株密度显著大于河边种群,且在两个种群内部,从沙丘底部到沙丘顶部,随着土壤含水量的逐渐减少,分株种群密度都逐渐升高。本研究中人工固沙区准噶尔无叶豆分株种群的密度小于流沙区分株种群的密度,这与王建成等人的研究结果相吻合,即对于准噶尔无叶豆这一沙丘克隆植物而言,较好的资源(水分或养分)条件下,准噶尔无叶豆分株种群的密度越小。究其原因,可能是在较好的生境条件下,生长的植物种类较多,其他植物种与准噶尔无叶豆之间产生竞争关系,准噶尔无叶豆采取减少分株数量,增加分株个体高度和生物量的策略来增强其竞争力。而在生境条件较差的流沙区,准噶尔无叶豆作为先锋植物,是通过快速克隆繁殖,产生大量分株,达到迅速占据生存空间的目的。此外,人工固沙区准噶尔无叶豆的根冠比显著高于流沙区,可能是人工固沙区准噶尔无叶豆将更多的资源投入到垂直根上,以增强其吸收地下营养的能力;而流沙区植株可能将更多的资源投入到水平根茎上,以增加克隆分株间生理整合作用,在恶劣生境下的共同度过难关。只是垂直根的重量要大于水平根茎的重量,使得总体上人工固沙区准噶尔无叶豆的根冠比显著高于流沙区。这一结果与王建成等^[15]在不同水分梯度下准噶尔无叶豆地下根和水平根茎分布的结论相一致。

综上所述,人工固沙区准噶尔无叶豆种群高度、盖度、生物量密度和单株生物量等均得到显著增大,种群

生长较有优势;而流沙区准噶尔无叶豆分株密度大,分株间生理整合和资源共享功能加强,使得种群占据新生境的能力增强。可见,不同的生境条件下,准噶尔无叶豆分株种群特征表现出分异,是一种积极的生态适应策略。

3.2 准噶尔无叶豆分株种群空间格局

种群分布格局的成因可分为两类:一是植物本身的生物学特性;二是植物所处的环境因子^[34]。克隆植物分株种群的空间分布格局是植物自身生物学特性与环境因素共同作用的结果^[35]。准噶尔无叶豆无论在人工固沙区还是流沙区,其种群关联维数值均接近于 2,说明 2 种生境中准噶尔无叶豆种群均具有较强的个体空间相关程度和空间占据程度。准噶尔无叶豆是典型的根茎型克隆繁殖植物,自然种群由于种子的萌发率极低($<3\%$),由种子萌发形成的幼苗极少($<0.1\%$)^[19, 36],种群以克隆繁殖更新为主,使得种群具有较强的个体空间相关程度,这与 Liu Y 等^[37]基于分子标记开展的空间自相关研究结果相一致。可见,对于准噶尔无叶豆而言,克隆繁殖这一固有的生物学特性塑造了种群的分布格局。

人工固沙区和自然生境下的流沙区,在 1 m 和 2 m 两种尺度下,9 个样地准噶尔无叶豆分株种群的分布格局是随机分布,只有流沙区 BS5 一个样地是集群分布。经分析准噶尔无叶豆分株种群呈现如此分布格局的原因如下:第一,克隆生长的准噶尔无叶豆多分布在流动或半固定沙丘的迎风坡中下部和风蚀谷地的侧坡地段,其所在的生境,水分短缺、有机质、养分条件贫瘠^[12]。该种在自然环境压力和人类干扰情况下,由种子萌发形成的幼苗极少,植株个体绝大多数都是由克隆繁殖而产生的分株^[19]。种子繁殖产生的幼苗极少,有性繁殖对准噶尔无叶豆分株种群空间格局的形成所起的作用就比较微小。第二,陈劲松^[38]等对匍匐茎草本野草莓的研究发现,克隆生长是影响其分株种群空间分布格局的重要因素之一。准噶尔无叶豆作为所在生境的优势种群,又是游击型克隆植物,对水分和矿质营养等资源的竞争主要来自于克隆种群内分株间,同时由于克隆整合作用使得分株之间存在水分、碳水化合物以及矿质营养的共享。为了更好地寻找和利用土壤资源,实现分株间的资源共享,准噶尔无叶豆分株种群因土壤资源斑块的空间变异而呈现随机分布格局。如果各分株过度集中就使各分株间根系对土壤水分及养分的竞争加剧,使本来就贫瘠的土地更难满足植物的生长需要。第三,流沙区 BS5 样地位于坡底,土壤有机质、有效氮含量是流沙区最高,其他样地均位于半坡或坡顶。BS5 样地准噶尔无叶豆种群与准噶尔沙蒿混生,准噶尔沙蒿多为成年株,且盖度较大,流沙区其它样地内混生沙蒿较少或者幼苗较多。因此推断准噶尔沙蒿对土壤养分和空间资源的竞争是造成 BS5 样地准噶尔无叶豆种群聚集的主要原因。准噶尔无叶豆分株种群呈现随机分布或者聚集分布格局都是对养分贫瘠的沙漠环境的一种适应。

3.3 人工固沙对荒漠濒危植物保育的意义

准噶尔无叶豆之所以濒危,主要是因为其生境环境恶劣、种子自然萌发率低($<3\%$)、成苗率低($<0.1\%$)及人为干扰加剧^[16, 19]。准噶尔无叶豆自然生境为流沙区,该区域风蚀严重,其水平根常常裸露于地表;但是人工固沙区地表相对稳定,植株较为高大,其水平根常分布在地表 0—30 cm 间,表现出良好的生长状态。而且人工固沙区种群空间分布格局并未改变,因而一些种群固有特征得到了保持。虽然目前尚不知人工固沙区与流沙区内准噶尔无叶豆种子萌发、种子库等方面有无差异,但其在 2 种生境中表现出的一系列特征差异均表明,人工固沙区确实比流沙区更适宜准噶尔无叶豆生存。那么,是否可以尝试在人工固沙区以人工播种的方式扩大其种群个数?或者在流沙生境中安置固沙草方格,直接改变其生境?这也不失为一种可尝试的途径。因此,该结论对防风固沙和荒漠濒危植物的保育与种群扩繁均具有重要指示意义。

致谢:中国科学院新疆生态与地理研究所周晓兵、吴林及新疆农业大学邱东、生赵伟、丁阳、刘星等同学在野外数据采集及数据分析上提供帮助,新疆额河建管局沙漠一站给予支持,特此致谢。

References:

- [1] Wilson E O. Threats to biodiversity. *Scientific American*, 1989, 261(3):108-116.
- [2] Thompson R, Starzomski B M. What does biodiversity actually do? A review for managers and policy makers. *Biodiversity and Conservation*, 2007,

- 16(5):1359-1378.
- [3] Li Z Q, Ou Yang Z Y, Zeng H Q. Assessment methods for territorial biodiversity hotspot based on species richness at broad scale. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(6):1586-1593.
- [4] Houghton R A, Hall F, Goetz S J. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114:G00E03, doi: 10.1029/2009JG000935.
- [5] Reed B M, Sarasan V, Kane M, Bunn E, Pence V C. Biodiversity conservation and conservation biotechnology tools. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 2011, 47(1):1-4.
- [6] Yang L W, Zhou H Y, Fan H W, Jia X H, Liu L C, Li A X. Advances of soil restoration research on artificial sand-binding vegetation ecosystem in Shapotou Desert region. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(6):1116-1123.
- [7] Jia X H, Li X R, Wang X P, Fan H W, Zhao J L. Primary study of spatial heterogeneity of soil property in processes of shifting sand fixation in southeaster Tengger Desert. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4):46-50.
- [8] Li X R, Xiao H L, Liu L C, Zhang J G, Wang X P. Long-term effects of sand-binding vegetation on the restoration of biodiversity in shapotou region of Tengger Desert, Northern China. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(2):173-181.
- [9] Fullen M A, Mitchell D J. Desertification and reclamation in North Central China. *Ambio*, 1994, 23(2):131-135.
- [10] Zhi D J, Nan W B, Ding X X, Xie Q J, Li H Y. Soil nematode community succession in stabilised sand dunes in the Tengger Desert, China. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47(5):508-517.
- [11] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, Zhang Z H, Wang T, Ram R. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region; A case study in Hexi Corridor, northwest China. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2):117-124.
- [12] Zhang D Y, Ma W B, Shi X, Wang J C, Wang X Y. Distribution and bio-ecological characteristics of *Eremosparton songoricum*, a rare plant in Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(3):430-436.
- [13] Zhang D Y, Wang J C, Shi X. Population quantitative dynamics of the rhizomatous woody clonal plant *Eremosparton songoricum* in china's Gurbantunggut Desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 2009, 33(5):893-900.
- [14] Wang J C, Shi X, Zhang D Y, Yin L K. The morphological plasticity of *Eremosparton songoricum* along heterogeneous micro-habitats of continuous moisture gradient changes in sand dunes. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7):3641-3648.
- [15] Wang J C, Shi X, Zhang D Y, Yin L K. Ramet population characteristics and biomass allocation of *Eremosparton songoricum* growing under different water conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12):6475-6481.
- [16] Zhang D Y, Liu H L, Wang J C, Shi X, Liu Y. Conservation biological study on *Eremosparton songoricum*. *Arid Zone Research*, 2011, 28(1):104-110.
- [17] Jiang J. A preliminary study on hydrologic physioecologic characters of *Eremosparton songoricum*. *Arid Zone Research*, 1989, 6(4):43-46.
- [18] Ma W B, Zhang D Y, Yin L K. Variation of seed sizes of *Eremosparton songoricum* geographic populations and germination characteristics. *Arid Land Geography*, 2007, 30(5):674-679.
- [19] Ma W B, Shi X, Zhang D Y, Yin L K. Flowering phenology and reproductive features of the rare plant *Eremosparton songoricum* in desert zone, Xinjiang, China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2008, 32(4):760-767.
- [20] Lu X Y, Zhang D Y, Ma W B. Genetic variation and clonal diversity in fragmented populations of the desert plant *Eremosparton songoricum* based on ISSR markers. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3):282-291.
- [21] Shi X, Wang J C, Zhang D Y, Gaskin J F, Pan B R. Pollination ecology of the rare desert species *Eremosparton songoricum* (Fabaceae). *Australian Journal of Botany*, 2010, 58(1):35-41.
- [22] Wang J C, Shi X, Zhang D Y, Yin L K. Phenotypic plasticity in response to soil moisture availability in the clonal plant *Eremosparton songoricum* (Litv.) Vass. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(1):34-39.
- [23] Liu S L, Wang L D, Gao Z H, Zhong S J. Introduction of endangered plant *Eremosparton songoricum*. *Arid Zone Research*, 1997, 14(2):31-35.
- [24] Zhang D Y, Wang H L. Preliminary study on the growth pattern of several clonal plants in desert zones of Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2005, 22(2):219-224.
- [25] Wang X Q, Zhang Y M, Zhang W M, Han Z W. Wind tunnel experiment of biological crust effect on wind erodibility of sand surface in Gurbantunggut Desert, Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5):632-638.
- [26] Zhang L Y, Chen C D. On the general characteristics of plant diversity of Gurbantunggut sandy desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11):1923-1932.
- [27] Zhang Y M, Wang X Q. Study on the Biological Soil Crust of the Junggar Desert. Beijing: Science Press, 2008.
- [28] Bao S D. Routine Analysis Method for Soil Agro-Chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [29] Tao Y, Liu T, Jia Y M, Cui Y H, Luo C, Wei P, Xie J B. Fractal characteristics of spatial distribution pattern of *Ceratoides ewersmanniana* and *Haloxylon ammodendron* population in the southern Gurbantunggut Desert, Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2008, 31(3):365-372.
- [30] Wu X G, Guo J P. Population structure and spatial distribution pattern of natural regeneration *larix principis-rupprechtii* in Guandi Mountain. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, 27(2):165-170.

- [31] Nicotra A B, Chazdon R L, Iriarte S V B. Spatial heterogeneity of light and woody seedling regeneration in tropical wet forests. *Ecology*, 1999, 80(6):1908-1926.
- [32] Li X R, Zhang J G, Liu L C, Chen H S, Shi Q H. Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3):257-261.
- [33] Zhang J T. *Quantitative Ecology*. Beijing: Science Press, 2004:16-27.
- [34] Fu X, Nan Y H. Population patterns of main communities on halomorphic meadow of Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3(4):313-320.
- [35] Song H X, Jiang M Y, Chen Q B. Point pattern analysis of *Phyllostachys bisetii* ramet population in West China Rainy Area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5):1135-1140.
- [36] Liu H L, Shi X, Wang J C, Yin L K, Huang Z Y, Zhang D Y. Effects of sand burial, soil water content and distribution pattern of seeds in sand on seed germination and seedling survival of *Eremosparton songoricum* (Fabaceae), a rare species inhabiting the moving sand dunes of the Gurbantunggut Desert of China. *Plant and Soil*, 2011, 345(1/2):69-87.
- [37] Liu Y, Zhang D Y, Yang H L, Liu M Y, Shi X. Fine-scale genetic structure of *Eremosparton songoricum* and implication for conservation. *Journal of Arid Land*, 2010, 2(1):26-32.
- [38] Chen J S, Dong M, Yu D. The characteristics of stoloniferous herb *Fragaria vesca* L. ramet population and their variation along an altitudinal gradient in the eastern edge of the Qing-Zang Plateau in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3):428-435.

参考文献:

- [3] 李智琦, 欧阳志云, 曾慧卿. 基于物种的大尺度生物多样性热点研究方法. *生态学报*, 2010, 30(6):1586-1593.
- [6] 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.
- [7] 贾晓红, 李新荣, 王新平, 樊恒文, 赵金龙. 流沙固定过程中土壤性质变异初步研究. *水土保持学报*, 2003, 17(4):46-50.
- [8] 李新荣, 肖洪浪, 刘立超, 张景光, 王新平. 腾格里沙漠沙坡头地区固沙植被对生物多样性恢复的长期影响. *中国沙漠*, 2005, 25(2):173-181.
- [12] 张道远, 马文宝, 施翔, 王建成, 王习勇. 准噶尔无叶豆的地理分布、群落学特征及生物生态学特性. *中国沙漠*, 2008, 28(3):430-436.
- [13] 张道远, 王建成, 施翔. 根茎型木本克隆植物准噶尔无叶豆的种群数量动态. *植物生态学报*, 2009, 33(5):893-900.
- [14] 王建成, 施翔, 张道远, 尹林克. 沙丘坡面异质性小生境中准噶尔无叶豆对水分条件变化的响应. *生态学报*, 2009, 29(7):3641-3648.
- [15] 王建成, 施翔, 张道远, 尹林克. 不同水分下准噶尔无叶豆分株种群特征和生物量分配差异. *生态学报*, 2009, 29(12):6475-6481.
- [16] 张道远, 刘会良, 王建成, 施翔, 刘燕. 准噶尔无叶豆的保护生物学研究. *干旱区研究*, 2011, 28(1):104-110.
- [17] 蒋进. 准噶尔无叶豆水分生理生态学特性的初步研究. *干旱区研究*, 1989, 6(4):21-28.
- [18] 马文宝, 张道远, 尹林克. 准噶尔无叶豆地理种群种子萌发特性. *干旱区地理*, 2007, 30(5):674-679.
- [19] 马文宝, 施翔, 张道远, 尹林克. 准噶尔无叶豆的开花物候与生殖特征. *植物生态学报*, 2008, 32(4):760-767.
- [20] 陆雪莹, 张道远, 马文宝. 准噶尔无叶豆片断化居群的遗传变异及克隆多样性. *生物多样性*, 2007, 15(3):282-291.
- [23] 刘生龙, 王理德, 高志海, 仲述军. 沙区濒危植物准噶尔无叶豆引种试验. *干旱区研究*, 1997, 14(2):31-35.
- [24] 张道远, 王红玲. 荒漠区几种克隆植物生长构型的初步研究. *干旱区研究*, 2005, 22(2):219-224.
- [25] 王雪芹, 张元明, 张伟民, 韩致文. 古尔班通古特沙漠生物结皮对地表风蚀作用影响的风洞实验. *冰川冻土*, 2004, 26(5):632-638.
- [26] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. *生态学报*, 2002, 22(11):1923-1932.
- [27] 张元明, 王雪芹. 准噶尔荒漠生物结皮研究. 北京: 科学出版社, 2008.
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [29] 陶冶, 刘彤, 贾亚敏, 崔运河, 骆郴, 魏鹏, 谢江波. 古尔班通古特沙漠南缘心叶驼绒藜和梭梭种群空间格局的分形特征. *干旱区地理*, 2008, 31(3):365-372.
- [30] 武小钢, 郭晋平. 关帝山华北落叶松天然更新种群结构与空间格局研究. *武汉植物学研究*, 2009, 27(2):165-170.
- [32] 李新荣, 张景光, 刘立超, 陈怀顺, 石庆辉. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. *植物生态学报*, 2000, 24(3):257-261.
- [33] 张金屯. 数量生态学. 北京: 科学出版社, 2004:16-27.
- [34] 傅星, 南寅镐. 科尔沁沙地盐生草甸主要植物群落种群格局的研究. *应用生态学报*, 1992, 3(4):313-320.
- [35] 宋会兴, 江明艳, 陈其兵. 华西雨屏区白夹竹分株种群的点格局分析. *应用生态学报*, 2011, 22(5):1135-1140.
- [38] 陈劲松, 董鸣, 于丹. 青藏高原东缘匍茎草本野草莓的分株种群特征及其沿海海拔梯度的变化. *生态学报*, 2003, 23(3):428-435.

CONTENTS

Widespread of anaerobic ammonia oxidation bacteria in an eutrophic freshwater lake wetland and its impact on nitrogen cycle	WANG Shanyun, ZHU Guibing, QU Dongmei, et al (6591)
Responses of soil enzyme activities of degraded coastal saline wetlands to irrigation with treated paper mill effluent	XIA Mengjing, MIAO Ying, LU Zhaozhua, et al (6599)
Wetland ecosystem health assessment of the Tumen River downstream	ZHU Weihong, GUO Yanli, SUN Peng, et al (6609)
An index of biological integrity: developing the methodology for assessing the health of the Baiyangdian wetland	CHEN Zhan, LIN Bo, SHANG He, et al (6619)
MODIS-based analysis of wetland area responses to hydrological processes in the Dongting Lake	LIANG Jie, CAI Qing, GUO Shenglian, et al (6628)
The diversity of invasive plant <i>Spartina Alterniflora</i> rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary	ZHANG Zhengya, DING Chengli, XIAO Ming (6636)
Analyzing the azimuth distribution of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in subtropical regions of eastern China using the harmonic analysis	ZHAO Xingyun, LI Baohui, WANG Jian, et al (6647)
In the process of grassland degradation the spatial pattern and spatial association of dominant species	GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang (6661)
Activities of soil oxidoreductase and their response to seasonal freeze-thaw in the subalpine/alpine forests of western Sichuan	TAN Bo, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (6670)
Simulating the effects of forestry classified management on forest biomass in Xiao Xing'an Mountains	DENG Huawei, BU Rencang, LIU Xiaomei, et al (6679)
The simulation of three-dimensional canopy net photosynthetic rate of apple tree	GAO Zhaoquan, ZHAO Chenxia, ZHANG Xianchuan, et al (6688)
The effect of <i>Phomopsis</i> B3 and organic fertilizer used together during continuous cropping of strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> Duch) ...	HAO Yumin, DAI Chuanchao, DAI Zhidong, et al (6695)
Temporal and spatial variations of DOC, DON and their function group characteristics in larch plantations and possible relations with other physical-chemical properties	SU Dongxue, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (6705)
Comparisons of quantitative characteristics and spatial distribution patterns of <i>Eremosparton songoricum</i> populations in an artificial sand fixed area and a natural bare sand area in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China	ZHANG Yongkuan, TAO Ye, LIU Huiliang, et al (6715)
Comparison study on macroinvertebrate assemblage of riffles and pools: a case study of Dong River in Kaixian County of Chongqing, China	WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong (6726)
Nekton community structure and its relationship with main environmental variables in Lidao artificial reef zones of Rongcheng	WU Zhongxin, ZHANG Lei, ZHANG Xiumei, et al (6737)
Zooplankton diversity and its variation in the Northern Yellow Sea in the autumn and winter of 1959, 1982 and 2009	YANG Qing, WANG Zhenliang, FAN Jingfeng, et al (6747)
Building ecological security pattern based on land use: a case study of Ordos, Northern China	MENG Jijun, ZHU Likai, YANG Qianet al (6755)
Additive partition of species diversity across multiple spatial scales in community culturally protected forests and non-culturally protected forests	GAO Hong, CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun (6767)
Environmental perception of farmers of different livelihood strategies: a case of Gannan Plateau	ZHAO Xueyan (6776)
Application and comparison of two prediction models for groundwater dynamics	ZHANG Xia, LI Zhanbin, ZHANG Zhenwen, et al (6788)
Pollination success of <i>Phaius delavayi</i> in Huanglong Valley, Sichuan	HUANG Baoqiang, KOU Yong, AN Dejun (6795)
Mechanism of nitrification inhibitor on nitrogen-transformation bacteria in vegetable soil	YANG Yang, MENG Denglong, QIN Hongling, et al (6803)
Archaea diversity in water of two typical brackish lakes in Xinjiang	DENG Lijuan, LOU Kai, ZENG Jun, et al (6811)
Abundance and biomass of heterotrophic flagellates in Baiyangdian Lake, as well as their relationship with environmental factors	ZHAO Yujuan, LI Fengchao, ZHANG Qiang, et al (6819)
Effects of bisphenol A on the toxicity and life history of the rotifer <i>Brachionus calyciflorus</i>	LU Zhenghe, ZHAO Baokun, YANG Jiaxin (6828)
Effect of incubation temperature on behavior and metabolism in the Chinese cornsnake, <i>Elaphe bimaculata</i>	CAO Mengjie, ZHU Si, CAI Ruoru, et al (6836)
Functional and numerical responses of <i>Mallada besalis</i> feeding on <i>Coreyra cephalonica</i> eggs	LI Shuiquan, HUANG Shoushan, HAN Shichou, et al (6842)
Stability analysis of mutualistic-parasitic coupled system	GAO Lei, YANG Yan, HE Junzhou, et al (6848)
Effect of ultra-micro powder qiweibaishuan on the intestinal microbiota and enzyme activities in mice	TAN Zhoujin, WU Hai, LIU Fulin, et al (6856)
Review and Monograph	
The effects of nitrogen deposition on forest carbon sequestration: a review	CHEN Hao, MO Jiangming, ZHANG Wei, et al (6864)
Effect of enhanced CO ₂ level on the physiology and ecology of phytoplankton	ZHAO Xuhui, KONG Fanxiang, XIE Weiwei, et al (6880)
Transboundary protected areas as a means to biodiversity conservation	SHI Longyu, LI Du, CHEN Lei, et al (6892)
Scientific Note	
The energy storage and its distribution in 11-year-old chinese fir plantations in Huitong and Zhuting	KANG Wenxing, XIONG Zhengxiang, HE Jienan, et al (6901)
Spatial pattern of sexual plants and vegetative plants of <i>Stipa krylovii</i> population in alpine degraded grassland	REN Heng, ZHAO Chengzhang, GAO Fuyuan, et al (6909)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 21 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 21 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元