

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

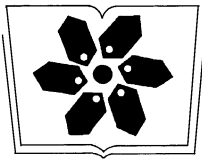
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112021848

张鹏莉, 陈俊, 崔树娟, 程积民. 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征. 生态学报, 2013, 33(2): 0425-0434.

Zhang P L, Chen J, Cui S J, Cheng J M. A The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0425-0434.

禁牧条件下不同类型草地群落结构特征

张鹏莉¹, 陈俊^{1,*}, 崔树娟¹, 程积民²

(1. 西北农林科技大学动物科技学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 利用幂乘方法则模型探讨了鄂尔多斯 3 种不同类型草地在禁牧情况下的群落结构特征, 包括物种组成、物种多样性、生物量和空间分布规律。结果表明: 幂乘方法则在解析鄂尔多斯不同类型草地的空间异质性时具有很好的吻合性; 羊草 (*Leymus chinensis*) 草地、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 草地和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 灌丛草地均比随机分布呈现了较强的空间异质性, 群落整体的空间异质性指数表现为油蒿灌丛草地 > 羊草草地 > 芨芨草草地; 群落整体的物种多样性指数为油蒿灌丛草地 > 羊草草地 > 芨芨草草地; L-样方 (50 cm × 50 cm) 内的平均物种数和物种多样性指数均表现为羊草草地极显著地高于油蒿灌丛草地, 油蒿灌丛草地又极显著地高于芨芨草草地 ($P < 0.001$); L-样方内的平均生物量表现为油蒿灌丛草地极显著地高于芨芨草草地 ($P < 0.001$), 而羊草草地与油蒿灌丛草地以及芨芨草草地之间没有显著性差异; 这 3 种类型的草地其 L-样方内的平均生物量和物种多样性指数都随着群落整体空间异质性指数的增大而增大。

关键词: 不同类型草地; 幂乘方法则; 生物量; 物种多样性; 空间异质性

The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition

ZHANG Pengli¹, CHEN Jun^{1,*}, CUI Shujuan¹, CHENG Jimin²

1 College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yang ling, Shaanxi 712100, China

Abstract: Spatial heterogeneity is an important feature in grassland ecosystems. Understanding spatial heterogeneity and species richness is important for determining the degree of grassland degradation and for promoting the recovery of grassland ecosystems. We conducted field surveys in a *Leymus chinensis* grassland, an *Achnatherum splendens* grassland, and an *Artemisia ordosica* shrub grassland in Yijinhualuo-Qi, Ordos, China, in August 2010. First, we established study plots composed of 90 quadrats along a 45 m transect in each of the three grasslands; each quadrat was 50 cm × 50 cm and was divided into four 25 cm × 25 cm sub-quadrats. We recorded all plant species within each sub-quadrat. Then, we harvested the aboveground biomass along each transect every 5 m, classified the content by species, and weighed the oven-dried material. We analyzed vegetation data using the power law to examine characteristics such as species composition, species diversity, biomass, and spatial distribution in the three types of grassland. Our results indicated that all three types of grassland followed the power law and exhibited a strongly heterogeneous distribution of vegetation (versus a random distribution). The index values of spatial heterogeneity and species diversity for the entire community in the *A. ordosica* shrub grassland were higher than those for the *L. chinensis* grassland, and those for the *L. chinensis* grassland were higher than those for the *A. splendens* grassland. The species richness and species diversity per 50 cm × 50 cm quadrat in the *L.*

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资助 (CARS-35-02A); 2008 引进人才科研启动基金 (01140413); 农业部公益性行业专项 (200903060)

收稿日期: 2011-12-02; **修订日期:** 2012-08-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chen_jun2008@nwsuaf.edu.cn

chinensis grassland were higher than for the *A. ordosica* shrub grassland; the *A. splendens* grassland had the lowest values. The average per-quadrat biomass in the *A. ordosica* shrub grassland was significantly higher than that in the *A. splendens* grassland, whereas the values in the *L. chinensis* grassland did not differ significantly from the other two grassland types. The average biomass and species diversity per quadrat increased with the spatial heterogeneity for the entire community in all three types of grassland. We analyzed the species compositions in these three grassland types from the viewpoint of biological succession and found that the grasslands changed greatly after enclosure with a fence to exclude grazing for 10 years. Inside the enclosure, annuals such as *Salsola collina* and poisonous, harmful plants such as *Cynanchum komarovii* decreased greatly, while highly nutritious grasses and legumes with good palatability for livestock became the main species. This indicates that the grassland vegetation had recovered to some degree by 2010 after establishing the enclosure in Yijinhualuo-Qi.

Recently, the power law has been used widely in Japan for calculating the quantitative species composition and spatial heterogeneity of constituent plant species. However, this method has not been used much in China, which has a vast area of grassland. The power law requires only a survey to count the binary occurrence of each species in quadrats, and the survey is simple and convenient for observing many quadrats (i. e., >50—100 quadrats) in a short time. This method also avoids the destruction of vegetation during observations because it is based only on visual observation.

Key Words: different types of grassland; power law; biomass; species diversity; spatial heterogeneity

空间异质性是草地生态系统的一个重要特征。草地植被群落空间分布的异质性意味着植物种群及群落斑块的大小。尺度在研究空间异质性时是一个很关键的因素,空间异质性在不同尺度上具有不同的格局,研究小尺度上的空间异质性格局和动态有助于对大尺度景观进行评价和动态监测,重视小尺度空间结构的研究对确定草地退化程度、促进草地生态恢复具有重要意义^[1-2]。小尺度空间结构的研究自 Stowe 等^[3]提出后就引起广大学者的充分重视^[4-9],目前关于小尺度空间结构的研究,所使用的解析方法主要有地统计学和分形分析等^[10-15]方法,而运用数理统计模型——幂乘方法则,对这一指标进行的定量研究甚少。

幂乘方法则模型是 1960 年英国昆虫学家 Taylor^[16]在研究昆虫种群分布中发现的,随后在昆虫生态学以及植物病理学中得到广泛运用^[17],之后该模型又被日本学者 Shiyomi^[18]等应用于草地植被群落空间异质性的研究中。近年来,幂乘方法则解析法与二值出现次数调查法相结合在日本草地植被的调查研究中被广泛地使用,因为二值出现次数调查法克服了传统的刈割法测生物量对植被带来的直接破坏,降低了野外植被调查的难度,省时省力,与幂乘方法则解析法相结合,可定量地计算草地植被群落及其组成群落的各植物种群的空间异质性^[19-22],然而目前这种方法在草原面积辽阔的中国尚未得到推广^[23]。

内蒙古草原是中国北方重要的草地资源和绿色生态屏障^[24],鄂尔多斯高原位于内蒙古的中西部,多年来重利用轻保护的粗放式畜牧业生产方式直接导致了草原生态环境整体恶化,这已成为阻碍畜牧业发展、危及生态安全的重大难题^[25]。近年来,国内学者主要从植物群落空间格局、物种多样性、土壤养分空间变异特征,荒漠化过程与植被生物量变迁关系以及种群分布与降水的关系等方面对鄂尔多斯草原区开展了相应研究^[26-30],而利用数学方法,定量地探讨禁牧情况下小尺度上植物群落空间分布规律的研究并不多见。基于此,本研究主要是采用二值出现次数的野外调查方法,结合幂乘方法则解析法对鄂尔多斯 3 种不同类型草地在禁牧情况下的植被群落结构特征进行研究,包括物种组成、物种多样性、生物量和植被空间分布规律,主要研究内容包括:组成群落的各植物种群的空间异质性程度;优势种及其对群落整体异质性的影响;物种多样性、生物量与群落整体空间异质性的关系。以期为退化草地的恢复、生产力的提高以及草地生态环境的保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 调查地概况

调查地位于鄂尔多斯伊金霍洛旗境内。伊金霍洛旗(108°58′—110°25′E, 38°56′—39°49′N 之间),位于

鄂尔多斯高原东南部,总面积 5600 km²。地处亚洲中部干旱草原向荒漠草原过渡的半干旱、干旱地带。全旗年降雨量 340—420 mm 之间,年平均气温 6.2 ℃,极端最低气温-31.4 ℃,极端最高气温 36.6 ℃,无霜期限 130—140 d,常年风大沙多,蒸发旺盛,全年蒸发量 2163 mm,是降雨量的 7 倍。土壤类型主要有栗钙土、垆土及风沙土。伊金霍洛旗草场资源比较丰富,草场总面积为 341504 hm²,占全旗土地总面积的 55.6%,植被类型多样,植物资源较丰富,多由多年生的草群组成,以丛生禾本科为主,其次是油蒿和豆科杂草,灌木和半灌木占有较大比重,油蒿的比重高达 60% 左右,然而由于历代开垦、过度放牧和不合理的樵采导致地带性植被逐渐减少,草群低矮而稀疏,植物种减少,有毒植物成片出现,产草量显著下降,草场风蚀,碱蚀严重。绝大部分地区地带性植被已经被隐域性的沙生植被、草甸植被、盐生植被等所代替,这是禁牧前本旗草场植被最明显的特征^[31]。基于上述情况,伊金霍洛旗从 2000 年开始在全旗范围内实施围栏封育。本项研究野外调查是在该旗境内的羊草草地(109°42′16″E,39°27′48″N,海拔 1338 m)、芨芨草草地(109°36′15″E,39°27′08″N,海拔 1404 m)、油蒿灌丛草地(109°40′09″E,39°27′39″N,海拔 1368 m)内进行,这 3 种草地均实行全年禁牧。

1.2 调查方法

野外调查于 2010 年 8 月 15 日至 8 月 20 日在鄂尔多斯伊金霍洛旗境内的羊草草地、芨芨草草地和油蒿灌丛草地上进行。调查采用样线法,分别在上述草地上选择有代表性的地段拉一条 45 m 长的样线,沿着样线顺次摆放 90 个 50 cm×50 cm 的样方即 L-样方,将 L-样方均等地分割为 4 个 25 cm×25 cm 的小样方即 S-样方,记录 S-样方内各植物种是否出现,其中“不出现”记为 0,“出现”则记为 1,得到 90 个 L-样方内每种植物的出现次数数据,这种调查方法即为二值出现次数调查法^[22,32]。然后,顺着样线每隔 5 m 将一个 L-样方内的所有植物齐地面剪下,每条样线 10 个样方,共计 30 个,装入纸袋内,带回实验室,在 65 ℃ 恒温干燥箱干燥 48 h 至恒重,称重得到每个 L-样方内的所有植物的生物量。

1.3 数据解析方法

数据解析利用幂乘方法则进行。所谓幂乘方法则,就是以 $\log[p_i(1-p_i)/n]$ 为横坐标 x_i , $\log(v_i/n^2)$ 为纵坐标 y_i ,对群落中出现的所有植物种作散点图时, y_i 可以用 x_i 的线性回归式来表示的经验法则。

在植物群落中,如果用 p_i 表示某种植物种 i 在 S-样方内的出现频率(p_i = 种 i 出现的 S-样方数/S-样方总数(本调查中 S-样方总数为 360 个)), v_i 表示在 L-样方之间植物种 i 出现次数(0,1,⋯, n ; n 为 L-样方内的 S-样方数,本调查中 $n=4$)的方差,那么, v_i/n^2 就表示植物种 i 的实际观测频率的方差,而 $p_i(1-p_i)/n$ 则表示植物种 i 在一个 L-样方中随机地出现在 n 个 S-样方中时,出现频率的方差。如果某一植物群落中有 s 种植物存在,那么,两个方差的关系可用下式表示:

$$v_i/n^2 = \alpha' [p_i(1-p_i)/n]^\beta \zeta_i, i=1, 2, \dots, s$$

式中, α' 和 β 是常数, ζ 表示随机变量。对两个方差取对数值,用 $y_i = \log(v_i/n^2)$ 和 $x_i = \log[p_i(1-p_i)/n]$ 时,就可以得到 y_i 与 x_i 之间关系的线性回归方程式:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i$$

式中, $\alpha = \log \alpha'$, β 为从实测数据推算得到的常数, $\varepsilon_i = \log \zeta$ 表示植物种 i 离开回归直线的距离的残差项。幂乘方法则不仅可以用于草地植物群落的空间分布格局还可以在景观水平的植被图的空间分布异质性解析中应用^[18,33-35]。

空间异质性指数 如果植物种 i 的 y_i 值与 $y=x$ 直线间沿着 y 轴方向的距离用 δ_i 来表示,那么, δ_i 就表示种 i 的空间分布异质性程度大小的指数值。 $\delta_i=0$ 时,种 i 为随机分布; $\delta_i>0$ 时,种 i 比随机分布具有强的异质性分布; $\delta_i<0$ 时,种 i 比随机分布具有弱的异质性分布^[22-23,33-36]。一般情况下植物群落的空间分布有图 1 所示的 5 种基本类型。图 1A 是幂乘方法则的直线与 $y=x$ 直线完全重合,这表示群落整体处于随机分布状态;图 1B 为幂乘方法则的直线整体位于 $y=x$ 直线上方,表明群落整体比随机分布具有强的空间异质性(团块分布);图 1C 中,幂乘方法则直线整体位于 $y=x$ 直线的下方,说明群落整体比随机分布的空间异质性程度弱(即均匀分布)。图 1D 和 1E 的幂乘方法则直线与 $y=x$ 直线相交,说明组成群落的一部分植物种比随机分布具有

强的空间异质性,而另一部分植物种则比随机分布具有弱的空间异质性。

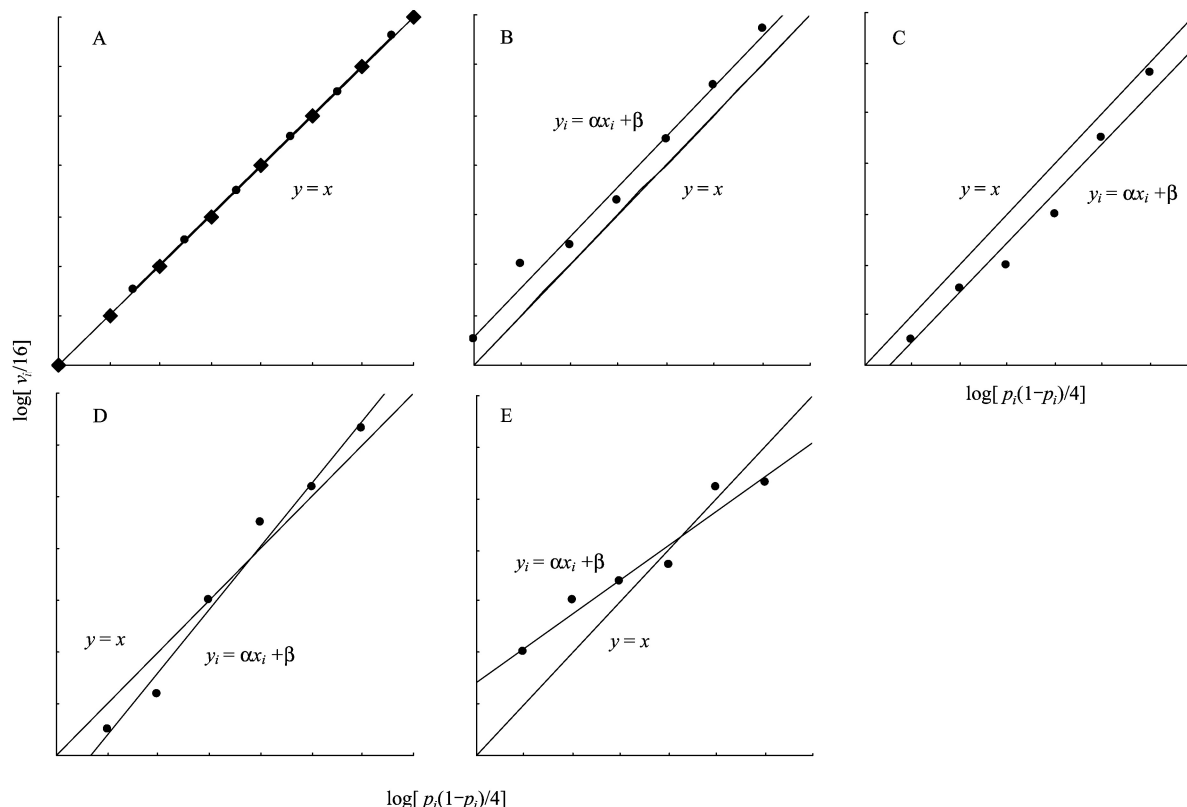


图1 幂乘方法则的团块分布、随机分布、均匀分布模型

Fig. 1 Aggregated, random and regular distribution patterns in power law

A: 随机分布模型, B: 团块分布模型, C: 均匀分布模型, D 和 E: 团块分布与均匀分布的混合分布模型

群落整体的空间异质性程度可用下面的 δ_c 值^[14-16]来表示:

$$\delta_c = \frac{\sum_{i=1}^s p_i \delta_i}{\sum_{i=1}^s p_i}$$

式中, p_i 、 δ_i 分别表示种 i 的出现频率及异质性指数, s 为群落内出现的物种数。 δ_c 值越大, 群落整体的空间分布异质性程度就越高, 根据 δ_c 值对空间分布异质性程度进行判断时其标准与 δ_i 值相同。

物种多样性指数 采用了 Shannon-Wiener 的 H' 指数, 即:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p'_i \ln p'_i$$

式中, p'_i 为 p_i 的相对值, 用下式计算:

$$p'_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^s p_i}$$

2 结果与分析

2.1 幂乘方法则的吻合性

所谓幂乘方法则的吻合性检验是指幂乘方法则对于研究组成草地群落的各植物种群的空间分布规律是否适用。

3 种草地对幂乘方法则的吻合程度如图 2 所示, 从图中可以看出, 无论哪种草地, 幂乘方法则的直线, 决

定系数 R^2 值都在 0.96 以上,说明组成这 3 种草地群落的各植物种群的空间分布规律均与幂乘方法则吻合。所以可以利用幂乘方法则对群落空间分布进行解析。

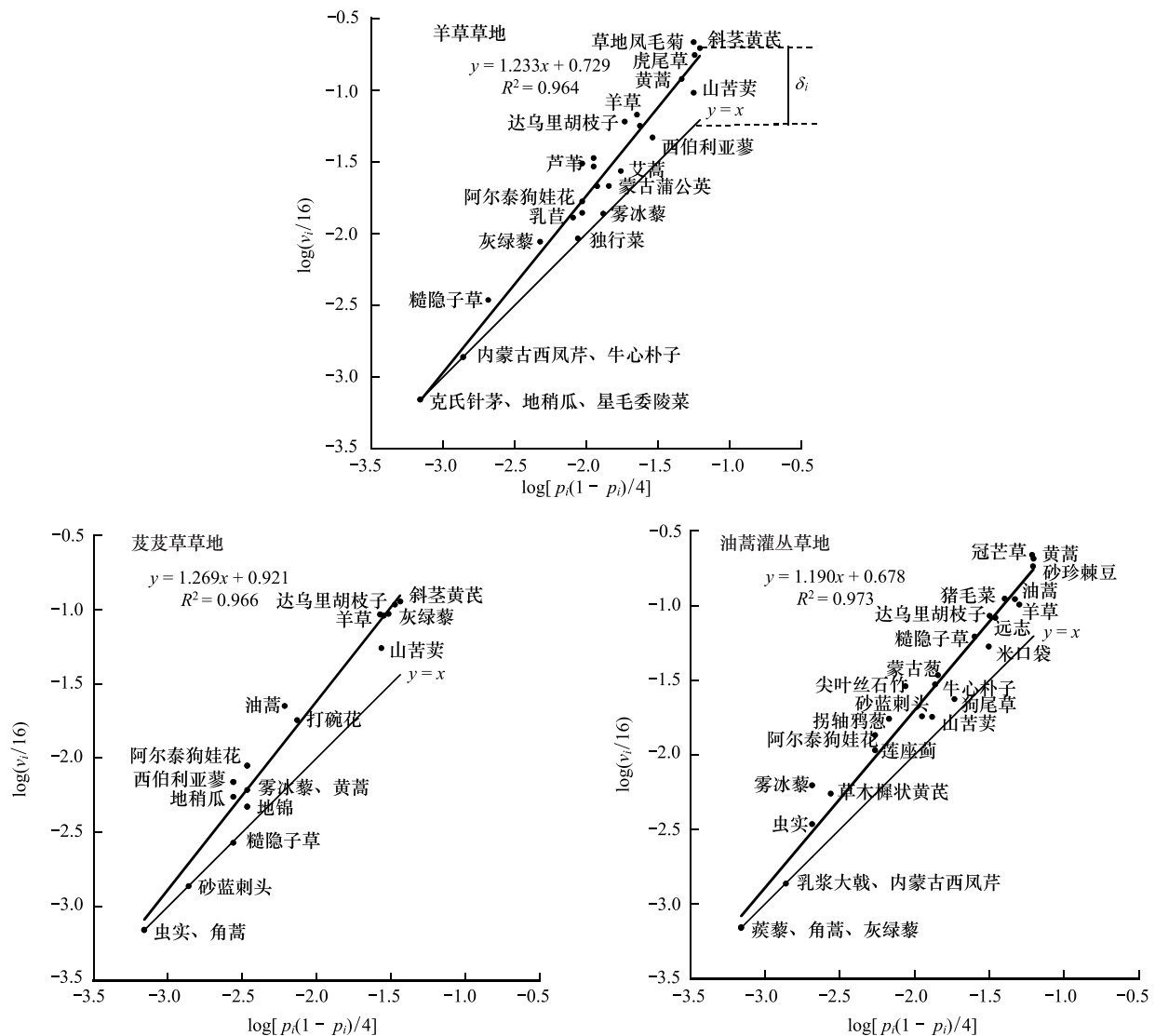


图 2 3 种不同类型草地植物群落对幂乘方法则的适合性

Fig. 2 Application of the power law to the three different types of grassland

点到直线 $y=x$ 的距离 δ_i 表示植物种 i 的异质程度大小。A: 羊草草地 *L. chinensis* grassland, B: 芨芨草草地 *A. splendens* grassland, C: 油蒿灌丛草地 *A. ordosica* shrub grassland; 羊草 (*Leymus chinensis*), 黄蒿 (*Artemisia scoparia*), 冠芒草 (*Enneapogon borealis*), 虎尾草 (*Chloris virgata*), 斜茎黄芪 (*Astragalus adsurgens*), 油蒿 (*Artemisia ordosica*), 达乌里胡枝子 (*Lepedeza davurica*) 草地风毛菊 (*Saussurea amara*), 灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*), 砂珍棘豆 (*Oxytropis psamocharis*), 山苦荬 (*Ixeris chinensis*), 猪毛菜 (*Salsola collina*), 远志 (*Polygala*), 地锦 (*Parthenocissus tricuspidata*), 打碗花 (*Calystegia hederacea*), 米口袋 (*Gueldenstaedtia verna*), 芨芨草 (*Achnatherum splendens*), 糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*), 狗尾草 (*Salsola collina*), 艾蒿 (*Artemisia argyi*), 蒙古蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*), 阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*), 蒙古葱 (*Allium mongolicum*), 车前 (*Plantago asiatica*), 雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*), 寸草苔 (*Carex duriuscula*), 地稍瓜 (*Cynanchum thesiodes*), 画眉草 (*Eragrostis pilosa*), 砂蓝刺头 (*Echinops gmelini*), 尖叶丝石竹 (*Gypsophila acutifolia*), 拐轴鸦葱 (*Scorzonera divaricata*), 芦苇 (*Phragmites australis*), 莲座蓟 (*Cirsium esculentum*), 独行菜 (*Lepidium apetalum*), 角蒿 (*Incarvillea sinensis*), 乳苣 (*Mulgedium tataricum*), 草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*), 内蒙西凤芹 (*Seseli intramongolicum*), 牛心朴子 (*Cynanchum komarovii*), 乳浆大戟 (*Euphorbia esula*), 克氏针茅 (*Stipa krylovii*), 蒺藜 (*Tribulus terrestris*), 星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)

图中每个点代表一种植物种群,其与直线 $y=x$ 沿着 y 轴方向的距离(如图 2 中的 δ_i)表示斜茎黄芪种群空间异质性程度的大小。因此,从图中可以很直观的看出组成群落的各个植物种群的空间异质性程度。另

外,回归直线整体上位于直线 $y=x$ 的上方,说明群落整体上都比随机分布具有强的空间异质性。

2.2 群落整体特征

从表 1 可以看出,羊草草地、油蒿灌丛草地内出现的总物种数相等且都多于芨芨草草地;物种多样性指数表现为油蒿灌丛草地>羊草草地>芨芨草草地的趋势;L-样方内的平均物种数和物种多样性指数均表现为羊草草地极显著地高于油蒿灌丛草地,油蒿灌丛草地又极显著地高于芨芨草草地 ($P<0.001$);群落整体的空间异质性指数也呈现出油蒿灌丛草地>羊草草地>芨芨草草地的趋势;L-样方内的平均生物量为油蒿灌丛草地极显著地高于芨芨草草地 ($P<0.001$),而羊草草地与油蒿灌丛草地以及羊草草地与芨芨草草地之间没有显著性差异。由表中可看出这 3 种类型的草地其 L-样方内的平均生物量和物种多样性指数都随着群落整体空间异质性指数的增大而增大。

表 1 群落整体特征

Table 1 Community characteristics

项目 Item	羊草草地 <i>L. chinensis</i> grassland	芨芨草草地 <i>A. splendens</i> grassland	油蒿灌丛草地 <i>A. ordosica</i> shrub grassland
总物种数 (22.5 m ²) Number of total species (22.5 m ²)	27	20	27
物种多样性指数 (H') Diversity (H')	2.43	1.82	2.58
L-样方内的平均物种数 \pm SD (/0.25 m ²) Mean richness per L-quadrat	6.62 ^A \pm 1.36	3.50 ^C \pm 1.13	5.52 ^B \pm 1.56
L-样方内的物种多样性指数 H' \pm SD Diversity H' per L-quadrat	1.74 ^A \pm 0.20	1.13 ^C \pm 0.31	1.55 ^B \pm 0.29
L-样方内的平均生物量 \pm SD (/0.25 m ²) Mean biomass per L-quadrat	25.96 ^{AB} \pm 12.51	17.96 ^B \pm 4.28	32.42 ^A \pm 13.52
群落的空间异质性指数 (δ_c) Spatial heterogeneity index of community (δ_c)	0.41	0.37	0.42

同一行中不同字母表示 0.001 水平差异显著;SD:标准偏差

2.3 群落中出现的所有植物种及其空间异质性指数

表 2 表示的是 3 种不同类型草地所有植物种的出现频率与其相应的空间异质性指数。其中,羊草草地中出现频率较高的植物种有羊草、虎尾草、斜茎黄芪、草地凤毛菊、黄蒿和山苦荬,其中仅山苦荬的空间异质性指数值低,其余 5 种的空间异质性指数值均很高,所以该群落整体上具有较高的空间异质性。由于从出现频率位于第七位的西伯利亚蓼开始,后续这些植物种的出现频率都很低,所以无论其空间异质性指数值大或小,它们对群落整体的异质性影响较小。

芨芨草草地中,出现频率较高的植物种有羊草和黄蒿,其中羊草空间异质性指数值很高,增强了群落整体的空间异质性,而黄蒿空间异质性指数值比较低,所以群落整体上的异质性程度较低。从第 3 种植物斜茎黄芪开始频率骤然下降,由于之后的物种出现频率都很低,所以根据出现频率来解释它们空间异质性程度大小的准确率就比较低,说明该草地中除芨芨草外主要的优势种为黄蒿和羊草,其他的植物种仅起到伴生种的作用。

油蒿灌丛草地中各植物种的出现频率变化幅度缓和,没有明显的优势种,其中出现频率较高的植物种有冠芒草、油蒿、黄蒿、羊草、砂珍棘豆,且它们的空间异质性指数值较大,所以群落整体的异质性程度高。从远志开始各物种的出现频率都很低,对群落整体的异质性程度影响甚微。

由表可知,这 3 种草地群落中出现频率均较高 ($P>0.2$) 的共同植物种有羊草和黄蒿,说明这两种植物在上述 3 种草地中都分布广泛。其中,黄蒿在芨芨草草地中空间异质性指数值较低,所以导致该草地群落整体的异质性程度也比较低,在其它两种草地中均具有较高的空间异质性指数值,因此,羊草草地和油蒿草地群落整体的异质性处于较高水平。

表 2 根据出现频率排序的所有植物种

Table 2 All species based on occurrence frequency

顺序 Order	羊草草地 <i>L. chinensis</i> grassland			芨芨草草地 <i>A. splendens</i> grassland			油蒿灌丛草地 <i>A. ordosica</i> shrub grassland		
	种名 Species name	P_i	δ_i	种名 Species name	P_i	δ_i	种名 Species name	P_i	δ_i
1	羊草 <i>L. chinensis</i>	0.90	0.48	黄蒿 <i>A. scoparia</i>	0.99	0.14	冠芒草 <i>E. borealis</i>	0.58	0.55
2	黄蒿 <i>A. scoparia</i>	0.76	0.41	羊草 <i>L. chinensis</i>	0.88	0.54	黄蒿 <i>A. scoparia</i>	0.54	0.47
3	虎尾草 <i>C. virgata</i>	0.65	0.49	斜茎黄芩 <i>A. adsurgens</i>	0.18	0.50	油蒿 <i>A. ordosica</i>	0.51	0.52
4	斜茎黄芩 <i>A. adsurgens</i>	0.54	0.50	达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i>	0.16	0.51	羊草 <i>L. chinensis</i>	0.28	0.31
5	草地凤毛菊 <i>S. amara</i>	0.34	0.59	灰绿藜 <i>C. glaucum</i>	0.14	0.49	砂珍棘豆 <i>O. psamocharis</i>	0.25	0.37
6	山苦荬 <i>I. chinensis</i>	0.34	0.23	猪毛菜 <i>S. collina</i>	0.13	0.51	猪毛菜 <i>S. collina</i>	0.19	0.44
7	西伯利亚蓼 <i>P. sibiricum</i>	0.13	0.21	山苦荬 <i>I. chinensis</i>	0.13	0.31	远志 <i>P. tenuifolia</i>	0.17	0.38
8	地锦 <i>P. tricuspidata</i>	0.11	0.38	打碗花 <i>C. hederacea</i>	0.03	0.39	达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i>	0.15	0.43
9	达乌里胡枝子 <i>L. davurica</i>	0.08	0.51	油蒿 <i>A. ordosica</i>	0.03	0.57	米口袋 <i>G. verna</i>	0.15	0.23
10	猪毛菜 <i>S. collina</i>	0.08	0.20	芨芨草 <i>A. splendens</i>	0.01	0.42	糙隐子草 <i>C. squarrosa</i>	0.11	0.39
11	艾蒿 <i>A. argyi</i>	0.06	0.18	糙隐子草 <i>C. squarrosa</i>	0.01	0.25	狗尾草 <i>S. viridis</i>	0.08	0.11
12	蒙古蒲公英 <i>T. mongolicum</i>	0.06	0.02	阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	0.01	0.42	蒙古葱 <i>A. mong olicum</i>	0.06	0.38
13	车前 <i>P. o asiatica</i>	0.05	0.25	雾冰藜 <i>B. dasyphylla</i>	0.01	0.14	牛心朴子 <i>C. komarovii</i>	0.06	0.33
14	寸草苔 <i>C. duriusula</i>	0.05	0.47	地稍瓜 <i>C. thesiodes</i>	0.01	0.30	山苦荬 <i>I. chinensis</i>	0.06	0.14
15	画眉草 <i>E. pilosa</i>	0.05	0.42	地锦 <i>P. tricuspidata</i>	0.01	-0.01	砂蓝刺头 <i>E. gmelini</i>	0.05	0.21
16	雾冰藜 <i>B. dasyphylla</i>	0.04	0.17	砂珍棘豆 <i>O. psamocharis</i>	0.01	0.40	尖叶丝石竹 <i>G. acutifolia</i>	0.04	0.52
17	阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	0.04	0.25	西伯利亚蓼 <i>P. sibiricum</i>	0.01	0.40	拐轴鸦葱 <i>S. divaricata</i>	0.03	0.41
18	芦苇 <i>P. australis</i>	0.04	0.52	砂蓝刺头 <i>E. gmelini</i>	0.01	0.00	莲座蓟 <i>C. esculentum</i>	0.02	0.30
19	独行菜 <i>L. apetalum</i>	0.04	0.02	角蒿 <i>I. sinensis</i>	0.00	0.00	阿尔泰狗娃花 <i>H. altaicus</i>	0.02	0.40
20	乳苣 <i>M. tataricum</i>	0.03	0.21	虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	0.00	0.00	草木樨状黄芩 <i>A. melilotoides</i>	0.01	0.30
21	灰绿藜 <i>C. glaucum</i>	0.02	0.26				虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	0.01	0.22
22	糙隐子草 <i>C. squarrosa</i>	0.01	0.22				雾冰藜 <i>B. dasyphylla</i>	0.01	0.48
23	内蒙古西风芹 <i>S. intramongolicum</i>	0.01	0.00				内蒙古西风芹 <i>S. ntramongolicum</i>	0.01	0.00
24	牛心朴子 <i>C. komarovii</i>	0.01	0.00				乳浆大戟 <i>E. esula</i>	0.01	0.00
25	克氏针茅 <i>S. krylovii</i>	0.00	0.00				蒺藜 <i>T. terrestris</i>	0.00	0.00
26	星毛委陵菜 <i>P. acaulis</i>	0.00	0.00				角蒿 <i>I. sinensis</i>	0.00	0.00
27	地稍瓜 <i>C. thesiodes</i>	0.00	0.00				灰绿藜 <i>C. glaucum</i>	0.00	0.00

3 结论与讨论

(1) 本研究运用幂乘方法则数理统计模型,通过计算各植物种的空间异质性指数值能够定量地判明草地群落整体的异质性程度,且野外调查法省时省力,再结合幂乘方法则进行统计解析,计算简便而精确。由图 2 不仅可以看出群落整体的空间分布规律,而且每种植物的空间异质性程度也可以很直观的显现出来,由此体现了该方法的精确性。通过对物种出现频率与空间分布异质性关系的研究,对以后进一步推测群落的盖度、生物量与空间异质性的关系奠定了基础^[23]。这样将会从根本上克服传统的刈割法测定生物量对草地造成的严重破坏。

(2) 这 3 种类型的草地其 L-样方内的平均生物量和物种多样性指数均随着群落整体空间异质性指数的增大而增大。表明鄂尔多斯伊金霍洛旗自 2000 年开始在全旗范围内对草地实行禁牧封育,到 2010 年经过 10a 的封育,各种类型的草地都得到了一定程度的恢复。

(3) 这 3 种类型的草地群落结构特征出现差异的原因主要是各样地所处位置、群落类型及微生境的不同。羊草草地的生物量较高主要是该草地水分含量相对较大,所以草地的植被总体长势很好;建群种羊草是根茎型植物,呈斑块状分布,从演替理论上分析靠根茎型繁殖的物种其种间竞争能力较强,最终使得该草地的

空间异质性程度较高;从物种组成上分析草原退化的生态指示种苔草(寸草苔)、车前出现频率极低,说明在无外界干扰的情况下,羊草草地实现了顺行恢复演替。而芨芨草草地的物种多样性指数和空间异质性指数都是最低的,原因可能是芨芨草草地土壤有一定程度的盐碱化,并不适合大多数植物生长,只有耐盐碱的植物生长良好。油蒿灌丛草地空间异质性程度是最大的,主要是因为该草地的优势种油蒿为半灌木,抗旱性强,其枝条能生出大量的不定根,伸到土壤深处,在水分极少的环境中依然可以生存,且油蒿群落有明显的排它性,能很快侵入其它群落而广泛分布,在沙地的自然演替过程中是相当稳定的植被^[37]。

(4)上述3种草地在长时间的禁牧下群落结构也发生了很大变化。据当地草场资料所述由于过度放牧,耐旱耐牧的杂类草在草场中占很大比例,结构复杂的群落变得简单化,草群低矮、植被稀疏。其中对牲畜有毒的牛心朴子、沙旋复花(*Inula salsoloides*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、小花棘豆(*Oxytropis glabra*)等到处可见,1年生的猪毛菜、雾冰藜、狗尾草等也普遍出现在各种群落中;然而实施围栏封育后,猪毛菜等1年生植物以及牛心朴子等有毒有害植物大幅度减少,适口性好的、营养价值高的禾本科和豆科等优良牧草成为主要建群种。从物种演替角度分析,经过围栏封育后上述3种草地中优良牧草羊草的优势地位增加,这与单贵莲等^[38]的研究结果一致;猪毛菜等1年生植物所占比例很小,说明1年生植物在恢复演替过程中会减少,这与Alder和Lauenroth等^[39]以及闫玉春等^[40]的研究结果一致,即:自由放牧样地中1年生植物具有较大的比重,而围封样地中1年生植物猪毛菜等所占比例很小。糙隐子草在上述3种草地中出现频率都极低,在典型草原植物群落退化演替序列上,糙隐子草是中度退化和重度退化时期的优势种或主要伴生种^[41],这与左万庆^[42]等对封育情况下植物群落特征的研究结果一致。综合以上分析,说明禁牧10a后这3种草地均得到了很好的恢复。

References:

- [1] Chen Y F, Dong M. Spatial heterogeneity in ecological systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 346-352.
- [2] Wu Y N, Zhang F J, Shiyomi M, Hu G W. Analysis of species heterogeneity in the Hulunbeier Steppe with different grazing intensities by a power-law model. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(3): 689-696.
- [3] Stowe L G, Wade M J. The detection of small scale patterns in vegetation. *The Journal of Ecology*, 1979, 67(3): 1047-1064.
- [4] Chen Y F, Yu F H, Dong M. Spatial heterogeneity of the psammophytic half shrub community in Mu Us sandland. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 568-572.
- [5] Bai Y F, Xu Z X, Li D X. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture, carbon and nitrogen in *Stipa* communities of the Inner Mongolia plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1210-1216.
- [6] Xiong X G, Han X G. Dynamics of the small-scale heterogeneity of the soil carbon and nitrogen resources associated with *Caragana microphylla* in Inner Mongolia degraded steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 483-488.
- [7] Liu Z G, Li Z Q. Fine-scale spatial pattern of *Artemisia frigida* population under different grazing intensities. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 227-234.
- [8] Liang S C, Zhang S M, Yu F H, Dong M. Small-scale spatial cross-correlation between ramet population variables of *potentilla reptans* var. *sericophylla* and soil available phosphorus. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(4): 613-618.
- [9] Liu Z G, Li Z Q, Fu L K, Fu L K, Dong M. Small-scale spatial pattern of *potentilla acaulis* population under different grazing intensities. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, 12(3): 308-312.
- [10] He X D, Gao Y B, Zhao W Z, Cong Z L. Geostatistics analyzing to cause of formation of circle distribution of plant communities in Horqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1512-1516.
- [11] Hu X, Wang H T, Lu J G, Cong P F, He X D, Gao B Y, Dong Z B. Response of *Artemisia ordosica* population to spatial heterogeneity of soil in arid and semi-arid regions. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 588-592.
- [12] Jiang D M, Li M, Toshio Oshida, Tang Y. Effects of enclosure on vegetation characteristics and spatial heterogeneity of *Caragana microphylla* community in Horqin sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2159-2164.
- [13] Zu Y G, Ma K P, Zhang X J. A fractal method for analysing spatial heterogeneity of vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(3): 333-336.
- [14] Xin X P, Li X L, Yang G X, Xu B. Spatial heterogeneity of grassland pattern under grazing and forage condition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 449-453.

- [15] Wang P C, Zhao L L, Song G X, Zhang J H, Zhang L. Study on fractal properties of the spatial pattern of *Sophora davidii* population in Karst Region. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(21): 12803-12804, 12808-12808.
- [16] Taylor L R. Aggregation, variance and the mean. *Nature*, 1991, 24(4766): 234-240.
- [17] Shiyomi M, Yasuda T, Chen J. Methods of grazing grassland vegetation survey. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(2): 150-158.
- [18] Shiyomi M, Takahashi S, Yoshimura T, Yoshimura J, Yasuda T, Tsutsumi M, Tsuiki M, Hori Y. Spatial heterogeneity in a grassland community: use of power law. *Ecological Research*, 2001, 16(3): 487-495.
- [19] Chen J, Shiyomi M, Yamamura Y, Hori Y. Distribution model and spatial variation of cover in grassland vegetation. *Grassland Science*, 2006, 52(4): 167-173.
- [20] Chen J, Okumura K, Takada H. Estimation of clover biomass and percentage in a performance trial of white clover-timothy binary mixtures: use of multiple regression equations incorporating plant cover measured with the grid-point plate. *Grassland Science*, 2010, 56(3): 127-133.
- [21] Chen J, Shiyomi M, Hori Y, Yamamura Y. Frequency distribution models for spatial patterns of vegetation abundance. *Ecological Modelling*, 2008, 211(3/4): 403-410.
- [22] Shiyomi M, Yasuda T. New vegetation survey method of grassland (1). Vegetation survey using beta binomial distribution. *Animal Husbandry*, 2003, 57(1): 171-175.
- [23] Lü J, Chen J. Characteristics of community structure in Ergun meadow steppe under different utilization types-use of Power Law. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(3): 388-394.
- [24] Jia Y L. Grassland degradation reasons and establishment of grassland protection long-term mechanism. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(2): 1-6.
- [25] Zhang S Q, Yan W G. Problems of grassland ecosystems and their countermeasures in western China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(5): 1-18.
- [26] Ma Y F, Wang W M, Jia B Q. Spatial variability analysis on soil nutrients in semi-arid agro-pastoral transition area—a case study in EjinHolo Banner, Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(11): 124-130.
- [27] Li Q S, Zhang C, Wang F, Lai L M, Zhang L, Bai H, Zheng Y R. Responses of spatial distribution pattern of *Artemisia ordosica* population to the precipitation gradient on Ordos Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2105-2110.
- [28] Song M H, Chen Y F, Dong M. Clonal plants along the sandy hill-slope in ordos plateau and relation of their importance to plant species diversity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 396-402.
- [29] Cheng X L, An S Q, Chen X L, Li G Q, Liu S R. The correlation between the desertification of grassland and the change of vegetation biomass in Erduosi. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(2): 13-20.
- [30] Chen Y F, Song M H, Dong M. Spatial pattern of the plant community along a sand-covered hillslope in ordos plateau of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(4): 501-505.
- [31] Chang Q, Sun J P. Analysis on ecological environment in Yi Jin Huo Le Banner. *Inner Mongolia Environmental Protection*, 2003, 15(3): 33-36.
- [32] Chen J, Hori Y, Shiyomi M, Yamamura Y, Yasuda T, Takada H, Iki M. Community structure of a semi-natural grassland and an abandoned, forested grassland. *Japanese Journal of Grassland Science*, 2008, 51(2): 143-151.
- [33] Song Z Y, Huang D M, Shiyomi M, Wang Y S, Takahashi S, Hori Y, Yamamura Y, Chen J. Spatial heterogeneity and variability of a large-scale vegetation community using a power-law model. *Tsinghua Science and Technology*, 2005, 10(4): 469-477.
- [34] Chen J, Huang D M, Shiyomi M, Hori Y, Yamamura Y, Yiruhan. Spatial heterogeneity and diversity of vegetation at the landscape level in Inner Mongolia, China, with special reference to water resources. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 82(4): 222-232.
- [35] Yasuda T, Shiyomi M, Takahashi S. Differences in spatial heterogeneity at the species and community levels in semi-natural grasslands under different grazing intensities. *Grassland Science*, 2003, 49(2): 101-108.
- [36] Tsuiki M, Wang Y S, Yiruhan, Tsutsumi M, Shiyomi M. Analysis of grassland vegetation of the southwest Heilongjiang steppe (China) using the power law. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(8): 917-926.
- [37] Jin H J, Wang J H, Li Y, Ma Q L, Zhang D K, Liu Y J. Summary of *Artemisia ordosica* ecology studies. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(4): 62-66, 72-72.
- [38] Shan G L, Xu Z, Ning F. The changes of community structure and species diversity in different succession stage in typical steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(2): 163-169.
- [39] Alder P B, Lauenroth W K. Livestock exclusion increases the spatial heterogeneity of vegetation in Colorado shortgrass steppe. *Applied Vegetation Science*, 2000, 3(2): 213-222.
- [40] Yan Y C, Tang H P. Effects of exclosure on typical steppe community properties in Inner Mongolia. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(6): 1225-1232.

- [41] Liu Z L, Wang W, Hao D Y, Liang C Z. Probes on the degeneration and recovery succession mechanisms of Inner Mongolia steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(1): 84-90.
- [42] Zuo W Q, Wang Y H, Wang F Y, Shi G X. Effects of enclosure on the community characteristics of *Leymus chinensis* in degenerated steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(3): 12-19.

参考文献:

- [1] 陈玉福, 董鸣. 生态学系统的空间异质性. *生态学报*, 2003, 23(2): 346-352.
- [2] 乌云娜, 张凤杰, 盐见正卫, 胡高娃. 基于幂函数法则对放牧梯度上种群空间异质性的定量分析. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 689-696.
- [4] 陈玉福, 于飞海, 董鸣. 毛乌素沙地沙生半灌木群落的空间异质性. *生态学报*, 2000, 20(4): 568-572.
- [5] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. *生态学报*, 2002, 22(8): 1210-1216.
- [6] 熊小刚, 韩兴国. 内蒙古退化草原中与小叶锦鸡儿相关的小尺度土壤碳、氮资源异质性动态. *生态学报*, 2006, 26(2): 483-488.
- [7] 刘振国, 李镇清. 不同放牧强度下冷蒿种群小尺度空间格局. *生态学报*, 2004, 24(2): 227-234.
- [8] 梁士楚, 张淑敏, 于飞海, 董鸣. 绢毛匍匐委陵菜与土壤有效磷的小尺度空间相关分析. *植物生态学报*, 2007, 31(4): 613-618.
- [9] 刘振国, 李镇清, 富兰克, 董鸣. 不同放牧强度下星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*) 种群小尺度空间格局. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(3): 308-312.
- [10] 何兴东, 高玉葆, 赵文智, 丛自立. 科尔沁沙地植物群落圆环状分布成因地统计学分析. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1512-1516.
- [11] 胡旭, 王海涛, 卢建国, 丛培芳, 何兴东, 高玉葆, 董治宝. 干旱和半干旱区油蒿对土壤空间异质性的响应. *中国沙漠*, 2007, 27(4): 588-592.
- [12] 蒋德明, 李明, 押田敏雄, 唐毅. 封育对科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落植被特征及空间异质性的影响. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2159-2164.
- [13] 祖元刚, 马克平, 张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法. *生态学报*, 1997, 17(3): 333-336.
- [14] 辛晓平, 李向林, 杨桂霞, 徐斌. 放牧和刘割条件下草山草坡群落空间异质性分析. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 449-453.
- [15] 王普昶, 赵丽丽, 宋高翔, 张锦华, 张莉. 岩溶山区白刺花种群格局的分形特征分析. *安徽农业科学*, 2011, 39(21): 12803-12804.
- [17] 盐见正卫, 安田泰辅, 陈俊. 关于放牧草地植被的调查方法. *草地学报*, 2005, 13(2): 150-158.
- [23] 吕杰, 陈俊. 不同利用方式下额尔古纳草原群落结构特征的研究-幂乘法法则的应用. *草地学报*, 2011, 19(3): 388-394.
- [24] 贾幼陵. 草原退化原因分析和草原保护长效机制的建立. *中国草地学报*, 2011, 33(2): 1-6.
- [25] 张苏琼, 阎万贵. 中国西部草原生态环境问题及其控制措施. *草业学报*, 2006, 15(5): 11-18.
- [26] 马玉峰, 王文明, 贾宝全. 半干旱农牧交错区土壤养分空间变异特征分析——以内蒙古伊金霍洛旗为例. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11): 124-130.
- [27] 李秋爽, 张超, 王飞, 来利明, 张莉, 李文婷, 白桦, 郑元润. 鄂尔多斯高原油蒿种群分布格局对降水梯度的反应. *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2105-2110.
- [28] 宋明华, 陈玉福, 董鸣. 鄂尔多斯高原风蚀沙化梁地克隆植物的分布及其与物种多样性的关系. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 396-402.
- [29] 程晓莉, 安树青, 陈兴龙, 李国旗, 刘世荣. 鄂尔多斯草地荒漠化过程与植被生物量变迁的关系. *林业科学*, 2001, 37(2): 13-20.
- [30] 陈玉福, 宋明华, 董鸣. 鄂尔多斯高原覆沙坡地植物群落格局. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 501-505.
- [31] 常青, 孙静萍. 伊金霍洛旗生态环境分析. *内蒙古环境保护*, 2003, 15(3): 33-36.
- [37] 靳虎甲, 王继和, 李毅, 马全林, 张德魁, 刘有军. 油蒿生态学研究综述. *西北林学院学报*, 2009, 24(4): 62-66, 72-72.
- [38] 单贵莲, 徐柱, 宁发. 典型草原不同演替阶段群落结构与物种多样性变化. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(2): 163-169.
- [40] 闫玉春, 唐海萍. 围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响. *西北植物学报*, 2007, 27(6): 1225-1232.
- [41] 刘钟龄, 王伟, 郝敦元, 梁存柱. 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(1): 84-90.
- [42] 左万庆, 王玉辉, 王凤玉, 师广旭. 围栏封育措施对退化羊草草原植物群落特征影响研究. *草业学报*, 2009, 18(3): 12-19.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leafhopper *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

- Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
- Combined effects of elevated O₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
- Resource and Industrial Ecology**
- The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
- Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
- Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
- Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
- Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study DAI Yanan, HE Xinguang (595)
- The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
- Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
- Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
- Effects of CA and EDTA on growth of *Chlorophytum comosum* in copper-contaminated soil WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
- Research Notes**
- Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
- Variations of *Leymus chinensis* community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
- The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in *Larix olgensis* Henry. seedlings WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元