

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190284

## 科尔沁沙地植物群落物种多样性及其主要影响因素

陈晨<sup>1</sup> 王寅<sup>1</sup> 王健铭<sup>1</sup> 杨欢<sup>1</sup> 王雨辰<sup>1</sup> 徐超<sup>1</sup> 李景文<sup>1</sup> 褚建民<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:**【目的】科尔沁沙地地处我国北方农牧交错带, 其植物多样性组成与格局对人为干扰及其导致的环境因子变化极其敏感。近年来, 科尔沁地区农牧业发展迅速, 人为干扰对自然植被的影响不断加大, 但是探讨放牧干扰与环境因子对植物群落不同水平物种多样性相对影响的研究还比较缺乏。【方法】本研究基于 44 个调查点, 放牧干扰数据以及环境数据, 通过单因素方差分析、一元线性回归、多项式回归和方差分解等方法, 分析科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性分布特征及其主要影响因素。【结果】(1) 群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性均随放牧强度的增加而逐渐下降, 不同放牧强度之间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 重度放牧下群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性均显著低于围封区 ( $P < 0.05$ ), 在围封区达到最高。(2) 群落  $\alpha$  多样性与放牧强度和最热月均温呈极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ), 与气温日较差、土壤有机碳和土壤全磷含量呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 随年均降水量的增加而呈显著的先减后增的变化趋势 ( $P < 0.05$ ), 并随着最冷月均温和土壤全氮含量的增加呈显著的先增后减的变化趋势 ( $P < 0.05$ )。群落  $\beta$  多样性与放牧强度、潜在蒸散量和最冷月均温呈显著的负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 并与年均降水量呈显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ )。群落  $\gamma$  多样性与放牧强度呈极显著的负相关关系 ( $P < 0.001$ ), 与土壤有机碳和土壤全氮含量呈极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ )。(3) 放牧干扰是群落  $\alpha$  和  $\beta$  多样性的主要影响因素, 放牧干扰与土壤因子的协同作用是群落  $\gamma$  多样性的主要影响因素。【结论】放牧干扰对科尔沁沙地植物群落不同水平物种多样性起着关键作用。因此需要制定科学的放牧管理制度、加强监管力度, 对严重退化的区域实行围封禁牧, 在降低放牧强度的同时打击偷牧行为, 能够有效促进科尔沁沙地植物多样性保护和退化生态系统自然恢复。

**关键词:** 科尔沁沙地;  $\alpha$  多样性;  $\beta$  多样性;  $\gamma$  多样性; 放牧干扰; 环境因子

**中图分类号:** S718.54; Q948.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2020)05-0106-09

**引文格式:** 陈晨, 王寅, 王健铭, 等. 科尔沁沙地植物群落物种多样性及其主要影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 106-114. Chen Chen, Wang Yin, Wang Jianming, et al. Species diversity of plant communities and its main influencing factors in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(5): 106-114.

### Species diversity of plant communities and its main influencing factors in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia of northern China

Chen Chen<sup>1</sup> Wang Yin<sup>1</sup> Wang Jianming<sup>1</sup> Yang Huan<sup>1</sup> Wang Yuchen<sup>1</sup>  
Xu Chao<sup>1</sup> Li Jingwen<sup>1</sup> Chu Jianmin<sup>2</sup>

(1. School of Ecology and Nature Reserves, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Forestry Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] The Horqin Sandy Land is located in agro-pastoral ecotone of northern China, and its species composition and diversity patterns are quite vulnerable to the changes of human disturbance and environmental factors. Because of the fast development of agriculture and animal husbandry industry in recent years, human disturbance has become an essential role in the Horqin Sandy Land. However, further

收稿日期: 2019-07-11 修回日期: 2019-09-03

基金项目: 科技部科技基础资源调查专项(2017FY100205)。

第一作者: 陈晨。主要研究方向: 生物多样性与恢复生态。Email: 2056491628@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护学院。

责任作者: 李景文, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 生物多样性与恢复生态。Email: lijingwen@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

systematic studies are needed to understand the relative influence of grazing disturbance and environmental factors on the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity of plant communities in the Horqin Sandy Land. [Method] The grazing disturbance data and environmental data of 44 sampling points were used to study the distribution characteristics of the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity of plant communities and their main influencing factors in the Horqin Sandy Land by one-way ANOVA, simple linear regression analysis, polynomial regression analysis, and variance decomposition. [Result] (1) The  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity of plant communities declined as grazing intensity increased, and the peak species diversity appeared under grazing exclusion. There was a significant difference in the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity of plant communities among different grazing intensities ( $P < 0.05$ ). The  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity under heavy grazing intensity were significantly lower than that under grazing exclusion ( $P < 0.05$ ). (2) The  $\alpha$  diversity of plant communities had a significantly negative correlation with grazing intensity and mean temperature of the hottest month ( $P < 0.01$ ), and a positive correlation with mean diurnal range, soil organic carbon and soil total phosphorus ( $P < 0.01$ ); it had a significant U-shaped relationship with mean annual precipitation, and a hump-shaped relationship with mean temperature of the coldest month and soil total nitrogen ( $P < 0.05$ ). The  $\beta$  diversity of plant communities had a significantly negative correlation with grazing intensity, potential evapotranspiration, and mean temperature of the coldest month ( $P < 0.05$ ), and a positive correlation with mean annual precipitation ( $P < 0.05$ ). The  $\gamma$  diversity of plant communities had a significantly negative correlation with grazing intensity ( $P < 0.001$ ), and a positive correlation with soil organic carbon and soil total nitrogen ( $P < 0.01$ ). (3) Grazing disturbance was the main influencing factor affecting the  $\alpha$  and  $\beta$  diversity of plant communities; the synergism between grazing disturbance and soil factors was the main influencing factor affecting the  $\gamma$  diversity of plant communities. [Conclusion] Grazing disturbance has a critical effect on species diversity of plant communities in the Horqin Sandy Land. Therefore, in order to enhance biodiversity conservation and restore the degraded ecosystem in the Horqin Sandy Land, local government should formulate policies to forbid overgrazing and enhance supervision to reduce the occurrence of grazing without permission.

**Key words:** Horqin Sandy Land;  $\alpha$  diversity;  $\beta$  diversity;  $\gamma$  diversity; grazing disturbance; environmental factor

近年来,人类活动和气候变化对生物多样性和生态系统功能影响的相关研究备受关注<sup>[1]</sup>。科尔沁沙地是我国北方农牧交错带的典型区域,受气候变化和半农半牧的生产方式影响,生态环境极为敏感脆弱<sup>[2]</sup>。因此研究放牧干扰下科尔沁沙地植物群落物种多样性的变化特点,对当地生物多样性保护和退化生态系统的恢复具有重要意义<sup>[3]</sup>。由于放牧干扰对植物物种多样性的影响具有尺度效应<sup>[4-5]</sup>,因此可以通过 $\alpha$ 、 $\beta$ 与 $\gamma$ 多样性来表征该影响。同时,由于不同的研究目标的需要,可将研究尺度缩小至公顷水平来分析植物 $\gamma$ 多样性的变化特点<sup>[6]</sup>。关于放牧干扰如何影响植物多样性,以往的研究主要侧重于 $\alpha$ 多样性的变化特点,关于植物 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性对放牧干扰响应方式的研究仍旧比较缺乏,因此探究植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的特点,能够完善放牧干扰对群落物种多样性影响的认识。

目前的研究在植物群落多样性如何响应放牧干扰的问题上存在着不同的观点。有研究指出放牧干扰的增加能提高植物群落物种多样性<sup>[7]</sup>。研究表明

群落多样性随干扰强度的增加而表现出衰退的趋势,禁牧封育能在一定程度上保护物种多样性<sup>[8]</sup>。同时一些研究支持中度干扰假说,认为适度的放牧干扰有利于维持较高的物种多样性水平,在中度干扰处物种多样性最高<sup>[9]</sup>。

迄今为止,学者们针对科尔沁沙地植物群落物种组成及多样性特征已经开展了大量研究。张继义等<sup>[10]</sup>、李玉霖等<sup>[11]</sup>的研究指出,植被恢复演替过程中,植物群落的种类组成、物种多样性水平、群落结构、群落的稳定性等方面发生了一系列积极的变化。赵丽娅等<sup>[12]</sup>通过比较围封和放牧条件下植物群落物种丰富度的变化,指出了围封对提高物种丰富度的积极作用。吕朋等<sup>[13]</sup>的研究则发现不同放牧强度下沙质草地物种丰富度和多样性不存在显著的差异。关于科尔沁沙地植物群落物种多样性目前已积累了大量卓有成效的研究,但是结合放牧干扰和环境因子作用,分析科尔沁植物群落不同水平物种多样性分布特征及其主要影响因素的同步研究还比较缺乏。本研究重点调查沙地植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性

及其影响因素,以期阐明该区域植物物种多样性分布特征及其主要影响因素,为进一步研究科尔沁沙地生物多样性保护、退化生态系统恢复提供依据。

## 1 研究区概况

科尔沁沙地(42°41'~45°15'N、118°35'~123°30'E)位于内蒙古自治区的东南部,海拔范围在180~650 m之间,地势西高东低,位于半湿润、半干旱气候区的过渡带,属于大陆性气候<sup>[14]</sup>。年均降水量在299~460 mm之间,年均气温为-0.26~7.36℃。降水主要集中在7、8月,其中以7月最高。科尔沁沙地植被覆盖较低,生境退化,属于较为干旱的沙地生态系统。其原生植被为天然榆树(*Ulmus* spp.)疏林草原,但由于过度的人为干扰绝大部分已退化<sup>[15]</sup>。优势植物有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、盐蒿(*Artemisia halodendron*)、黄柳(*Salix gordejvii*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等<sup>[2]</sup>。科尔沁地区在历史上曾一度以牧业生产为主,近百年来农业种植开始在该地区兴起并不断发展,逐渐形成如今农牧业并重的局面<sup>[16]</sup>。该地区的农牧活动以种植经济作物和饲料作物、蓄养黄牛和绵羊为主<sup>[17]</sup>,种植业和畜牧业的发展扩大在一定程度上挤压了自然植被的生存空间,家畜放牧特别是过度放牧对当地植被的破坏作用影响深远<sup>[18]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 调查点布设与调查

本研究基于“中国荒漠主要植物群落调查—内蒙古中东部半干旱荒漠主要植物群落调查—科尔沁沙地调查项目”规定的调查区域和样点,于2018年7至9月对科尔沁沙地进行生态本底调查。在科尔沁沙地自西向东设置44个调查点(100 m×100 m),使调查路线尽可能涵盖科尔沁沙地主要的典型植物群落,放牧干扰程度,气候特点等<sup>[19-20]</sup>。

本研究根据方精云等<sup>[21]</sup>提出的技术规范进行群落调查。在每个调查点,布设1个乔木样方(100 m×100 m),记录乔木样方中胸径3 cm以上的乔木植物的种类、密度、胸径、高度和冠幅;在乔木样方内的对角线上布设3个灌木样方(10 m×10 m),记录灌木样方中所有灌木植物的种类、密度、平均高度和盖度,并记录其地理坐标和海拔高度。在每个灌木样方内的对角线上布设3个草本样方(1 m×1 m),记录草本样方中所有草本植物的种类、密度、平均高度和盖度。

### 2.2 气候数据

本研究选择年均潜在蒸散量(potential

evapotranspiration, mm)、年均降水量(mean annual precipitation, mm)、年均温度(mean annual temperature, ℃)、年均最热月均温(mean temperature of the warmest month, ℃)、年均最冷月均温(mean temperature of the coldest month, ℃)、气温日较差(mean diurnal range, ℃)表征主要的气候要素。有研究指出,以上指标可能与植物物种多样性存在较为密切的关系<sup>[22-23]</sup>,能有效地解释物种多样性分布特点。在全球气候数据网站(<http://www.worldclim.org/>)中通过10 m×10 m样方的经纬度获得年均降水量,年均温度,最冷月和最热月均温,气温日较差等数据(分辨率1 km×1 km)。在气候数据库(<http://www.cgiarcsi.org/>)中通过经纬度得到潜在蒸散量数据(分辨率1 km×1 km)。

### 2.3 土壤和放牧干扰数据

在每个10 m×10 m样方内,用土钻随机钻取0~20 cm土层获取3份土壤样品并将3份土壤样品混合成1份。把所有土壤样品带回实验室自然风干,过2 mm土壤筛。分别用重铬酸钾法测定土壤有机碳,凯氏定氮法测定土壤全氮,钼锑抗比色法测定土壤全磷。利用pH计测量土壤pH。

放牧干扰情况以入户调查的形式向科尔沁当地牧民获得。根据载畜量来确定调查点的放牧干扰强度,并分为3个等级:围封(1996年之前属于放牧用地并在此后实行禁牧),中度放牧(围封放牧用地,在每年7月初和冬季等部分时间内允许放牧,每公顷的载畜量约为1头牛),重度放牧(自由放牧用地,每公顷载畜量约为2头牛和6头羊)<sup>[13]</sup>。

### 2.4 统计与数据分析方法

首先对科尔沁沙地植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性数据进行正态分布检验,结果显示群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性均为正态分布。采用单因素方差分析对不同放牧强度下群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性进行差异显著性检验,分析群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性在干扰梯度下的变化。利用一元线性回归或多项式回归探讨放牧干扰、环境因子与植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的关系,以赤池信息准则(AIC)为依据<sup>[24]</sup>确定线性回归模型的适合度。根据双终止原则,通过前向选择得到显著的干扰和环境因子。最后将通过前向选择得到的因子进行方差分解来分析放牧干扰和环境因子对植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性影响的相对重要性,并检验放牧干扰和环境因子单独作用的显著性。方差分解的方法参考Borcard等<sup>[25]</sup>。

群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的计算方法如下<sup>[26]</sup>:

$$(1) \alpha = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 k_i, \text{ 式中: } k_i \text{ 表示第 } i \text{ 个 } 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \text{ 样方内的物种数之和。}$$



(2)  $\gamma$  = 调查点记录的物种数之和。

(3)  $\beta = \gamma - \alpha$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 科尔沁沙地植被类型及其组成特征

本次调查共记录植物 79 种, 分属 27 科 68 属, 其中菊科(Compositae)与禾本科(Gramineae)植物(15 种)最多, 其次为豆科(Leguminosae)(9 种)和藜科(Chenopodiaceae)(7 种), 以上 4 科植物占全部植物种的 58.23%, 是科尔沁沙地的主要优势科。沙地

植物中, 小叶锦鸡儿的分布频率最高, 其次为狗尾草、地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)、兴安虫实(*Corispermum chinganicum*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、盐蒿、蒺藜(*Tribulus terrester*)等(表 1)。植物生活型以草本(63 种)和灌木(15 种)为主。沙地优势群落有大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、小叶锦鸡儿、盐蒿、东北木蓼(*Atraphaxis manshurica*)、黄柳、山竹岩黄耆(*Hedysarum fruticosum*)、狗尾草、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)群落等。

表 1 科尔沁沙地植物物种组成 (分布频率 > 15%)

Tab. 1 Plant species composition in the Horqin Sandy Land (distribution frequency > 15%)

种名 Species name	科 Family	属 Genus	生活型 Life form	分布频率 Distribution frequency/%
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	豆科 Leguminosae	锦鸡儿属 <i>Caragana</i>	灌木 Shrub	62
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科 Gramineae	狗尾草属 <i>Setaria</i>	一年生草本 Annual herb	61
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	萝藦科 Asclepiadaceae	鹅绒藤属 <i>Cynanchum</i>	半灌木 Subshrub	58
兴安虫实 <i>Corispermum chinganicum</i>	藜科 Chenopodiaceae	虫实属 <i>Corispermum</i>	一年生草本 Annual herb	51
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	豆科 Leguminosae	胡枝子属 <i>Lespedeza</i>	小灌木 Dwarf shrub	49
盐蒿 <i>Artemisia halodendron</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	小灌木 Dwarf shrub	42
蒺藜 <i>Tribulus terrester</i>	蒺藜科 Zygophyllaceae	蒺藜属 <i>Tribulus</i>	一年生草本 Annual herb	37
止血马唐 <i>Digitaria ischaemum</i>	禾本科 Gramineae	马唐属 <i>Digitaria</i>	一年生草本 Annual herb	30
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	藜科 Chenopodiaceae	雾冰藜属 <i>Bassia</i>	一年生草本 Annual herb	30
尖头叶藜 <i>Chenopodium acuminatum</i>	藜科 Chenopodiaceae	藜属 <i>Chenopodium</i>	一年生草本 Annual herb	26
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	藜科 Chenopodiaceae	猪毛菜属 <i>Salsola</i>	一年生草本 Annual herb	26
山竹岩黄耆 <i>Hedysarum fruticosum</i>	豆科 Leguminosae	岩黄耆属 <i>Hedysarum</i>	半灌木或小半灌木 Subshrub or small subshrub	22
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	藜科 Chenopodiaceae	沙蓬属 <i>Agriophyllum</i>	一年生草本 Annual herb	20
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	禾本科 Gramineae	虎尾草属 <i>Chloris</i>	一年生草本 Annual herb	19
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	禾本科 Gramineae	画眉草属 <i>Eragrostis</i>	一年生草本 Annual herb	19
大果榆 <i>Ulmus macrocarpa</i>	榆科 Ulmaceae	榆属 <i>Ulmus</i>	乔木 Tree	18
光梗蒺藜草 <i>Cenchrus calyculatus</i>	禾本科 Gramineae	蒺藜草属 <i>Cenchrus</i>	一年生草本 Annual herb	17
黑沙蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	菊科 Compositae	蒿属 <i>Artemisia</i>	小灌木 Dwarf shrub	17
地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	大戟科 Euphorbiaceae	大戟属 <i>Euphorbia</i>	一年生草本 Annual herb	16

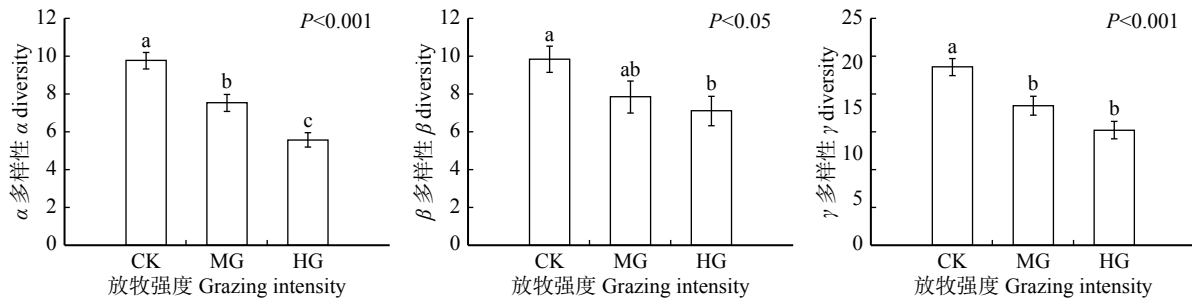
#### 3.2 植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性对放牧干扰的响应

单因素方差分析表明(图 1), 植物群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性随着放牧强度的增加表现出逐步下降的趋势, 最大值出现在围封条件下。群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性在不同放牧强度之间均存在显著的差异( $P < 0.05$ )。重度

放牧下群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性均显著低于围封区( $P < 0.05$ )。

#### 3.3 植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性与放牧干扰和环境因子的关系

一元线性回归或多项式回归分析结果表明



CK 为围封; MG 为中度放牧; HG 为重度放牧。CK stands for grazing exclusion; MG stands for moderate grazing; HG stands for heavy grazing.

图1 科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性对放牧干扰的响应

Fig. 1 Responses of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity to grazing disturbance in the Horqin Sandy Land

表2 放牧干扰、环境因子与科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis among grazing disturbance, environmental factors, and  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  diversity of plant communities in the Horqin Sandy Land

项目 Item	$\alpha$ 多样性 $\alpha$ diversity	$\beta$ 多样性 $\beta$ diversity	$\gamma$ 多样性 $\gamma$ diversity
GI	0.532 3(-)***	0.109 7(-)*	0.352 8(-)***
MAP	0.143 3(US)*	0.107 9(+)*	
PET		0.100 1(-)*	
MAT			
MTWM	0.192 0(-)**		
MTCM	0.126 3(HS)*	0.108 1(-)*	
MDR	0.163 3(+)**		
SOC	0.239 4(+)**		0.173 4(+)**
STN	0.348 5(HS)***		0.221 5(+)**
STP	0.187 9(+)**		
pH			

注:\*\*\*  $P < 0.001$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ ; 空白代表无显著的相关性; -表示负相关关系; +表示正相关关系; HS代表先增后减的二次曲线关系; US代表先减后增的二次曲线关系。GI为放牧强度; MAP为年均降水量; PET为潜在蒸散量; MAT为年均温度; MTWM为最热月均温; MTCM为最冷月均温; MDR为气温日较差; SOC为土壤有机碳; STN为土壤全氮; STP为土壤全磷。Notes: \*\*\* means  $P < 0.001$ ; \*\* means  $P < 0.01$ ; \* means  $P < 0.05$ . The blank means no significant correlation. - stands for a negative correlation; + stands for a positive correlation; HS stands for a hump-shaped relationship of increasing first and then decreasing; US stands for a U-shaped relationship of decreasing first and then increasing. GI, grazing intensity; MAP, mean annual precipitation; PET, potential evapotranspiration; MAT, mean annual temperature; MTWM, mean temperature of the warmest month; MTCM, mean temperature of the coldest month; MDR, mean diurnal range; SOC, soil organic carbon; STN, soil total nitrogen; STP, soil total phosphorus.

(表2), 科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 多样性与放牧强度和最热月均温呈极显著的负相关关系( $P < 0.01$ ), 与气温日较差、土壤有机碳和土壤全磷含量呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ ), 随着年均降水量的增加而呈显著的先减后增的变化趋势( $P < 0.05$ ), 并随着最冷月均温和土壤全氮含量的增加呈显著的先增后减的变化趋势( $P < 0.05$ )。群落  $\beta$ 多样性与放牧强度、潜在蒸散量和最冷月均温呈显著的负相关关系( $P <$

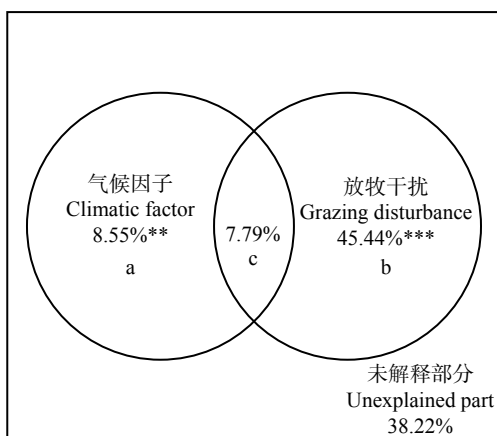
0.05), 并与年均降水量呈显著的正相关关系( $P < 0.05$ )。群落  $\gamma$ 多样性与放牧强度呈极显著的负相关关系( $P < 0.001$ ), 与土壤有机碳和全氮含量呈极显著的正相关关系( $P < 0.01$ )。

### 3.4 放牧干扰和环境因子对植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的相对作用

将前向选择得到的显著因子放牧强度和气温日较差归为放牧干扰和气候因子两组变量, 采用方差分解的方法分析以上两组变量对群落  $\alpha$ 多样性的解释率。由图2可以得出, 放牧干扰、气候因子共同解释了科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 多样性 61.78%的变异。其中放牧干扰的单独解释率达到 45.44% 占整个模型解释率的 73.55%, 气候因子的单独解释率为 8.55%, 两组变量的共同解释率为 7.79%, 表明放牧干扰是群落  $\alpha$ 多样性的主要影响因素。

将前向选择得到的显著因子放牧干扰和最冷月均温归为放牧干扰和气候因子两组变量, 采用方差分解的方法分析以上两组变量对群落  $\beta$ 多样性的解释率。结果表明(图3), 放牧干扰和气候因子共同解释了科尔沁沙地植物群落  $\beta$ 多样性 28.67%的变异, 其中放牧干扰的单独解释率为 17.86%, 气候因子的单独解释率为 17.70%, 可见放牧干扰的单独解释率稍高于气候因子, 说明放牧干扰是群落  $\beta$ 多样性的主要影响因素, 此外气候因子对  $\beta$ 多样性的影响也不容忽视。

将前向选择得到的显著因子放牧强度、土壤全氮和土壤全磷归为放牧干扰和土壤因子两组变量, 采用方差分解的方法分析以上两组变量对群落  $\gamma$ 多样性的解释率。结果显示(图4), 放牧干扰和土壤因子共同解释了科尔沁沙地植物群落  $\gamma$ 多样性 45.21%的变异, 其中放牧干扰的单独解释率为 12.47%, 土壤因子的单独解释率为 9.92%, 放牧干扰与土壤因子的共同解释率达到 22.82% 高于两者的单独解释率, 表明放牧干扰和土壤因子的协同作用是群落  $\gamma$ 多样性的主要影响因素。



\*\*\*  $P < 0.001$ ; \*\*  $P < 0.01$ . a 为气候因子的单独解释率; b 为放牧干扰的单独解释率; c 为气候因子与放牧干扰的共同解释率。下同。\*\*\* means  $P < 0.001$ ; \*\* means  $P < 0.01$ . a, the independent explanation rate of climatic factors; b, the independent explanation rate of grazing disturbance; c, the co-explanation rate of climatic factors and grazing disturbance. The same below.

图 2 放牧干扰和环境因子对科尔沁沙地植物群落  $\alpha$  多样性的解释  
Fig. 2 Explanation of grazing disturbance and environmental factors to  $\alpha$  diversity of plant communities in the Horqin Sandy Land

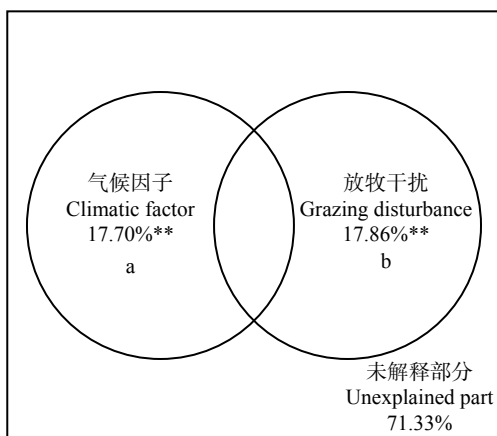
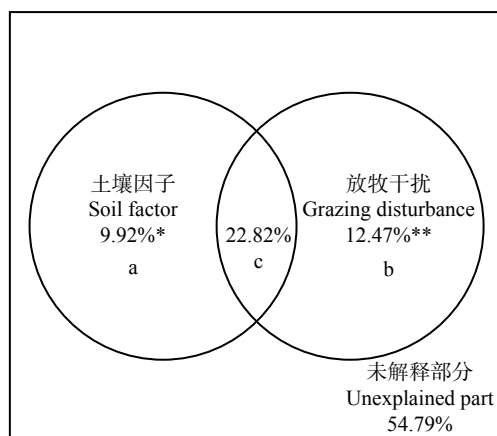


图 3 放牧干扰和环境因子对科尔沁沙地植物群落  $\beta$  多样性的解释  
Fig. 3 Explanation of grazing disturbance and climatic factors to  $\beta$  diversity of plant communities in the Horqin Sandy Land

## 4 讨论与结论

### 4.1 科尔沁沙地不同放牧干扰强度下植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的差异

放牧作为草原地区人为干扰的主要形式之一<sup>[27]</sup>, 显著影响着植物群落组成、结构和多样性分布格局<sup>[28]</sup>, 这种影响与其干扰强度密切相关<sup>[29]</sup>。关于放牧干扰对植物多样性的影响, 很多学者都开展了卓有成效的研究。Augustine 等<sup>[30]</sup> 研究指出, 放牧压力能够提高植物群落物种多样性。而杨婧等<sup>[31]</sup> 对内蒙古典典型草原的研究表明, 植物群落  $\alpha$  和  $\gamma$  多样性在未放牧处理下最高, 放牧干扰的加强使物种多样性逐渐下降。Zhang 等<sup>[32]</sup> 在荒漠草原的研究也发现了相同的变化趋势, 即随着放牧干扰加强植物多样性



\*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ . a 为土壤因子的单独解释率; b 为放牧干扰的单独解释率; c 为土壤因子与放牧干扰的共同解释率。\*\* means  $P < 0.01$ ; \* means  $P < 0.05$ . a, the independent explanation rate of soil factors; b, the independent explanation rate of grazing disturbance; c, the co-explanation rate of soil factors and grazing disturbance.

图 4 放牧干扰和环境因子对科尔沁沙地植物群落  $\gamma$  多样性的解释  
Fig. 4 Explanation of grazing disturbance and environmental factors to  $\gamma$  diversity of plant communities in the Horqin Sandy Land

表现出衰退的趋势。

本研究中, 植物群落  $\alpha$  和  $\gamma$  多样性在围封区最高, 并随着放牧强度的增加而逐渐下降。科尔沁沙地位于半湿润、半干旱区的过渡地带, 水资源可利用率对当地植被有着关键影响<sup>[33]</sup>。随着放牧干扰强度的增加, 群落盖度普遍降低, 不断扩大的地表裸露面积加剧了土壤水分丧失和干旱胁迫, 耐旱能力弱的植物逐渐退出群落, 使群落  $\alpha$  和  $\gamma$  多样性维持较低的水平, 这与韩梦琪等<sup>[34]</sup>在短花针茅 (*Stipa breviflora*) 荒漠草原得出的结论一致。

过度放牧导致干旱、半干旱区草地退化的现象在全球范围内广泛存在<sup>[35]</sup>。本研究发现, 重度放牧下群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性均显著的低于围封区, 说明过度放牧对物种多样性具有明显的抑制作用, 是科尔沁沙地植物群落物种多样性衰退的重要原因之一。验证了曹成有等<sup>[18]</sup> 的研究结果, 其研究指出科尔沁沙地草甸草场退化是放牧、气候以及生境变化共同作用的结果, 但过度放牧直接导致了植被的退化。

群落  $\beta$  多样性主要反映群落间物种组成的差异, 群落间共有种数量越多  $\beta$  多样性越低<sup>[5]</sup>。杨婧<sup>[36]</sup> 的研究指出,  $\beta$  多样性与放牧强度存在负相关关系, 可能是由于常见种和稀有种在放牧压力下逐渐退出群落, 同时一些机会型物种不断侵入, 导致共有种数量的增加。本研究区内  $\beta$  多样性同样表现出随放牧强度增加而持续下降的趋势。可能是因为不断增长的放牧压力导致植被覆盖率大幅降低, 进而加剧了生境的干旱程度, 最终使群落组成向趋同化方向演替。



## 4.2 科尔沁沙地植物群落 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 多样性的主要影响因素

科尔沁地区在历史上曾是丰饶的草原,由于长期农垦和气候变化等因素的影响,如今已退化成为我国最大的沙地之一<sup>[16]</sup>。科尔沁沙地位于我国北方农牧交错区,受气候变化和人类活动共同影响,生态环境极其敏感脆弱<sup>[2]</sup>。大量研究表明,放牧干扰是导致科尔沁沙地植物多样性变化的主要原因之一<sup>[12, 37]</sup>,同时气候和土壤等环境因子对沙地植物物种多样性也具有不可分割的作用<sup>[38-39]</sup>。本文对放牧干扰和环境因子的方差分解结果表明,放牧干扰是科尔沁沙地植物群落  $\alpha$  和  $\beta$  多样性的主要影响因子,该结果验证了赵哈林等<sup>[38]</sup>的观点,认为放牧干扰是科尔沁放牧草地物种多样性变化的主要原因。另外放牧干扰和土壤因子对群落  $\gamma$  多样性的共同解释率均高于两者的单独解释率,说明放牧和土壤因子均无法单独解释  $\gamma$  多样性变异,群落  $\gamma$  多样性主要受放牧干扰和土壤两种因子共同控制。该研究结果验证了 Kraft 等<sup>[6]</sup>的观点,认为  $\gamma$  多样性的小尺度研究能反映局域环境异质性对  $\gamma$  多样性的影响。

综上所述,放牧强度是科尔沁沙地植物群落  $\alpha$  和  $\beta$  多样性的主要影响因素,而放牧干扰和土壤因子的协同作用是  $\gamma$  多样性的主要影响因素。放牧干扰对科尔沁沙地植物群落物种多样性起着关键作用。

本研究结合放牧干扰、土壤养分因子和气候因子的作用,分别解释了科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性 61.78%、28.67%、45.21% 的变异,然而本研究对植物群落  $\beta$  和  $\gamma$  多样性的解释率相对较低,其中群落  $\beta$  多样性未解释部分高达 71.33%。由此推测,其余未解释部分可能受到其他因子的影响,包括地形、植物生物学特性、土壤物理性质等<sup>[20-21]</sup>。因此,今后的研究应当在此研究的基础上,进一步结合地形、植物生物学特性、土壤物理性质等因子的作用,更加全面地阐明科尔沁沙地植物群落  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  多样性及其主要影响因素。

## 4.3 对科尔沁沙地植物物种多样性保护的建议

科尔沁沙地是我国北方农牧交错带的重要组成部分,因此该地区的植物多样性保护问题不仅仅是一个生态问题。在当地农牧业持续发展的当下,需要平衡农牧民经济发展的需求和自然生态环境保护之间的矛盾,发展农牧经济的同时还应考虑到生态利益以及更为长远的可持续发展的问题。

鉴于不断加强的放牧强度对沙地植物群落  $\alpha$  和  $\gamma$  多样性显著的破坏作用,本研究认为应制定科学合理的放牧管理制度来加强对沙地植物  $\alpha$  和  $\gamma$  多样性的保护。首先,可采取一些措施来控制牧区的放牧

强度,比如降低该区域的载畜率、缩短放牧时段等。其次,对植被退化较为严重的区域实行禁牧,进行围栏封育。此外,应加强监管力度以确保以上保护性措施能够有效执行,防止出现偷牧的行为。此外,本研究发现群落  $\beta$  多样性在重度放牧下显著低于围封和中度放牧区,可见过度放牧会引起群落物种组成趋同化发展,使群落物种组成逐渐变得单一。因此,应该加强重度放牧区域的植被保护,应对某些公共放牧区实行一定的放牧管理措施,减轻其放牧强度,避免该区域植被向单一化发展,避免植物物种资源的快速流失。同时,对某些群落  $\beta$  多样性较高的区域进行围栏封育,或者扩大该地区的封育面积以涵盖该地区尽可能多的物种进行保护。

## 参 考 文 献

- [1] 马克平. 生物多样性科学的热点问题[J]. *生物多样性*, 2016, 24(1): 1-2.  
Ma K P. Hot topics for biodiversity science[J]. *Biodiversity Science*, 2016, 24(1): 1-2.
- [2] 孟庆兰. 农牧交错区植被生产力对降水波动的响应: 以科尔沁地区为例 [D]. 烟台: 鲁东大学, 2017.  
Meng Q L. The relationship between vegetation production and rainfall fluctuation in Horqin area[D]. Yantai: Ludong University, 2017.
- [3] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 181-185.  
Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Changes on species composition and function diversity in degraded process of grassland in Horqin Sand Land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 181-185.
- [4] Austrheim G, Eriksson O. Plant species diversity and grazing in the Scandinavian Mountains: patterns and processes at different spatial scales[J]. *Ecography*, 2001, 24: 683-695.
- [5] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局[J]. *生物多样性*, 2004, 12(1): 20-28.  
Tang Z Y, Fang J Y. A review on the elevational patterns of plant species diversity[J]. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1): 20-28.
- [6] Kraft N J B, Comita L S, Chase J M, et al. Disentangling the drivers of  $\beta$  diversity along latitudinal and elevational gradients[J]. *Science*, 2011, 333: 1755-1758.
- [7] 王兴, 宋乃平, 杨新国, 等. 放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应[J]. *草业学报*, 2013, 22(5): 27-36.  
Wang X, Song N P, Yang X G, et al. The response of grassland plant diversity to soil factors under grazing disturbance[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(5): 27-36.
- [8] 刘文亨, 卫智军, 吕世杰, 等. 放牧对短花针茅荒漠草原植物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3394-3402.  
Liu W T, Wei Z J, Lü S J, et al. The impacts of grazing on plant diversity in *Stipa breviflora* desert grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3394-3402.

- [9] 董全民, 赵新全, 马玉寿, 等. 牦牛放牧强度对小嵩草草甸两季轮牧草场植物群落数量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2233-2239.  
Dong Q M, Zhao X Q, Ma Y S, et al. Effects of yak grazing intensity on quantitative characteristics of plant community in a two-seasonal rotation pasture in *Kobresia parva* meadow[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2233-2239.
- [10] 张继义, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.  
Zhang J Y, Zhao H L, Zhang T H, et al. Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin Sandy Land[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 86-92.
- [11] 李玉霖, 孟庆涛, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地流动沙丘植被恢复过程中群落组成及植物多样性演变特征[J]. 草业学报, 2007, 16(6): 54-61.  
Li Y L, Meng Q T, Zhao X Y, et al. Characteristics of species composition and plant diversity in the process of vegetation restoration on moving dunes in the Kerqin Sandy Land[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(6): 54-61.
- [12] 赵丽娅, 钟韩珊, 赵美玉, 等. 围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1783-1790.  
Zhao L Y, Zhong H S, Zhao M Y, et al. Effect of enclosure and grazed management on aboveground biomass and species diversity in sandy grasslands of Horqin Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(10): 1783-1790.
- [13] 吕朋, 左小安, 张婧, 等. 放牧强度对科尔沁沙地沙质草地植被的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1): 34-39.  
Lü P, Zuo X A, Zhang J, et al. Effects of grazing intensity on vegetation in sandy grassland of Horqin[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(1): 34-39.
- [14] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.  
Zhao H L, Zhao X Y, Zhang T H, et al. Desertification processes and its restoration mechanisms in the Horqin Sand Land[M]. Beijing: Ocean Press, 2009.
- [15] 左小安, 赵学勇, 张铜会, 等. 科尔沁沙地榆树疏林草地物种多样性及乔木种群空间格局[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(4): 63-68.  
Zuo X A, Zhao X Y, Zhang T H, et al. Species diversity and arbor population distribution pattern of *Ulmus pumila* L. scattered grassland of Horqin Sand[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(4): 63-68.
- [16] 任鸿昌, 吕永龙, 杨萍, 等. 科尔沁沙地土地沙漠化的历史与现状[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 544-547.  
Ren H C, Lü Y L, Yang P, et al. History and present status of desertification in Horqin Sandy Land region[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 544-547.
- [17] 曹文梅. 科尔沁沙地植被群落结构及其空间格局与生境因子响应关系研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.  
Cao W M. Research for the response relationships of habitat factors to community structure and spatial pattern of vegetation in the Horqin Sandy Land[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [18] 曹成有, 蒋德明, 朱丽辉, 等. 科尔沁沙地草甸草场退化的原因与植物多样性变化[J]. 草业学报, 2006, 15(3): 18-26.  
Cao C Y, Jiang D M, Zhu L H, et al. Degradation and diversity changes of meadow grassland in Keerqin Sandy Land[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(3): 18-26.
- [19] 王健铭, 王文娟, 李景文, 等. 中国西北荒漠区植物物种丰富度分布格局及其环境解释[J]. 生物多样性, 2017, 25(11): 1192-1201.  
Wang J M, Wang W J, Li J W, et al. Biogeographic patterns and environmental interpretation of plant species richness in desert regions of Northwest China[J]. Biodiversity Science, 2017, 25(11): 1192-1201.
- [20] 龙婷, 王健铭, 李景文, 等. 青藏高原北部戈壁区植物多样性及其环境解释[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 17-24.  
Long T, Wang J M, Li J W, et al. Plant diversity and its environmental explanation in gobi district of northern Qinghai-Tibet Plateau, northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(12): 17-24.
- [21] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.  
Fang J Y, Wang X P, Shen Z H, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533-548.
- [22] Wang Z H, Fang J Y, Tang Z Y, et al. Relative role of contemporary environment versus history in shaping diversity patterns of China's woody plants[J]. Ecography, 2011, 34: 1-10.
- [23] Hawkins B A, Porter E E. Water-energy balance and the geographic pattern of species richness of western Palearctic butterflies[J]. Ecological Entomology, 2003, 28: 678-686.
- [24] Burnham K P, Anderson D R. Model selection and multimodel inference[M]. New York: Springer, 2002.
- [25] Borcard D, Gillet F, Legendre P. Numerical ecology with R[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2011.
- [26] Zhang Q, Hou X Y, Li F Y H, et al. Alpha, beta and gamma diversity differ in response to precipitation in the Inner Mongolia Grassland[J/OL]. PLoS One, 2014, 9(3): e93518 (2014-03-27) [2018-05-10]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093518>.
- [27] 姚鸿云, 李小雁, 郭娜, 等. 多年放牧对不同类型草原植被及土壤碳同位素的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 553-562.  
Yao H Y, Li X Y, Guo N, et al. Effects of long-term grazing on carbon isotope composition in plants and soils of different grasslands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 553-562.
- [28] 马少薇, 郭建英, 李锦荣, 等. 放牧强度对短花针茅群落特征及冠层截留的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(5): 66-70.  
Ma S W, Guo J Y, Li J R, et al. Effect of grazing intensity on *Stipa breviflora* communities and canopy interception[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(5): 66-70.



- [29] 牛钰杰, 杨思维, 王贵珍, 等. 放牧强度对高寒草甸土壤理化性状和植物功能群的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5006–5016.  
Niu Y J, Yang S W, Wang G Z, et al. Effects of grazing disturbance on soil properties and plant functional groups and their relationships in an alpine meadow on the Tibetan Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5006–5016.
- [30] Augustine D J, Derner J D, Milchunas D, et al. Grazing moderates increases in C3 grass abundance over seven decades across a soil texture gradient in shortgrass steppe[J]. Journal of Vegetation Science, 2017, 28: 562–572.
- [31] 杨婧, 褚鹏飞, 陈迪马, 等. 放牧对内蒙古典型草原  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  多样性的影响机制[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 188–200.  
Yang J, Chu P F, Chen D M, et al. Mechanisms underlying the impacts of grazing on plant  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  diversity in a typical steppe of the Inner Mongolia Grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(2): 188–200.
- [32] Zhang R Y, Wang Z W, Han G D, et al. Grazing induced changes in plant diversity is a critical factor controlling grassland productivity in the desert steppe, northern China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018, 265: 73–83.
- [33] 王寅, 王键铭, 崔盼杰, 等. 科尔沁沙地植物物种丰富度格局及其与环境的关系[J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 794–803.  
Wang Y, Wang J M, Cui P J, et al. Biogeographical patterns and environmental interpretation of plant species richness in the Horqin Sandy Lands[J]. Plant Science Journal, 2018, 36(6): 794–803.
- [34] 韩梦琪, 王忠武, 靳宇曦, 等. 短花针茅荒漠草原物种多样性及生产力对长期不同放牧强度的响应[J]. 西北植物学报, 2017, 37(11): 2273–2281.  
Han M Q, Wang Z W, Jin Y X, et al. Response of species diversity and productivity to long-term grazing in the *Stipa braviflora* desert steppe[J]. Acta Bot Boreal Occident Sin, 2017, 37(11): 2273–2281.
- [35] Deng L, Sweeney S, Shangguan Z P. Grassland responses to grazing disturbance: plant diversity changes with grazing intensity in a desert steppe[J]. Grass and Forage Science, 2013, 69: 524–533.
- [36] 杨婧. 放牧对典型草原生态系统服务功能影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.  
Yang J. Study on ecosystem service in typical steppe under different grazing intensities[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [37] 赵丽娅, 张晓雨, 熊炳桥, 等. 围封和放牧对科尔沁沙质草地植被和土壤的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 971–977.  
Zhao L Y, Zhang X Y, Xiong B Q, et al. Influence of fencing and grazing on the soil and standing vegetation changes in Horqin Sandy Grassland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(6): 971–977.
- [38] 赵哈林, 大黑俊哉, 李玉霖, 等. 人类放牧活动与气候变化对科尔沁沙质草地植物多样性的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 1–8.  
Zhao H L, Okuro T, Li Y L, et al. Effects of human activities and climate changes on plant diversity in Horqin Sandy Grassland, Inner Mongolia[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(5): 1–8.
- [39] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 945–951.  
Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Changes of species diversity and productivity in relation to soil properties in sandy grassland in Horqin Sand Land[J]. Environmental Science, 2007, 28(5): 945–951.

(责任编辑 赵 勃  
责任编辑委 臧润国)