

DOI: 10.20103/j.stxb.202410082424

刘佳月, 吴水欣, 崔莹莹, 孙世贤, 陈奕霏. 典型草原两种蘑菇圈对植物群落特征的影响. 生态学报, 2025, 45(11): 5426-5435.

Liu J Y, Wu S X, Cui Y Y, Sun S X, Chen Y F. Effects of two fairy rings on plant community characteristics in a typical steppe. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5426-5435.

典型草原两种蘑菇圈对植物群落特征的影响

刘佳月, 吴水欣, 崔莹莹, 孙世贤*, 陈奕霏

中国农业科学院草原研究所, 呼和浩特 010010

摘要: 蘑菇圈是草原生态系统中独有的景观类型, 是由蘑菇真菌菌丝体在土壤中生长和扩散所形成环状结构, 影响植物生长和发育过程。蘑菇圈如何影响不同植物的种群特征进而改变群落结构和功能, 目前缺乏系统的认知。在内蒙古典型草原两种蘑菇圈不同位置进行植被样方调查并分析数据后发现: 羊草 (*Leymus chinensis*) 在草原黑蘑菇圈 (*Agaricus arvensis*) 蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈 (*Leucocalocybe mongolica*) 蘑菇圈上的高度、盖度、密度和地上生物量均显著高于蘑菇圈内和圈外 ($P < 0.05$); 与之相反, 大针茅 (*Stipa grandis*) 在蘑菇圈上显著低于圈内和圈外, 这些指标在圈内和圈外间无显著差异。两种蘑菇圈上羊草的重要值显著升高 (草原黑蘑菇圈: $0.15 \rightarrow 0.50$; 蒙古白丽蘑菇圈: $0.17 \rightarrow 0.53$) 和大针茅的重要值显著降低 (草原黑蘑菇圈: $0.27 \rightarrow 0.13$; 蒙古白丽蘑菇圈: $0.39 \rightarrow 0.10$)。两种蘑菇圈上群落物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和均匀度指数显著低于蘑菇圈内和圈外。在两种蘑菇圈的影响下, 羊草优势度的提高和大针茅优势度的降低, 提高了群落盖度和地上生物量, 降低群落植物多样性, 最终改变典型草原植物群落特征。对深入了解蘑菇圈影响下草原植物群落结构与功能变化具有重要的科学意义。

关键词: 蘑菇圈; 群落特征; 羊草; 大针茅

Effects of two fairy rings on plant community characteristics in a typical steppe

LIU Jiayue, WU Shuixin, CUI Yingying, SUN Shixian*, CHEN Yifei

Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China

Abstract: Fairy rings are a unique landscape type in grassland ecosystems, formed by the growth and dispersal of mushroom fungal mycelium in the soil. They significantly alter plant growth and development. However, there is a lack of comprehensive knowledge on how fairy rings influence the growth processes of plants, thereby altering community structure and function. We conducted a field investigation of two fairy rings (*Leucocalocybe mongolica* and *Agaricus arvensis*) at different sites (in the fairy ring, on the fairy ring, and out of the fairy ring) in a typical steppe in Inner Mongolia, China, in August 2023. The results showed that the height, cover, density, and aboveground biomass of *Leymus chinensis* on the two fairy rings were significantly higher than those inside and outside the two fairy rings ($P < 0.05$), while height, cover, density, and aboveground biomass of *Stipa grandis* were significantly decreased on the two fairy rings, compared with those inside and outside the two fairy rings. These indicators had no significant difference between inside the fairy rings and outside the fairy rings. Due to these divergent changes, important values of *L. chinensis* and *S. grandis* on the two fairy rings were significantly increased (*A. arvensis* ring: $0.15 \rightarrow 0.50$; *L. mongolica* ring: $0.17 \rightarrow 0.53$) and decreased (*A. arvensis* ring: $0.27 \rightarrow 0.13$; *L. mongolica* ring: $0.39 \rightarrow 0.10$), respectively. Species richness, Shannon-Wiener index, Simpson index, and Pielou index on the two fairy rings were significantly lower than those inside and outside the two fairy rings. Under the effects of the two fairy rings, the increase in dominance of *L. chinensis* and the decrease in dominance of *S. grandis* increased community cover and above-ground biomass, decreased plant diversity, and ultimately changed the community characteristics of typical steppes. This study is of great scientific significance for understanding of the changes in the structure and function of grassland communities under the effects of the fairy rings.

基金项目: 内蒙古自治区林业和草原工作站项目 (NMGZCS-C-F-220197); 内蒙古高层次人才引进项目 (2023NMRC004); 内蒙古科技计划项目 (2022YFDZ0034); 中央级公益性科研院所基本科研业务费 (1610332023007)

收稿日期: 2024-10-08; **网络出版日期:** 2025-04-07

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

Key Words: fairy ring; community characteristic; *Leymus chinensis*; *Stipa grandis*

蘑菇圈,也称仙女环(Fairy ring),是由蘑菇真菌菌丝体在土壤中生长和扩散所形成环状结构^[1-2]。蘑菇圈通常分布在沙地、草原、森林等各种陆地生态系统^[3-5],其中在草原生态系统中尤为典型。植物在蘑菇圈环上生长的更加茂盛,颜色也更加浓绿,进而形成了独特的“绿草环”结构,其直径可达几米,甚至百米,表明蘑菇圈的存在可以明显改变草原植物群落特征。蘑菇圈主要通过多种直接或间接的作用改变植物生理和生长过程,影响植物种群特征和种间关系,最终改变植物群落特征^[3, 5-6]。因此,蘑菇圈的存在会使得植物群落空间异质性加剧、斑块化明显,最终甚至引起生态系统景观格局变化^[3, 6]。

植物群落是草原生态系统的主要构成部分并对蘑菇圈的存在产生敏感响应^[7-8]。蘑菇圈对植物种群的影响是当前研究的热点之一。已有研究主要关注与植物生产能力和品质相关的功能性状,如纤维素、木质素和酸性洗涤纤维等牧草营养成分和产量^[9-10]。仅有少部分研究从生态学的角度系统探究蘑菇圈对植物种群数量特征的影响且大部分研究集中于青藏高原高寒草原和高寒草甸中^[11-12],有关中国北方草原区域内的研究相对较少。蘑菇圈通过直接或间接作用改变土壤水分、紧实度和养分等土壤物理化学性质^[5-6]。这进一步会对具有不同生态适应性的植物种群产生怎样的影响,目前尚不清晰。与此同时,植物种群特征和种间关系的变化将与植物群落特征间的联系也缺乏足够的认知。蘑菇圈对植物群落的影响也是当前相关研究的另一热点,其中群落物种组成、植物多样性和群落地上生物量等指标是学者关注的重点^[9-14]。然而,大量研究指出蘑菇圈对植物群落特征(物种组成、多样性、地上生物量等)的影响产生积极、消极或中性效应^[2, 15],表明蘑菇圈对植物群落数量特征的影响仍具有争议性。此外,大多数研究重点关注意于区域中由某一种蘑菇引起的蘑菇圈对植物群落的影响^[9-12]。同一区域内不同种类蘑菇形成的蘑菇圈对相同植物群落是否具有一致的影响,缺乏比较性的研究。研究蘑菇圈对植物种群和群落的影响有利于揭示蘑菇圈影响下植物群落结构与功能的变化过程。

内蒙古草原是中国北方草原的典型代表^[16],蘑菇圈也在内蒙古草甸草原和典型草原中广泛分布。草原黑蘑(*Agaricus arvensis*)和蒙古白丽蘑(*Leucocalocybe mongolica*)蘑菇圈是内蒙古草原中较为典型的两种类型且集中分布在典型草原,同时其在该区域具有重要的潜在经济价值^[6, 9-10]。大针茅和羊草是内蒙古典型草原中分布非常广泛的植物,是群落中的优势种和亚优势种,对维持植物群落结构与功能具有重要作用,其生长发育过程也易受蘑菇圈的影响^[7, 10]。然而,大针茅和羊草具有完全不同的生物学特征(大针茅:丛生禾草 vs. 羊草:根茎禾草;大针茅:有性生殖 vs. 羊草:无性生殖为主,兼具有性繁殖)和生态适应性(大针茅:相对耐旱 vs. 羊草:相对喜湿)^[17-18]。因此,本研究以内蒙古锡林郭勒典型草原中同一区域的草原黑蘑和蒙古白丽蘑蘑菇圈为研究对象,探究:(1)具有不同生态适应性的的大针茅和羊草种群对两种蘑菇圈具有如何的响应性;(2)两种蘑菇圈如何通过改变这两种植物种群特征进而影响典型草原植物群落结构与功能。本研究对深入了解蘑菇圈影响下草原植物群落结构与功能变化具有重要的科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林郭勒锡林浩特市白音锡勒牧场黄花树特分场(116.6245E°, 43.8958N°, 海拔1175 m)。本区域气候类型为典型温带大陆性季风气候,雨热同期,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。本地区年平均气温为0.4℃,最冷月平均气温为-21.6℃,最热月平均气温为19.0℃;年平均降水量为350 mm,其中约80%的降水集中在6—9月。本地区植被类型为温带典型草原,建群种为大针茅(*Stipa grandis*),亚优势种为羊草(*Leymus chinensis*),其它植物主要包括:糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、寸草(*Carex duriuscula*)、二裂委陵菜(*Sibbaldianthe bifurca*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)等。本地区土壤类型为栗钙土(中国土壤分类系统)。

1.2 实验设计

研究区内在地形相似、植被均匀且相近的位置,选择草原黑蘑蘑菇圈和蒙古白丽蘑蘑菇圈各4个。同种

类型的蘑菇圈间彼此独立,其中草原黑蘑菇圈的直径为 10—12 m,蒙古白丽蘑菇圈的直径约为 8—10 m。如图 1 所示,依照蘑菇圈的生长轨迹,将各类型蘑菇圈划分为 3 层,即蘑菇圈内(直径 3—4 m)、蘑菇圈上(直径 2—3 m)和蘑菇圈外,随后在蘑菇圈各层上随机选择位置完成植被样方调查,其中以蘑菇圈内和蘑菇圈外作为对照处理。

1.3 样品采集与测定

使用样方法在每个草原黑蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈完成植被调查,每个蘑菇圈层随机设置 3 个 1 m × 1 m 的样方。首先记录每个样方的物种组成,随后同一调查人员以 25% (样方面积的 1/4)、50% (样方面积的 1/2) 和 75% (样方面积的 3/4) 为参照,利用目测法估测群落总盖度和各物种分盖度;再对各物种随机选择 3 株并使用卷尺对其自然状态下的营养高度进行测量;接着记录各物种的密度,其中丛生植物以其株丛数表示其密度;根茎植物以其地上枝条数计算,其它植物以其地上植株个体数计算;最后使用齐地面刈割法收获各物种的地上部分并装入信封袋带回实验室。将植物样品置于 65℃ 的烘箱内烘干至恒重,随后使用电子天平(精确度为 0.01 g)称量各物种的干重。

1.4 数据分析

植物物种中文名称和拉丁名依照《中国植物志》确定。群落中其它植物主要包括:糙隐子草、寸草、菊叶委陵菜、二裂委陵菜、瓣蕊唐松草 (*Thalictrum petaloideum*) 等。植物种群和群落数量特征使用相同蘑菇圈层下各重复间的平均值表示。重要值表示植物在群落中的优势程度并使用以下公式进行计算^[19]:

$$\text{重要值} = (\text{相对高度} + \text{相对地上生物量}) / 2$$

其中相对高度为物种的高度与其所在样方所有物种的高度总和的比值;相对地上生物量为物种的地上生物量干重与其所在样方所有物种的地上生物量干重总和的比值。

蘑菇圈不同位置植物群落 α 多样性使用以下公式进行计算^[19]:

$$\text{丰富度指数}(R) = S$$

$$\text{Simpson 指数}(D) = 1 - \sum (P_i \times P_i)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H) = - \sum (P_i \times \ln P_i)$$

$$\text{均匀度指数}(JSW) = H / \ln S$$

S 为蘑菇圈不同位置各样方内包括的物种总数。 P_i 为蘑菇圈不同位置中物种 i 的重要值。

对数据进行正态性和方差齐性检验,经检验本研究所有数据符合正态分布且方差均为齐性。使用单因素方差分析比较相同蘑菇圈中不同位置(圈内、圈上和圈外)种群和群落数量特征是否存在显著差异,其中多重比较选择最小显著性差异法(LSD)。使用结构方程模型揭示典型草原蘑菇圈植物群落特征与大针茅和羊草种群特征间的关系,使用最大似然法构建模型并选择卡方值、 P 值、AIC 和 RMSEA 综合评估模型的精确性。根据羊草和大针茅种群数量指标间的相关关系,通过排除不相关或共线性的变量外,本研究重点关注羊草和大针茅的盖度和地上生物量与群落盖度和地上生物量间的关系,结合前人的研究和已有知识体系构建最初的结构方程模型并假设:(1)蘑菇圈直接对羊草种群数量特征产生积极的影响,但对大针茅对种群数量特征产生消极的影响;(2)羊草和大针茅种群数量特征的变化改变群落数量特征,进而影响群落结构与功能。本研究统计分析在 0.05 水平下进行,数据采用平均值±标准误差表示,数据处理和结构方程模型构建分别在 SPSS 24.0 和 Amos 24.0 中进行,图表使用 SigmaPlot 13.0 绘制。



图 1 内蒙古锡林郭勒典型草原蘑菇圈层次划分

Fig.1 Hierarchy of typical grassland fairy rings in Xilin Gol, Inner Mongolia

2 结果与分析

2.1 两种蘑菇圈对典型草原主要物种特征的影响

大针茅和羊草的种群特征对蘑菇圈具有不同的响应模式。在草原黑蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈上,羊草的高度、盖度、密度和地上生物量显著高于两种蘑菇圈的圈内和圈外(图 2 和 3; $P < 0.05$)。特别是,在草原

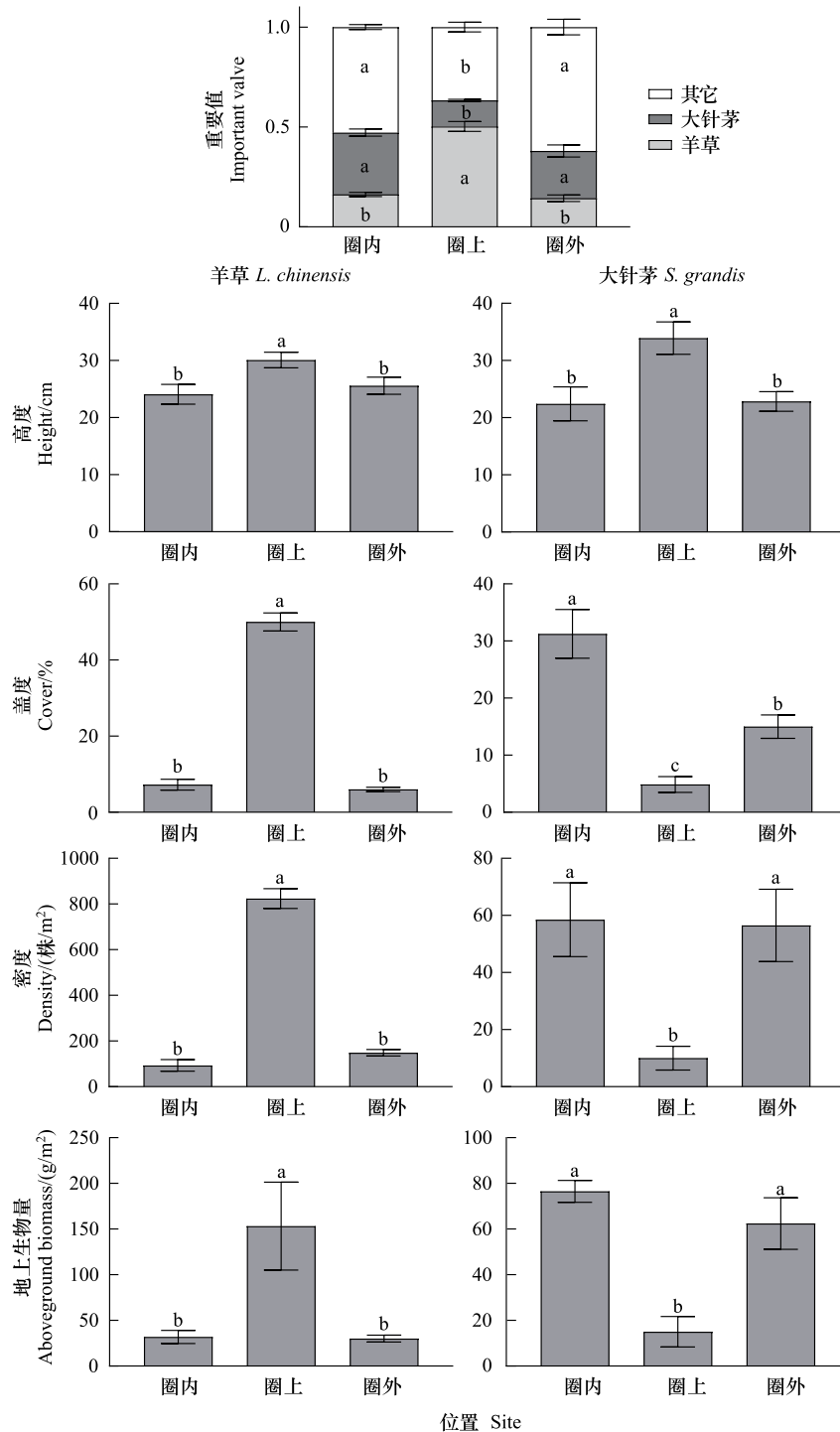


图 2 草原黑蘑菇圈不同位置羊草和大针茅种群数量特征

Fig.2 Population quantitative characteristics of *L. chinensis* and *Stipa grandis* in *Agaricus arvensis* ring with at different sites

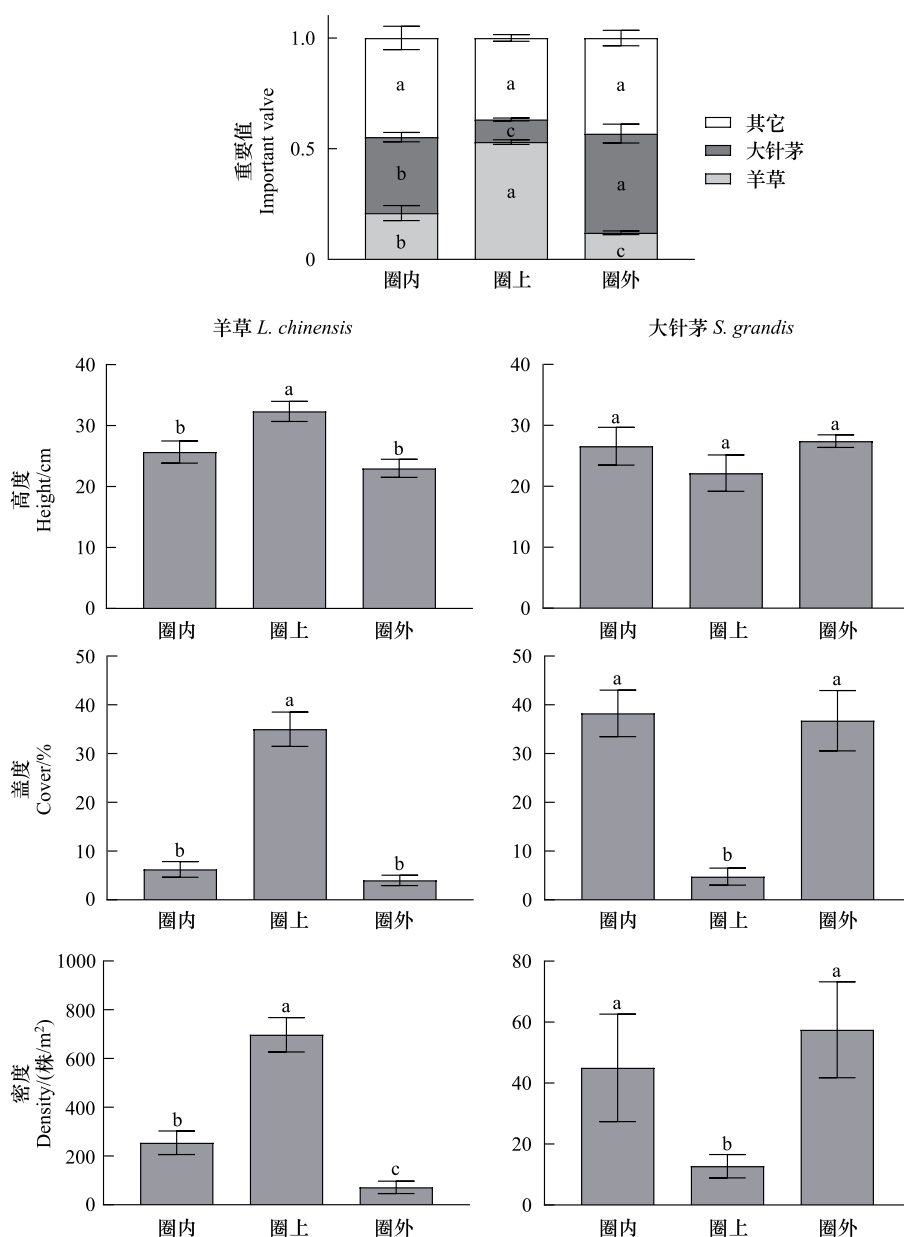
不同小写字母表示在 0.05 水平上草原黑蘑菇圈不同位置羊草和大针茅种群数量特征存在显著差异

黑蘑菇圈的圈上,羊草的高度、盖度和地上生物量分别是圈内的 1.25 倍、6.94 倍和 4.80 倍。在草原黑蘑菇圈的圈上,大针茅的高度显著高于蘑菇圈内和蘑菇圈外的(图 2 和 3; $P < 0.05$)。然而,大针茅的盖度、密度和地上生物量在蘑菇圈上却显著低于蘑菇圈的圈内和圈外(图 2 和 3; $P < 0.05$)。草原黑蘑菇圈上大针茅的盖度和地上生物量仅为草原黑蘑菇圈外的 32% 和 24%。羊草和大针茅种群数量特征的变化进一步改变这两种植物在群落中的重要值。在两种蘑菇圈的圈内和圈外,大针茅的重要值显著高于蘑菇圈上的。然而在蘑菇圈上,羊草的重要值显著高于蘑菇圈的圈内和圈外(图 2 和 3; $P < 0.05$)。

2.2 两种蘑菇圈对典型草原群落物种组成的影响

两种蘑菇圈对典型草原植物群落物种组成均无明显影响。草原黑蘑菇圈上与圈内和圈外共有相同物种 12 种,主要包括:大针茅、羊草、冰草(*Agropyron cristatum*)、二裂委陵菜、寸草等,这些物种均为群落建群种和常见种(图 4)。仅有乳浆大戟(*Euphorbia esula*)1 种植物存在于草原黑蘑菇圈的圈上(图 4)。

与草原黑蘑菇圈相似,蒙古白丽蘑菇圈上与圈内和圈外共有 7 个物种相同,即糙隐子草、刺藜、大针茅、寸草、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等(图 5)。伏毛山莓草(仅存在于蒙古白丽蘑菇圈上,但不存在于蒙古白丽蘑菇圈外和蒙古白丽蘑菇圈内(图 5)。



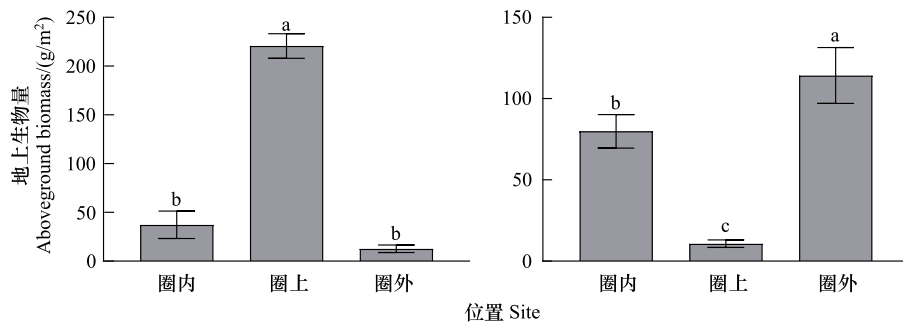


图3 蒙古白丽蘑菇圈不同位置羊草和大针茅种群数量特征

Fig.3 Population quantitative characteristics of *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* in *Leucocalocybe mongolica* ring with at different sites
不同小写字母表示在 0.05 水平上蒙古白丽蘑菇圈不同位置羊草和大针茅种群数量特征存在显著差异

2.3 两种蘑菇圈对典型草原植物多样性的影响

两种蘑菇圈对群落植物多样性整体具有相似的影响。在草原黑蘑菇圈圈上的群落植物丰富度、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和均匀度指数显著低于草原黑蘑菇圈的圈内和圈外(图 6; $P < 0.05$)。在蒙古白丽蘑菇圈中,圈上的植物群落 Simpson 指数和均匀度指数显著低于蒙古白丽蘑菇圈内和圈外(图 7; $P < 0.05$)。然而,蒙古白丽蘑菇圈上的植物群落丰富度和 Shannon-Wiener 指数略低于蒙古白丽蘑菇圈外和圈内的,但三者间无显著差异(图 7)。

2.4 两种蘑菇圈对典型草原群落特征的影响

两种蘑菇圈对典型草原植物群落特征具有相似的影响。在草原黑蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈的圈上,群落植物总密度和群落地上生物量显著高于草原黑蘑菇和蒙古白丽蘑菇圈的圈内和圈外的群落植物总密度和群落地上生物量(图 8 和 9; $P < 0.05$)。例如,在草原黑蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈的圈上,群落地上生物量分别是蘑菇圈外的 1.5 倍和 1.6 倍。在草原黑蘑菇圈中,圈上和圈内的群落总盖度显著高于圈外的(图 8; $P < 0.05$);但在蒙古白丽蘑菇圈中,这三者间无显著差异。在两种蘑菇圈中,不同位置(圈上、圈内和圈外)间的群落高度无显著差异(图 8 和 9)。

2.5 蘑菇圈影响下羊草和大针茅种群特征与群落特征的关系

在两种蘑菇圈的影响下,羊草种群数量特征的提高和大针茅种群数量特征的降低共同改变了典型草原群落结构与功能。蘑菇圈直接提高了羊草的盖度和地上生物量,同时降低了大针茅的盖度和地上生物量(图 10; $P < 0.05$)。羊草盖度和地上生物量的提高进一步促进了群落盖度和地上生物量的增加,而大针茅的这些种

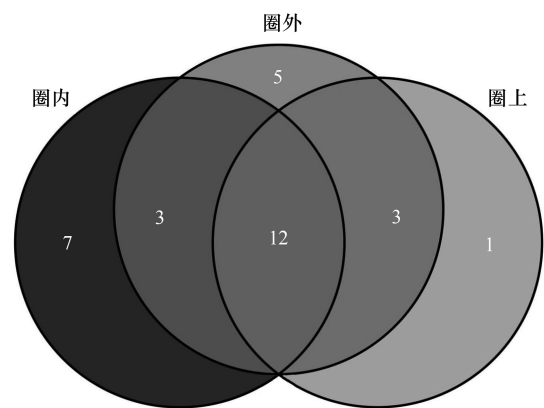


图4 草原黑蘑菇圈不同位置植物群落物种组成特征

Fig.4 Species composition of plant community in *Agaricus arvensis* ring at different sites

图中数字表示草原黑蘑菇圈不同位置独有或共有的物种数量

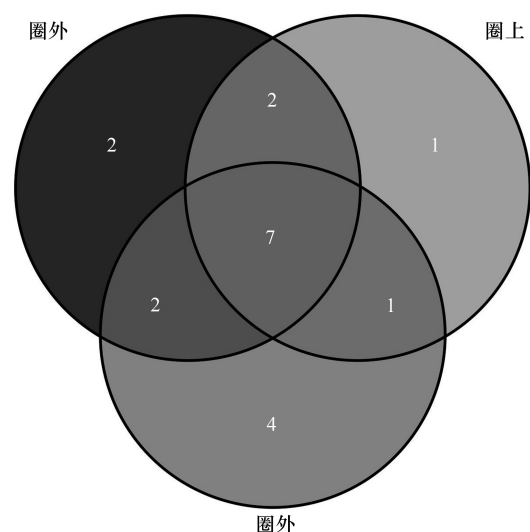


图5 蒙古白丽蘑菇圈不同位置植物群落物种组成特征

Fig.5 Species composition of plant community in *Leucocalocybe mongolica* ring at different sites

图中数字表示蒙古白丽蘑菇圈不同位置独有或共有的物种数量

群数量特征的变化抑制了群落盖度和地上生物量(图 10; $P<0.05$)。此外,蘑菇圈也能直接降低群落物种丰富度,进一步改变群落植物群落 Simpson 指数(图 10; $P<0.05$)。蘑菇圈影响下群落数量特征和植物多样性指数的变化进而改变典型草原植物群落结构与功能。

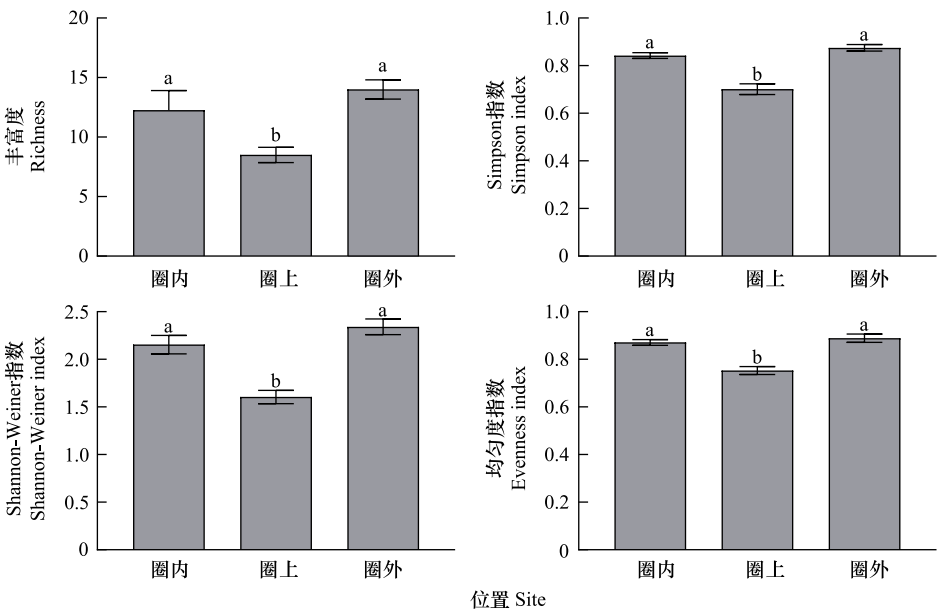


图 6 草原黑蘑菇圈不同位置植物群落 α 多样性特征

Fig.6 α diversity index of plant community in *Agaricus arvensis* ring at different sites

不同小写字母表示在 0.05 水平上草原黑蘑菇圈不同位置群落多样性指数间存在显著差异

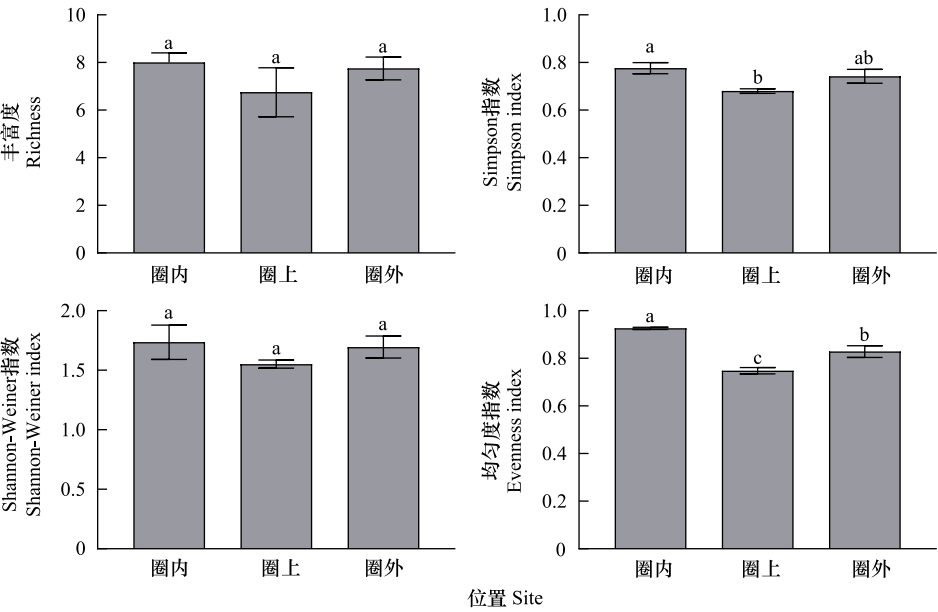


图 7 蒙古白丽蘑菇圈不同位置植物群落 α 多样性特征

Fig.7 α diversity index of plant community in *Leucocalocybe mongolica* ring at different sites

不同小写字母表示在 0.05 水平上蒙古白丽蘑菇圈不同位置群落多样性指数间存在显著差异

3 讨论

3.1 蘑菇圈对大针茅和羊草种群的不同影响

植物群落是草原生态系统重要的组成部分,对外界干扰具有快速且敏感的反应^[20]。前人研究发现蘑菇

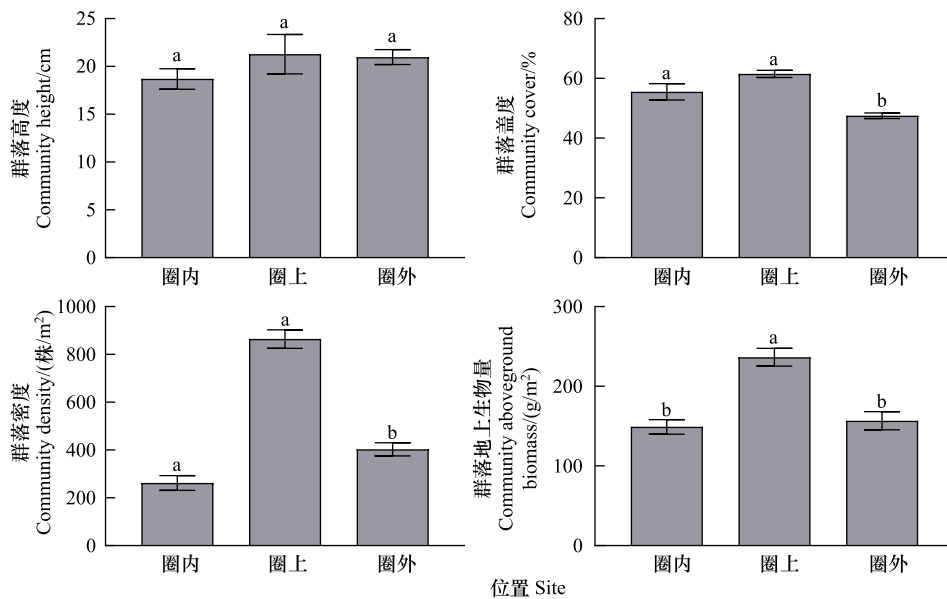


图 8 草原黑蘑菇圈不同位置植物群落数量特征

Fig.8 Community quantitative characteristics in *Agaricus arvensis* ring with different sites

不同小写字母表示在 0.05 水平上草原黑蘑菇圈不同位置群落种群数量特征存在显著差异

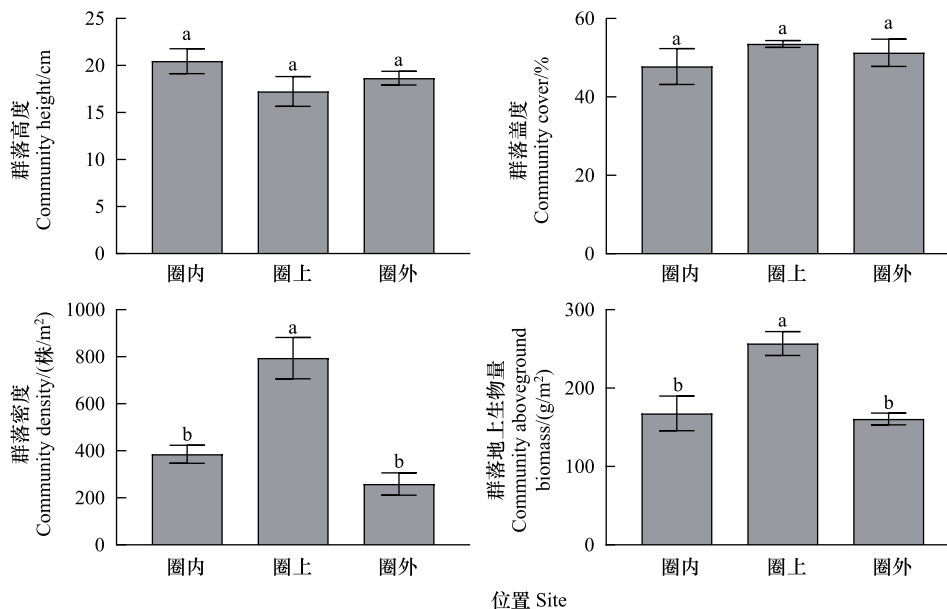


图 9 蒙古白丽蘑菇圈不同位置植物群落数量特征

Fig.9 Community quantitative characteristics in *Leucocalocybe mongolica* ring with different sites

不同小写字母表示在 0.05 水平上蒙古白丽蘑菇圈不同位置群落种群数量特征存在显著差异

圈通过代谢活动明显改变真菌—土壤系统互作关系,进而影响植物的生长发育,最终对植物种群和群落产生多方面的影响^[2, 21—22]。本研究发现草原黑蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈明显提高羊草种群数量特征,但降低了大针茅的高度、盖度、地上生物量等数量指标(图 4 和 5),表明蘑菇圈对这两种植物的生长分别产生积极和消极的影响。该研究结果与青藏高原地区中的相似^[11]。真菌—土壤养分互作是驱动这种生态变化的主导因素。前人研究发现蘑菇圈土壤中的真菌菌丝体可以加速土壤腐殖质的分解,提高土壤养分矿化速率,最终导致土壤中速效氮和速效磷等养分浓度升高并促进植物生长^[23],在内蒙古草原蒙古白丽蘑菇和草原黑蘑菇

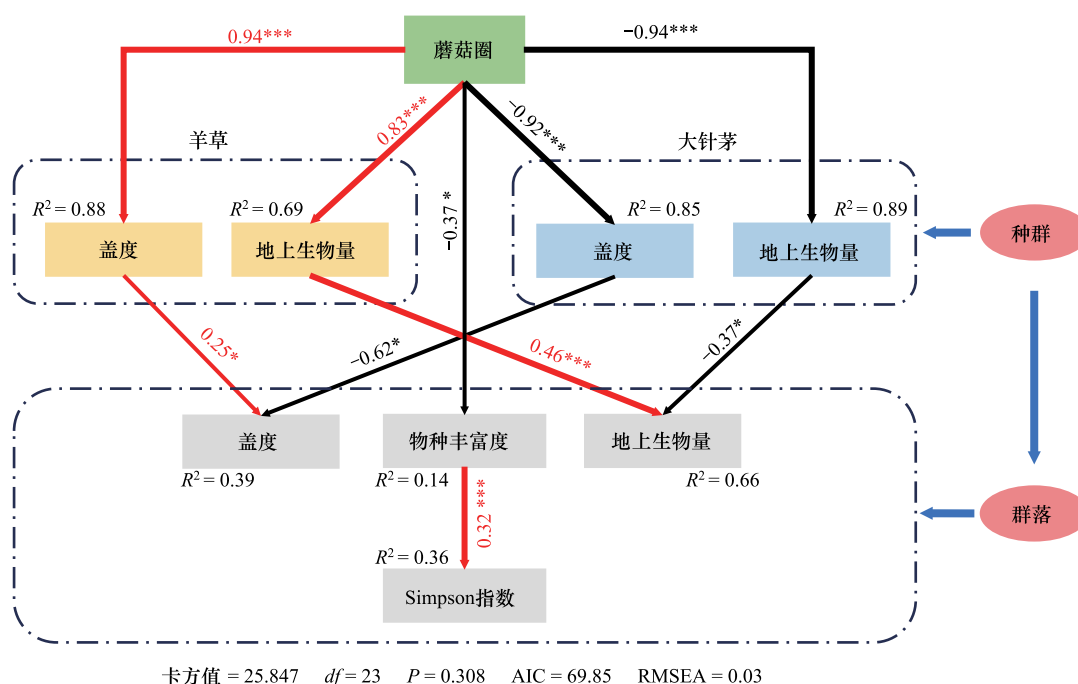


图 10 蘑菇圈影响下两种植物种群特征与典型草原群落特征的关系

Fig.10 Relationships between population characteristics of two plant species and community characteristics in a typical steppe under the effect of fairy rings

AIC: 赤池信息准则; RMSEA: 均方根误差近似值; 红线和黑线分别表示两个变量间的正效应和负效应; R^2 表示变量的解释度; 实线上的数字表示两个变量间的标准化系数; * $P < 0.05$ 和 *** $P < 0.001$ 分别表示两个变量间的显著性水平

圈上尤为明显^[6]。也有研究指出蘑菇圈引起微生物多样性的变化也将改变植物种间关系^[5, 22]。这两种驱动机制均可能引起大针茅和羊草高度的增加(蒙古白丽蘑菇圈中大针茅的高度除外)。此外,有研究表明与大针茅相比,羊草更适合在氮含量较高的土壤中生长^[17, 24]。这将使羊草密度、盖度、地上生物量得到更明显的提高,也更适合在蘑菇圈上生长。本研究中大针茅和羊草养分竞争关系的变化,改变了大针茅和羊草种群数量特征和重要值。在个体水平上,羊草作为营养价值较高的优质牧草^[25],其在蘑菇圈上优势度的提高也意味着在蘑菇圈上形成的群落小斑块中的植物营养品质得到提高。在群落水平上,植物在群落中重要值排序的更替一方面意味着群落在空间尺度上异质性加剧。蘑菇圈的存在使得大针茅草原中增加了较多的羊草斑块,进一步增加了植物群落空间异质性。此外,草原黑蘑和蒙古白丽蘑等蘑菇具有较高的营养价值和经济价值,在未来可利用蘑菇圈和羊草间的关系形成蘑菇-羊草复合体产业链,不仅可以增加地区经济收入和牧草生产能力,也能提高区域生态安全功能。

3.2 蘑菇圈对植物群落特征和植物多样性的影响

植物种群是植物群落的重要组成,决定着群落的结构与功能。蘑菇圈通过改变植物种群数量特征进一步改变植物群落数量特征。本研究发现蘑菇圈提高群落高度、盖度、密度和地上生物量,与前人的研究结果一致^[9, 13-14]。本研究发现羊草和大针茅种群特征的变化也是驱动群落数量特征变化的主导因素,尤其是群落盖度和地上生物量。此外,前人研究也表明土壤养分和土壤微生物多样性等方面的改变是驱动这种生态现象的另一关键因素^[5, 22]。蘑菇圈中真菌菌丝一方面活化土壤养分,另一方面通过提高细菌、放线菌、真菌以及纤维素分解菌等数量综合改善土壤环境,促进植被生长,提高生态系统服务与功能^[12, 26]。本研究也发现蘑菇圈显著降低群落植物多样性,但对群落物种组成无明显的影响,与前人的研究结果相反^[11-12]。草原类型间的差异是导致这些研究结果间差异的主导因素。王启兰等在青藏高原小嵩草草甸中开展研究,该类型群落优势种高山嵩草(*Carex parvula*)高度极低,仅为 3—5 cm,同时群落中双子叶杂类草比例高,由于蘑菇圈所导致土

壤养分的提高和微生物组成的变化有利于植物多样性的提高^[12]。然而,本研究中蘑菇圈导致羊草的高度和优势度提高,抑制了底层植物光照的获得,同时本区域群落物种构成简单,进而导致蘑菇圈的存在使群落植物多样性降低。这种类似的情况也在内蒙古围封典型草原中,即大针茅草原多年围封后羊草重要值显著提高,但群落植物多样性降低的现象^[27]。此外,有研究表明蘑菇圈中土壤菌丝体也将大量消耗土壤中的水分,降低土壤水分含量。这也将导致群落植物多样性的降低^[2]。群落植物多样性通常与生态系统结构的复杂性和稳定性有关,这也可能影响植物群落的稳定性和生态系统服务和功能,也是未来蘑菇圈研究中的热点。

4 结论

蘑菇圈是草原生态系统中广泛分布且独特的景观类型,并通过蘑菇真菌菌丝的生长改变植物种群特征并影响植物群落结构与功能。草原黑蘑菇圈和蒙古白丽蘑菇圈均通过提高典型草原群落中亚优势物种羊草的种群数量特征及其在群落中的优势度,同时降低优势物种大针茅的种群数量特征及其在群落中的优势度,进而提高群落植物密度和地上生物量并降低草原群落物种多样性,最终改变植物群落特征。本研究为明晰蘑菇圈影响下草原植物群落结构与功能变化提供科学依据。

参考文献 (References):

- [1] Fox R T V. Fungal foes in your garden: fairy ring mushrooms. *Mycologist*, 2006, 20(1): 36-37.
- [2] Bonanomi G, Incerti G, Allegranza M. Assessing the impact of land abandonment, nitrogen enrichment and fairy-ring fungi on plant diversity of Mediterranean grasslands. *Biodiversity and Conservation*, 2013, 22(10): 2285-2304.
- [3] Abesha E, Caetano-Anollés G, Høiland K. Population genetics and spatial structure of the fairy ring fungus *Marasmius oreades* in a Norwegian sand dune ecosystem. *Mycologia*, 2003, 95(6): 1021-1031.
- [4] Peter M. Ectomycorrhizal fungi—fairy rings and the wood-wide web. *New Phytologist*, 2006, 171(4): 685-687.
- [5] Yang C, Li J J, Liu N, Zhang Y J. Effects of fairy ring fungi on plants and soil in the alpine and temperate grasslands of China. *Plant and Soil*, 2019, 441(1): 499-510.
- [6] 佟旭泽, 范凯凯, 闫玉春, 辛晓平, 王旭. 草原蘑菇圈生态学研究进展. *中国农业资源与区划*, 2022, 43(3): 222-229.
- [7] 赵吉, 邵玉琴, 包青海. 草原蘑菇圈的土壤-植物系统研究. *生态学杂志*, 2003, 22(5): 43-46.
- [8] 刁治民, 朱锦福, 熊亚, 马寿福. 青海高寒草甸“蘑菇圈”的研究. *青海师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 20(4): 75-78.
- [9] 关世英, 阎伟, 常金保, 陈立红. 白蘑菇圈对牧草产量影响的研究. *中国草地*, 1997, 19(6): 33-35.
- [10] 关世英, 阎伟, 常金保, 陈立红. 白蘑菇 (*Tricholoma mongolicum*) 圈对羊草 (*Leymus chinensis*) 生长的影响. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1997, 28(2): 118-121.
- [11] 李佳琪, 赵敏, 魏斌, 胡廷花, 于应文. 蘑菇圈形成对高寒草甸群落植被结构及稳定性的作用. *草业学报*, 2018, 27(4): 1-9.
- [12] 王启兰, 姜文波, 陈波. 黄绿蜜环菌蘑菇圈生长对土壤及植物群落的影响. *生态学杂志*, 2005, 24(3): 269-272.
- [13] 陈立红, 阎伟, 刘建. 草原蘑菇圈对牧草长势影响的初步分析. *西北植物学报*, 2002, 22(6): 141-145.
- [14] 陈立红, 闫伟. 草原黑蘑菇 (*Agaricus arvensis*) 圈对牧草生产的影响. *植物学通报*, 2003, 38(1): 94-97.
- [15] Caesar-Tonthat T C, Espeland E, Caesar A J, Sainju U M, Lartey R T, Gaskin J F. Effects of *Agaricus lilaceps* fairy rings on soil aggregation and microbial community structure in relation to growth stimulation of western wheatgrass (*Pascopyrum smithii*) in Eastern Montana rangeland. *Microbial Ecology*, 2013, 66(1): 120-131.
- [16] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云. 中国草地资源的现状分析. *科学通报*, 2016, 61(2): 139-154.
- [17] Wang R X, Tian Y Q, Ouyang S N, Xu X L, Xu F Z, Zhang Y. Nitrogen acquisition strategies used by *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* in temperate steppes. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(7): 951-961.
- [18] Chen S P, Bai Y F, Zhang L X, Han X G. Comparing physiological responses of two dominant grass species to nitrogen addition in Xilin River Basin of China. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 53(1): 65-75.
- [19] 侯东杰, 韩蓓蕾, 刘璐, 王忠武. 基于物种周转揭示放牧对荒漠草原植物多样性的影响. *草地学报*, 2023, 31(4): 952-962.
- [20] 潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩. 中国北方草原退化现状与恢复技术. *科学通报*, 2018, 63(17): 1642-1650.
- [21] Bonanomi G, Mingo A, Incerti G, Mazzoleni S, Allegranza M. Fairy rings caused by a killer fungus foster plant diversity in species-rich grassland. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(2): 236-248.
- [22] Yang C, Zhang F G, Liu N, Hu J, Zhang Y J. Changes in soil bacterial communities in response to the fairy ring fungus *Agaricus gennadii* in the temperate steppes of China. *Pedobiologia*, 2018, 69: 34-40.
- [23] Edwards P J. Effects of the fairy ring fungus *Agaricus arvensis* on nutrient availability in grassland. *New Phytologist*, 1988, 110(3): 377-381.
- [24] Bai W M, Sun X Q, Wang Z W, Li L H. Nitrogen addition and rhizome severing modify clonal growth and reproductive modes of *Leymus chinensis* population. *Plant Ecology*, 2009, 205(1): 13-21.
- [25] Wang R Z, Gao Q, Chen Q S. Effects of climatic change on biomass and biomass allocation in *Leymus chinensis* (Poaceae) along the North-East China Transect (NECT). *Journal of Arid Environments*, 2003, 54(4): 653-665.
- [26] Yang C, Li J J, Zhang F G, Liu N, Zhang Y J. The optimal Redfield N: P ratio caused by fairy ring fungi stimulates plant productivity in the temperate steppe of China. *Fungal Ecology*, 2018, 34: 91-98.
- [27] Hou D J, He W M, Liu C C, Qiao X G, Guo K. Litter accumulation alters the abiotic environment and drives community successional changes in two fenced grasslands in Inner Mongolia. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(16): 9214-9224.