

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0512

张灏, 杨超. 草地蘑菇圈对植被及土壤真菌的影响. 草业科学, 2019, 36(7): 1774-1780.

ZHANG H, YANG C. Effects of grassland fairy rings on vegetation and soil fungi. Pratacultural Science, 2019, 36(7): 1774-1780.

草地蘑菇圈对植被及土壤真菌的影响

张 灏¹, 杨 超²

(1. 中国人民大学附属中学, 北京 100080; 2. 中国农业大学动物科技学院草业科学系, 北京 100193)

摘要: 蘑菇圈是由土壤真菌引起的一种特殊的生态现象, 通过分析蘑菇圈的存在对植被氮磷营养、土壤理化性质及土壤真菌结构的影响, 旨在为揭示土壤真菌-真菌互作提供理论依据。结果表明, 1) 在蘑菇圈的圈上区域, 植被生物量、含氮量和含磷量均显著高于圈外及圈内区域 ($P < 0.05$)。2) 3 个区域间的土壤理化性质也发生了显著变化 ($P < 0.05$)。3) 真菌群落 α -多样性指数分析表明, 蘑菇圈圈上区域土壤真菌多样性指数显著高于圈外对照区域 ($P < 0.05$)。4) 土壤真菌类群在科水平分类结果显示, 伞菌科 (Agaricaceae)、囊担菌科 (Cystobasidiaceae)、戴维迪科 (Davidiellaceae) 和丛赤壳科 (Nectriaceae) 的相对丰度在蘑菇圈圈上区域均显著高于圈外区域 ($P < 0.05$); 相反, 囊藻科 (Cystofilobasidiaceae)、大壶菌科 (Chytridiaceae) 及虫草科 (Cordycipitaceae) 的真菌的相对丰度在圈上区域显著低于圈外区域 ($P < 0.05$)。5) 相关分析表明, 土壤有机碳和有效磷含量是影响土壤真菌结构组成的重要因素。

关键词: 草地; 蘑菇圈; 土壤理化性质; 土壤真菌结构; 高通量测序

中图分类号: S154.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)07-1774-07

Effects of grassland fairy rings on vegetation and soil fungi

ZHANG Hao¹, YANG Chao²

(1. High School Affiliated to Renmin University of China, Beijing 100080, China;

2. Department of Grass Science, School of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Fairy rings are a unique ecological phenomenon caused by soil fungi. Through analyzing the influence of fairy rings on nitrogen and phosphorus nutrition supply to vegetation, physical and chemical properties of soil, and soil fungi structure, this paper aims to provide a theoretical basis for revealing soil fungi-fungi interaction. The results showed that the vegetation biomass, nitrogen content, and phosphorus content in the area above the fairy ring were significantly higher than those outside and inside the rings ($P < 0.05$). Soil physical and chemical properties of the three regions also changed significantly ($P < 0.05$). The analysis of the alpha-diversity index of the fungal community showed that the diversity index of soil fungi was significantly higher in the upper zone than in the outside zone ($P < 0.05$). Classification results showed that the relative abundances of Agaricaceae, Cystobasidiaceae, Davidiellaceae, and Nectriaceae in the upper zone were significantly higher than those in the outside area ($P < 0.05$). On the contrary, the relative abundance of fungi in Cystofilobasidiaceae, Chytridiaceae, and Cordycipitaceae was significantly lower in the upper zone than in the outside zone ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that soil organic carbon and available phosphorus were important factors affecting the composition of soil fungi.

Keywords: grassland; fairy ring; soil physical and chemical properties; soil fungal structure; high throughput sequencing

收稿日期: 2018-09-09 接受日期: 2019-01-02

基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目 (CARS-35)

第一作者: 张灏 (2000-), 男, 北京人, 在读高中生. E-mail: jjaacckk2011@yeah.net

通信作者: 杨超 (1990-), 男, 安徽灵璧人, 在读博士生, 主要从事草地管理与恢复研究. E-mail: yc697525@163.com

Corresponding author: YANG Chao E-mail: yc697525@163.com

蘑菇圈 (fairy ring) 是由土壤中担子菌类真菌引起的一种常见的草地生态学景观^[1]。真菌菌丝体的蔓延并辐射状生长构成了蘑菇圈, 且菌丝体的生长代谢活动对相应的植物和土壤生态系统产生影响, 使植物也呈现圈状分布^[2]。目前对蘑菇圈的研究主要集中在蘑菇圈对植物生物量和土壤理化性质的影响。许多研究者对蘑菇圈的关注均来自于对草原上圈带状浓绿植物的观察。由于蘑菇出菇时间短, 且蘑菇子实体容易受到环境气候条件的影响, 因此蘑菇圈产生菌的子实体一般不容易被观察到。相反, 在雨后草原上经常看到叶色浓绿的绿草环^[3-6]。绿草环的形成一方面是由于土壤有机质被蘑菇圈产生菌的菌丝快速分解, 进而释放了植被可利用的速效养分, 间接提高了植被的营养状况, 同时也与真菌的特殊摄食方式有关。死亡的菌丝体被降解后大量速效养分的释放使得圈内绿草环上的植物比圈外区域的植物繁茂和浓绿^[2]。通常绿草环上植物生物量及蛋白质含量显著增加^[7-10]。绿草环上植物中的蛋白质、纤维素、钙、磷含量分别提高 3.7、2、1.6 和 3.9 倍^[11]。许多研究表明, 在蘑菇圈的绿草环区域中土壤全氮、速效氮、速效磷、速效钾含量均高于圈外区域^[6, 12-14]。且圈上土壤中的细菌、放线菌、真菌数量高于圈内和圈外^[15-20]。在对于蘑菇圈土壤细菌结构方面的进一步研究表明, 蘑菇圈真菌存在增加了土壤细菌多样性, 改变了土壤细菌多样性结构^[21]。然而蘑菇圈真菌对于土壤真菌结构的影响及蘑菇圈土壤理化性质与土壤真菌结构之间的关系的研究还鲜有报道。因此, 本研究通过分析蘑菇圈 3 个区域 (圈外、圈上和圈内) 的植被氮磷营养、土壤理化性质及土壤真菌结构, 旨在补充对蘑菇圈土壤真菌结构方面的研究。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究地点位于河北省沽源县北部、内蒙古锡林郭勒草原南缘 (41°46' N, 115°41' E, 海拔 1 380 m), 属于农业生态系统与草地生态系统空间交错分布的典型地段。该地区是以羊草 (*Leymus chinensis*) 为

优势种的天然草地。属半干旱大陆性气候, 冬季寒冷干燥, 夏季温和湿润。年均温为 -4.4 °C, 最冷的 1 月均温为 -23.04 °C, 最热的 7 月均温为 17.94 °C。年降水量 430 mm 左右, 多集中在 7-9 月。水热同期, 对蘑菇生长十分有利。该地区土壤以栗钙土为主。这些土类有机质较丰富, 质地较轻, 疏松, 通气良好, 为蘑菇生长提供了良好的环境。植被以根茎禾草和丛生禾草为主, 羊草为建群种^[19]。

1.2 样品采集

试验以自由放牧利用草地为研究对象, 2016 年 8 月, 选择 3 个发育良好的蘑菇圈由外依次向内采集植被及土壤样品 (图 1)。包括圈外 (对照)、圈上和圈内; 植物样品采集用 25 cm × 25 cm 的样方框。在样方内采用直径为 3.8 cm 的土钻按照五点取样法采集 0-15 cm 土层的土壤。土壤混匀, 装入自封袋, 在保温箱中冷藏处理后, 带回实验室。用 2 mm 筛子筛出植物根、石子及其他碎屑物。土壤样品分为两份, 一份用于测定土壤理化性质, 另一份保存于 -20 °C 冰箱中, 用于微生物结构测定。

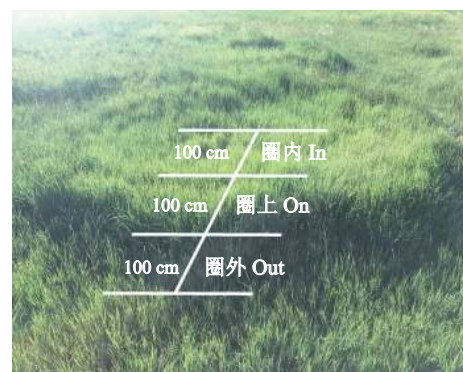


图 1 样品采集区示意图

Figure 1 Schematic diagram of sample collection area

1.3 样品检测

植物和土壤全氮含量的测定用全自动凯氏定氮法^[22]; 植物和土壤全磷含量测定用 $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3$ 消煮钼锑抗比色法; 土壤全碳用土壤总碳分析仪测定; 土壤有效磷浓度的测定用 NaHCO_3 溶液浸提-钼锑抗比色法; 有效氮浓度的测定用 KCl 溶液浸

提后, 用连续流动分析仪测定铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) + 硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 的浓度, 两者之和即为有效氮含量。利用 pH 电导率仪测定土壤的 pH 及电导率值。称重法测土壤含水量。

使用 Illumina Miseq PE300 测序平台对土壤微生物的 ITS1 和 ITS2 区段进行测序, 获得环境微生物群落组成和分类信息。上机测序前用带有 Tag 标签序列和 adapter 序列修饰的引物 ITS1 (5'-CTTGGTCA TTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2 (5'-GCTGCGTT CTTTCATCGATGC-3') 对样品微生物 DNA 的 ITS 区进行扩增, 再将扩增产物用 1.8% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物纯化效果, 测定纯化后 PCR 产物的浓度, 将纯化产物等摩尔数混合, 以备上机前纯化和测序仪分析。以上试验均由商业测序公司完成 (奥维森, 北京)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 统计软件对试验数据进行处理。在科水平上分析真菌群落相对丰度, 用来比较蘑菇圈不同区域微生物群落组成差异。采用单因素方差分析 (ANOVA) 分析蘑菇圈不同区域植被、土壤理化指标和真菌多样性指数在 $P < 0.05$ 水平上的统计学差异性。用 Pearson 相关性分析土壤理化指标与真菌结构之间的关系。用于土壤微生物与土壤理化性质相关性分析的土壤理化指标部分数据来源于文献 [21], 并使用 Sigmaplot 12.5 制图。

2 结果

2.1 蘑菇圈真菌对植被的影响

单因素方差分析结果表明 (图 2), 在蘑菇圈发生的圈上区域, 植被生物量、含氮量及含磷量均显著高于圈外及圈内区域 ($P < 0.05$)。圈内区域的含氮量显著低于圈外对照 ($P < 0.05$), 而圈内区域的植被磷含量显著高于圈外对照 ($P < 0.05$)。可见, 蘑菇圈的存在显著改变了植被的营养成分。

2.2 蘑菇圈真菌对土壤理化性质的影响

单因素方差分析结果表明 (图 3), 在蘑菇圈发生的圈上区域, 土壤含水量和土壤有效氮含量显著低于圈外对照 ($P < 0.05$)。圈外对照的土壤 pH 显著低于圈上和圈内 ($P < 0.05$), 相反, 圈外对照的土壤电导率显著高于圈上和圈内区域 ($P < 0.05$)。而土壤有效磷含量在圈上区域显著高于圈外和圈内 ($P < 0.05$)。可见, 蘑菇圈的存在显著改变了土壤理化性质。

2.3 蘑菇圈真菌对土壤真菌结构的影响

真菌群落 α -多样性指数分析表明 (图 4), 蘑菇圈发生区域的土壤真菌多样性指数 (香农维纳指数) 显著高于圈外对照 ($P < 0.05$), 且在圈上和圈内区域检测出的真菌数量也显著高于圈外对照 ($P < 0.05$)。

土壤真菌类群相对丰度可分别反映土壤真菌群落组成 (图 5)。科水平分类结果显示, 在蘑菇圈圈上区域伞菌科 (Agaricaceae)、囊担菌科 (Cystobasidiaceae)、戴维迪科 (Davidiellaceae) 和丛赤壳科 (Nectriaceae)

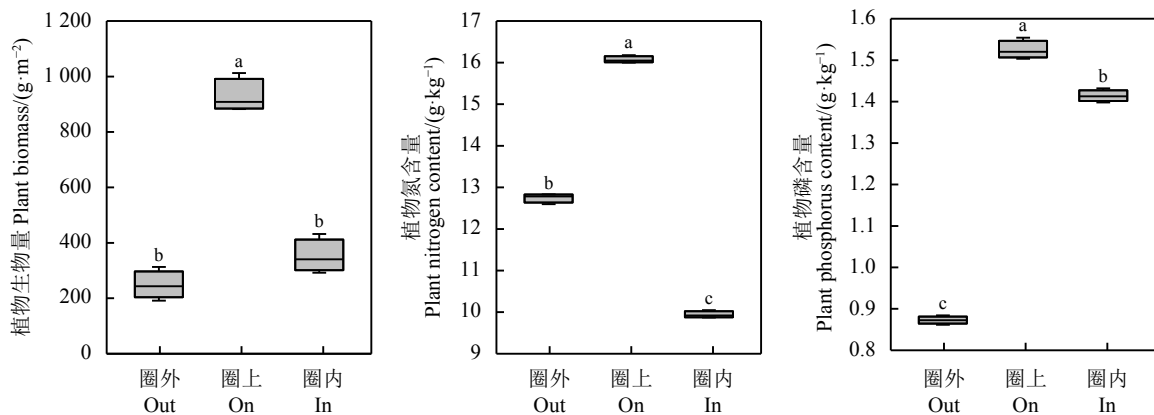


图 2 蘑菇圈不同区域植被生物量及氮磷营养

Figure 2 Plant biomass, nitrogen, and phosphorus concentrations in different zones of fairy rings

不同小写字母表示不同区域处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among different zones at the 0.05 significance level; similarly for the following figures.

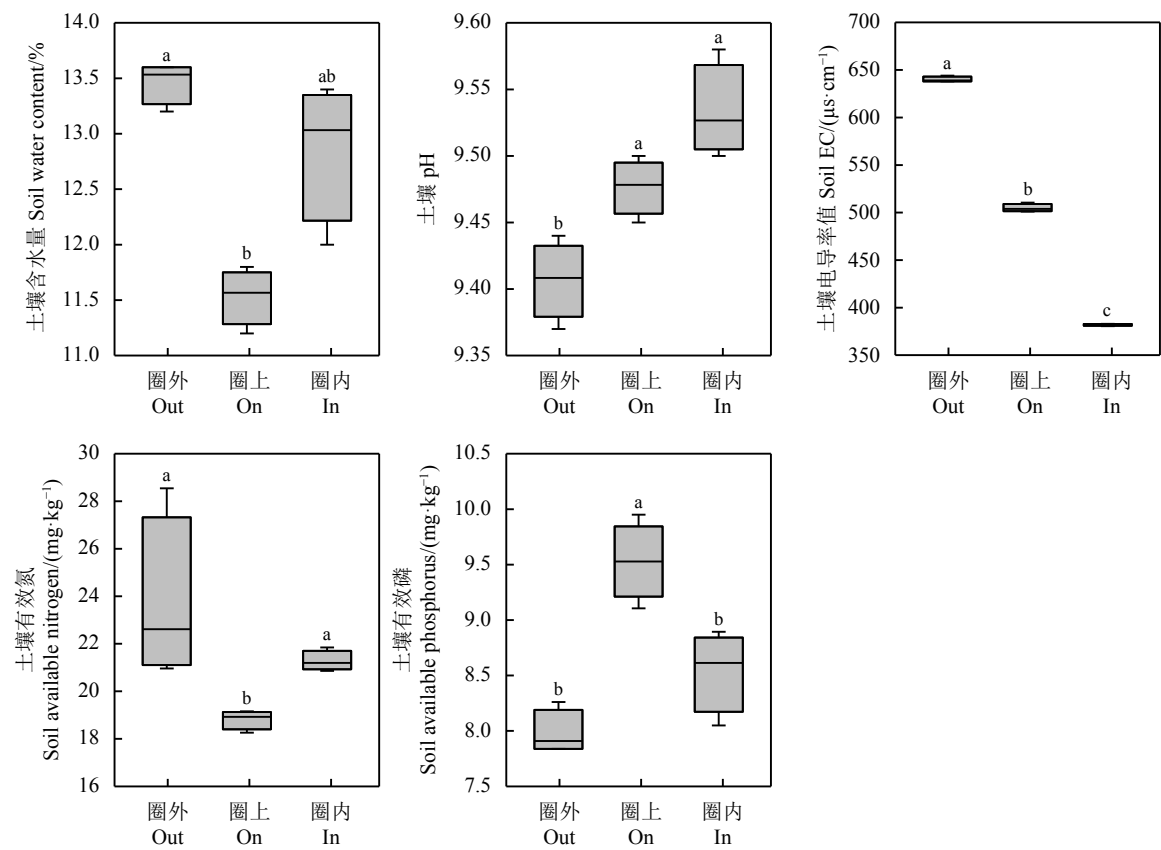


图 3 蘑菇圈不同区域土壤含水量、土壤酸碱度、电导率、土壤有效氮及有效磷含量

Figure 3 Soil water content, pH, EC, and available nitrogen and phosphorus in different zones of fairy rings

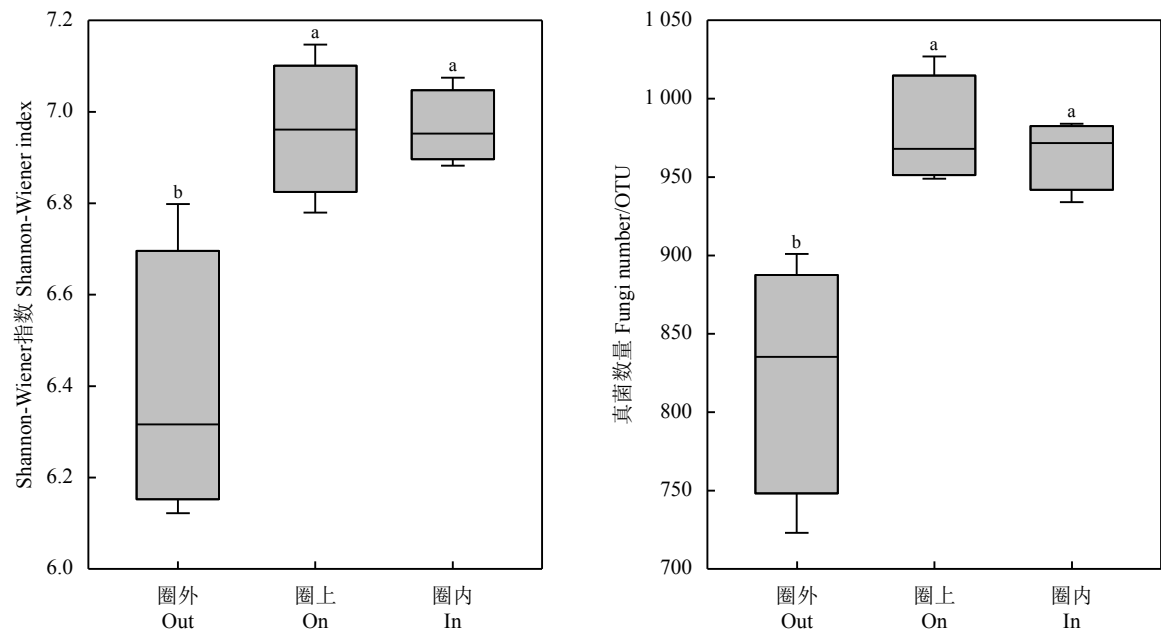


图 4 蘑菇圈不同区域土壤真菌多样性指数及观察到的真菌数量

Figure 4 Soil fungal Shannon-Wiener index and overserved fungi number in different zones of fairy rings

的相对丰度均显著高于圈外区域 ($P < 0.05$), 其中 度同样显著高于圈外区域 ($P < 0.05$)。相反, 对于囊
伞菌科、囊担菌科及丛赤壳科在圈内区域的相对丰 藻科 (Cystofilobasidiaceae)、大壶菌科 (Chytridiaceae)

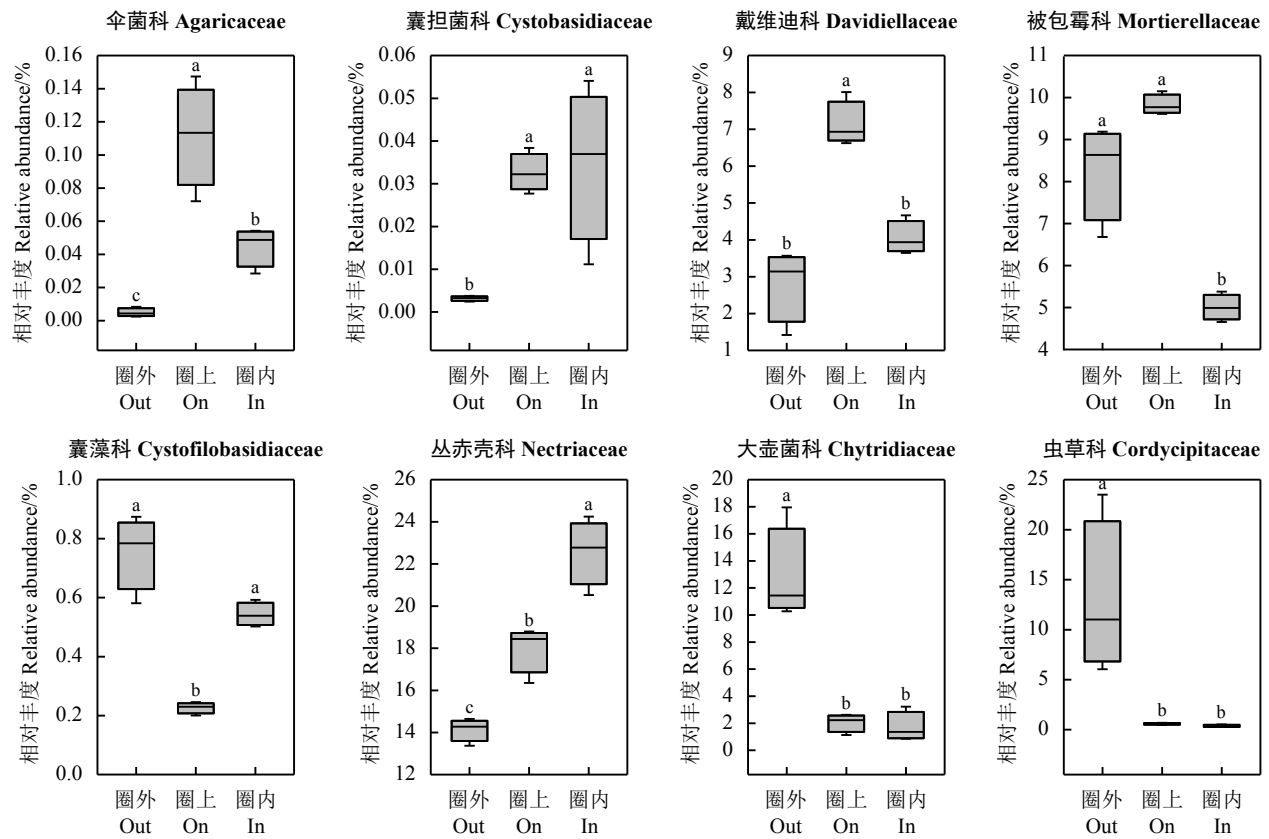


图 5 蘑菇圈不同区域土壤真菌在科水平上的相对丰度

Figure 5 The relative abundance of soil fungi at family levels in different zones of fairy rings

和虫草科 (Cordycipitaceae) 圈外区域的相对丰度要显著高于圈上及圈内 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤真菌结构与土壤理化性质的相关性分析

总体上看，大部分微生物类群与土壤含水量、土壤 pH、电导率、全碳含量和全氮含量等理化指标均呈现或正或负的相关性 (表 1)，说明土壤理化性质的差异是影响土壤微生物组成的重要因素。伞菌科和戴维迪科菌与土壤含水量及有效氮含量均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 负相关关系，同时与土壤有效磷含量呈极显著正相关关系。囊担菌科真菌与土壤电导率呈显著负相关关系，与土壤全碳含量呈极显著负相关关系。被包霉科 (Mortierellaceae)、囊藻科及丛赤壳科真菌与全碳含量均呈显著或极显著正相关关系，同时被包霉科、囊藻科与土壤有效磷含量呈显著或极显著负相关关系。大壶菌科与土壤 pH、全碳含量、全氮含量及全磷含量均呈显著或极显著负相关关系，同时与土壤电导率呈极显著正相关关系。而虫草科真菌与土壤全氮含量及全磷含量均呈极显著正相关关系。

3 讨论与结论

蘑菇圈绿草环上的植物生长较两侧更为浓绿旺盛^[3]。通过调查分析围栏保护的 3 个蘑菇圈上的植物生长状况，植物地上生物量在圈上和圈外正常草区分别为 928.2 和 247.8 g·m⁻²，蘑菇圈上植物生物量提高 3 倍左右，有明显的增产现象^[4, 13]。圈上优势植物羊草的出现频率增加，其株高和株数明显增加，且圈上植被氮含量及磷含量均显著高于圈外，其主要原因是蘑菇圈生草层土壤中速效养分含量较高^[15]，之前有研究发现，圈上区域土壤有效磷含量显著增加，给植被补充了磷元素^[1]，本研究结果进一步表明，蘑菇圈圈上区域土壤含水量显著降低，这可能是由于圈上区域生物量的增加会消耗较多的土壤水分，且植被的蒸腾作用也会带走大量土壤水分。然而，本研究结果发现，在蘑菇圈圈上区域土壤有效氮含量却低于圈外对照区域，这与前人的研究结果不一致。相对于其他营养元素，氮素是植物需求最多的营养元素，由于圈上区域植物的地上生物量提高了 3 倍左右，且圈

表 1 土壤理化性质与主要微生物类群的相关分析

Table 1 Correlation analysis between soil physical and chemical properties and major microbial communities

土壤指标 Soil indicator	伞菌科 Agaricaceae	囊担菌科 Cystobasidiaceae	戴维迪科 Davidiellaceae	被包霉科 Mortierellaceae	囊藻科 Cystofilobasidiaceae	丛赤壳科 Nectriaceae	大壶菌科 Chytridiaceae	虫草科 Cordycipitaceae
含水量 Water content	-0.80*	-0.65	-0.86**	-0.44	0.89**	-0.30	0.66	0.57
pH	0.34	0.46	0.28	-0.47	-0.44	0.85**	-0.86**	-0.51
电导率 Electrical conductivity	0.37	-0.73*	-0.32	0.61	0.49	-0.95**	0.84**	0.72*
全碳 Total carbon	-0.47	-0.78**	-0.43	0.75**	0.60*	0.92**	-0.84**	0.35
全氮 Total nitrogen	0.20	-0.46	0.28	0.26	-0.11	0.50	-0.83**	0.80**
全磷 Total phosphorous	0.28	-0.26	0.36	0.27	-0.23	0.25	-0.69*	0.96**
有效氮 Available nitrogen	-0.65*	-0.46	-0.61*	0.19	0.68*	0.47	-0.30	-0.10
有效磷 Available phosphorus	0.97**	0.57	0.84**	-0.61*	-0.93**	-0.69*	0.34	0.42

*和**分别表示在0.05和0.01水平上显著相关。
* and ** indicates significant correlation at 0.05 and 0.01 significance levels, respectively.

上区域的植物含氮量也高于圈外。因此圈上区域植物会从土壤中带走大量的有效氮，从而降低了土壤中的有效氮含量。

蘑菇圈真菌之所以能提高植被生物量，主要是其改变了土壤理化性质。土壤是土壤微生物赖以生存的环境，土壤微生物必定会受到蘑菇圈真菌的影响^[21]。前人的许多研究结果都表明，圈上土壤中的细菌、放线菌、真菌数量高于圈内和圈外，且细菌 > 放线菌 > 真菌，纤维素分解菌数量也高于圈外^[15-20]。浸麻芽孢杆菌 (*Bacillusmaccrans*) 和德氏食酸菌 (*Acidovoraxdelafieldii*) 在蒙古口蘑圈上数量增加显著，被认为是蒙古口蘑的有益微生物^[15-16]。蘑菇圈产生菌菌丝能刺激细菌类群的生长和繁殖。最新的研究进一步表明，只有在蘑菇圈真菌

发生过的区域，即圈上及圈内区域检测出微杆菌科 (*Microbacteriaceae*) 的细菌^[19]。本研究在分析土壤真菌结构时发现，在蘑菇圈圈上区域伞菌科、囊担菌科、戴维迪科和丛赤壳科的相对丰度均显著高于圈外区域，其中伞菌科、囊担菌科及丛赤壳科在圈内区域的相对丰度同样显著高于圈外区域。相关分析表明了影响其分布的土壤因子。土壤有机质含量及土壤有效磷含量是影响土壤真菌结构的主要土壤因子。

综上所述，蘑菇圈真菌的存在改变了土壤的理化性质，活化土壤养分，增加植被生物量及营养状况，且土壤理化性质的改变对土壤真菌结构的影响显著。植被-土壤-微生物是草地生态系统的主体，其中任意一个因素的改变会影响其他两个因素。

参考文献 References:

[1] 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.

[2] 宋超, 图力古尔. 蘑菇圈形成机理及其生态学意义. *中国食用菌*, 2007, 26(6): 9-13.

SONG C, TOLGOR. Fairy ring formation mechanism and its ecological significance. *Edible Fungi of China*, 2007, 26(6): 9-13.

[3] FOX R T V. Fungal foes in your garden: Fairy ring mushrooms. *Mycologist*, 2006, 20: 36-37.

[4] 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): 1421-1425.

CHEN L H, YAN W, LIU J. Preliminary study of the effects of fairy ring of grassland on the growth of herbage. *Acta Botanica*

- [Boreali-Occidentalia Sinica](#), 2002, 22(6): 1421-1425.
- [5] CAESAR-TONTHAT T C, ESPELAND E, CAESAR A J, SAINJU U M, LARTEY R T, GASKIN J F. Effects of *Agaricus liliceps* 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: 120-131.
- [6] XU X L, OUYANG H, CAO G M, RICHTER A, WANEK W, KUZYAKOV Y. Dominant plant species shift their nitrogen uptake patterns in response to nutrient enrichment caused by a fungal fairy in an alpine meadow. [Plant Soil](#), 2011, 341: 495-504.
- [7] ALBRECHT W A, SHELDON V L, BLUE W G. "Fairy ring" mushrooms made protein-rich grass. [Bulletin of the Torrey Botanical Club](#), 1951, 78: 83-88.
- [8] FISHER R P. Nitrogen and phosphorus mobilization by the fairy ring fungus, *Marasmius oreades* (Bolt.) Fr.. *Soil Biology and Biochemistry*, 1977(9): 239-241.
- [9] EDWARDS P J. The growth of fairy rings of *Agaricus arvensis* and their effect upon grassland vegetation and soil. [Journal of Ecology](#), 1984, 72(2): 505-513.
- [10] EDWARDS P J. Effects of the fairy ring fungus *Agaricus arvensis* on nutrient availability in grassland. *New Phytologist*, 1988, 111: 377-381.
- [11] BONANOMI G, MINGO A, INCERTI G, MAZZOLENI S, ALLEGREZZA M. Fairy rings caused by a killer fungus foster plant diversity in species-rich grassland. [Journal of Vegetation Science](#), 2012, 23: 236-248.
- [12] 雷茜, 王文颖. 野生黄蘑菇圈对草地植物及土壤的影响. 西北民族学院学报(自然科学版), 2000, 21(2): 41-46.
LEI Q, WANG W Y. The growth of fairy rings of *Armillaria luteo-virens* and their effect upon grassland vegetation and soil. *Journal of Northwest Minorities University(Natural Science)*, 2000, 21(2): 41-46.
- [13] 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.
ZHAO J, SHAO Y Q, BAO Q H. Soil vegetation system surround the fairy ring in steppe. [Chinese Journal of Ecology](#), 2003, 22(5): 43-46.
- [14] 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.
WANG Q L, JIANG W B, CHEN B. Effects of fairy ring growth of *Armillaria luteo-virens* on soil fertility and plant community. [Chinese Journal of Ecology](#), 2005, 24(3): 269-272.
- [15] 赵吉, 邵玉琴, 包青海, 贾复珠. 蒙古口蘑菇圈及两侧的土壤细菌分布的比较研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1999, 30(1): 101-102.
ZHAO J, SHAO Y Q, BAO Q H, JIA F Z. A comparative study on distribution of the bacteria in soil around fairy rings of *Tricholoma mongolicum*. *Journal of Inner Mongolia University(Natural Science)*, 1999, 30(1): 101-102.
- [16] KIM M, YOON H, KIM Y E, KIM Y J. Comparative analysis of bacterial diversity and communities inhabiting the fairy ring of *Tricholoma matsutake* by barcoded pyrosequencing. [Journal of Applied Microbiology](#), 2014, 117: 699-710.
- [17] OH S Y, FONG J J, PARK M S, LIM Y W. Distinctive feature of microbial communities and bacterial functional profiles in *Tricholoma matsutake* dominant soil. *PLoS ONE*, 2016, 11: e016857.
- [18] 邵玉琴, 赵吉. 蒙古口蘑菇圈土壤微生物类群的分布研究. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2000, 31(1): 81-83.
SHAO Y Q, ZHAO J. A study on soil microbial distribution in the fairy rings of *Tricholoma mongolicum*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 2000, 31(1): 81-83.
- [19] 邵玉琴, 赵吉. 草原蘑菇圈中土壤微生物类群数量的动态分布研究. [中国草地](#), 2000, 23(1): 47-50.
SHAO Y Q, ZHAO J. Study on dynamic distribution of soil microbial number of the fairy ring in steppe. [Grassland of China](#), 2000, 23(1): 47-50.
- [20] XING R, YAN H Y, GAO Q B, ZHANG F Q, WANG J L, CHEN S L. Microbial communities inhabiting the fairy ring of *Floccularia luteovirens* and isolation of potential mycorrhiza helper bacteria. [Journal of Basic Microbiology](#), 2018, 58: 554-563.
- [21] 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.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

(责任编辑 王芳)