

DOI:10.11686/cyxb2017171

http://cyxb.lzu.edu.cn

姚静, 陈金强, 辛晓平, 卫智军, 乌仁其其格, 闫瑞瑞, 白玉婷, 代景忠. 复合微生物肥料对羊草草原植物群落物种多样性和生物量的影响. 草业学报, 2017, 26(10): 108-117.

YAO Jing, CHEN Jin-Qiang, XIN Xiao-Ping, WEI Zhi-Jun, WU REN Qi-Qi-Ge, YAN Rui-Rui, BAI Yu-Ting, DAI Jing-Zhong. Effect of combined microbial fertilizer on plant species diversity and biomass of common species in the Hulunbuir *Leymus chinensis* meadow steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(10): 108-117.

复合微生物肥料对羊草草原植物群落物种多样性和生物量的影响

姚静¹, 陈金强¹, 辛晓平¹, 卫智军², 乌仁其其格³, 闫瑞瑞^{1*}, 白玉婷², 代景忠²
(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081; 2. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 3. 呼伦贝尔学院生命科学与化学学院, 内蒙古 海拉尔 021008)

摘要: 为了解草原植物群落物种多样性和植物地上生物量对施加复合微生物肥料的响应, 在内蒙古呼伦贝尔羊草草原, 分别设置对照(CK)、单施腐殖酸复合微生物肥料(F)、蜜糖发酵复合微生物肥料(T)、海藻酸复合微生物肥料(H)、3种复合微生物肥料混合施入(F+T+H)、腐殖酸加菌剂复合微生物肥料(F+J)和海藻酸加菌剂复合微生物肥料(H+J)7个处理, 研究复合微生物肥料对草原群落植物物种多样性和植物地上生物量的影响。结果表明: (1) 与对照组相比, 2014—2016年施加F、H植物群落特征无明显变化, 施加F+T+H植物群落密度分别增加了26.72%、17.94%、34.64%, 地上生物量分别增加了7.18%、49.97%、47.64%, 其他施肥处理群落特征各年变化不同; (2) 2014—2016年施加F植物群落主要物种的重要值无明显变化, 施加T、H、F+T+H、H+J禾本科、豆科植物重要值增加, 根茎型禾草(羊草等)对复合微生物肥料添加的响应显著高于丛生型禾草和莲座型菊科植物等草类; (3) 2014—2016年施加F, Margalef指数分别比对照组减小了16.40%、5.22%、37.22%, 施加H各指数无明显变化, 施加F+T+H, Margalef指数、Shannon—Wiener指数、Pielou指数均增加; 2014和2015年施加H+J的Pielou指数分别比对照组增高了7.62%、8.70%。上述结果说明, 施加复合微生物肥料对羊草草原植物群落物种多样性和植物地上生物量有显著的影响, 其中F+T+H植物群落物种多样性和植物地上生物量显著增加, 此外还应充分考虑施肥年降水量, 从而实现对草地资源的合理修复。

关键词: 微生物肥料; 群落特征; 物种重要值; 物种多样性

Effect of combined microbial fertilizer on plant species diversity and biomass of common species in the Hulunbuir *Leymus chinensis* meadow steppe

YAO Jing¹, CHEN Jin-Qiang¹, XIN Xiao-Ping¹, WEI Zhi-Jun², WU REN Qi-Qi-Ge³, YAN Rui-Rui^{1*}, BAI Yu-Ting², DAI Jing-Zhong²

1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hulunbuir Grassland Ecosystem Research Station, Beijing 100081, China; 2. College of Grassland and Resources Environmental, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 3. Life Science and Chemistry School at Hulunbuir College, Hailar 021008, China

Abstract: The aim of this study was to evaluate the responses of grassland plant species diversity and the

收稿日期: 2017-04-06; 改回日期: 2017-05-12

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303060), 国家重点研发计划(2016YFC0500601), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132016033, 1610132016027)和现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-35-11)资助。

作者简介: 姚静(1988-), 女, 内蒙古通辽人, 科研助理, 在读硕士。E-mail: 3766374474@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yanrui19790108@163.com

aboveground biomass of several common plant species to microbial fertilizer. We set up a factorial experiment to test the interactive effect of six microbial fertilizers in the *Leymus chinensis* meadow steppe in Hulunbuir in August 2014–2016. The seven treatments were as follows: control (CK), humic acid (F), alginic acid (H), fermented molasses (T), humic acid+fermented molasses+alginic acid (F+H+T), humic acid+compound microbial inoculant (F+J), and alginic acid+compound microbial inoculant (H+J). The results showed that addition of F and H from 2014 to 2016 did not significantly affect plant communities. Addition of F+H+T in 2014, 2015, and 2016 increased plant density by 26.72%, 17.92%, and 34.64%, respectively, and increased aboveground biomass by 7.18%, 49.97%, and 47.64% respectively. Addition of F from 2014 to 2016 did not significantly affect the plant community, but addition of T, H, F+H+T, and H+J increased the importance of the *Gramineae* and *Leguminosae*. Rhizome-type grasses (*L. chinensis*) showed greater responses to compound microbial fertilizers than did clonal grasses and rosette grasses. Addition of F in 2014, 2015, and 2016 decreased the Margalef index by 16.40%, 5.22%, and 37.22%, respectively. Addition of H in 2014–2016 did not affect the diversity index, but addition of F+H+T in 2014–2016 increased the Margalef index, the Shannon–Wiener index, and the Pielou index. Addition of H+J in 2014 to 2015 increased the Pielou index by 7.62% and 8.70%, respectively. These results show that application of microbial fertilizer can significantly affect the plant community, species diversity, and aboveground biomass in the Hulunbuir *L. chinensis* meadow steppe. The combination of F+T+H had the strongest effect to increase plant community species diversity and aboveground biomass. Precipitation should also be taken into consideration in the restoration of grassland resources.

Key words: microbial fertilizer; plant community trait; species important value; species diversity

物种多样性是群落生物组成结构的一项重要指标,反映了群落组织化水平,可使生物群体的功能特征发生变化,从而可能导致生态系统结构与功能的改变。生态系统中物种多样性的维持是全球生物多样性与生态管理的中心目标之一,不同物种在资源利用效率与途径、与其他物种相互作用中的竞争能力及对干扰的响应等方面均不相同,因此物种多样性对人类干扰(如施肥、放牧、刈割)响应与适应机制成为近年来生态研究的热点问题^[1-2]。将干扰与物种多样性的变化相结合是进行生态系统资源管理和保护规划的基础^[3],揭示植物群落中物种多样性在不同扰动因子和扰动时间影响下的变化规律非常重要。

合理、平衡施肥可增加土壤肥力,改善草地植物群落结构,有助于草地生产力的恢复^[4-5],已成为保护草地资源、维持草原生态系统养分平衡、恢复退化草地的重要管理措施。近年来研究表明,过量施用化肥会引起土壤板结、重金属污染、水体富营养化、淋溶污染地下水,导致草原土壤酸化、营养失衡、生物多样性减少、生产力降低、草地退化等严重威胁到草原生态系统功能^[6-7]。在此背景下,微生物肥料的开发和应用逐渐成为热点^[8-9]。研究表明,将微生物肥料与有机肥混播,不仅能提供作物生长所需的大量元素氮、磷、钾和中微量元素,还能为作物提供有机物质和有益微生物活性菌、疏松土壤、溶磷解钾、培肥地力^[10-11]。微生物肥料的应用范围从最初的豆科植物到粮食农作物再到现在的蔬菜、烟草、花卉等经济及观赏植物,在农业生产占据重要的位置,应用到天然草原生态系统植被和土壤改善中较少^[12]。单玉梅等^[13]比较了复合微生物肥料下科尔沁区天然打草场地下生物量的不同,权国玲等^[14]研究了复合微生物肥料对羊草(*Leymus chinensis*)草原土壤理化性质及酶活性的影响,塔娜^[15]研究了施加微生物肥料天然打草场牧草的生长状况和土壤特性,然而复合微生物肥料添加对羊草草甸植物生态系统多样性影响的研究还鲜见。

呼伦贝尔草原地处西伯利亚冬季风入侵我国东北的大通道上,与大兴安岭相连,成为我国东北地区一道强大的生态防护屏障^[16]。长期以来由于自然和人为因素的影响,部分典型草原发生大面积沙化,给当地的畜牧业生产和人民生活造成巨大威胁,严重阻碍了社会经济可持续发展,因此修复与重建其生态系统是极其紧迫、至关重要的工作。仅靠自然恢复植被难度大、见效慢,只有辅助人为干扰才能加速退化草地的修复与重建。近年来,草地生态系统的退化机理及退化草地恢复途径的研究已成为草地生态学的研究热点之一^[17]。本试验通过对呼伦

贝尔羊草草甸草原进行复合微生物肥料的添加,研究其对植物群落多样性及生物量的影响,理论上深入理解其退化机理,揭示退化驱动力,实践上为防止其进一步退化,恢复和提高草原生产力提供研究价值。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于呼伦贝尔市海拉尔区谢尔塔拉,地理位置 N 49°37′051″,E 119°99′219″,是大兴安岭西麓丘陵向蒙古高原的过渡区,海拔 627~635 m。该地区属于中温带半干旱大陆性气候,年均气温 -2.4℃,极端最高、最低气温分别为 36.17 和 -48.5℃,≥10℃年积温 1580~1800℃,无霜期为 95~110 d,年平均降水量 350~400 mm,多集中在 7—9 月,且变率较大,2014、2015、2016 年气象资料从呼伦贝尔气象局获取,研究区降雨量及温度见图 1。土壤为黑钙土或栗钙土,土层厚 30~40 cm,有机质含量 5.10%。植被为草甸草原羊草群落。主要建群种有羊草、亚优势种贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、日阴营(*Carex pediformis*)等,伴生种有斜茎黄芪(*Astragalus adsurgens*)、山野豌豆(*Vicia amoena*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)等。

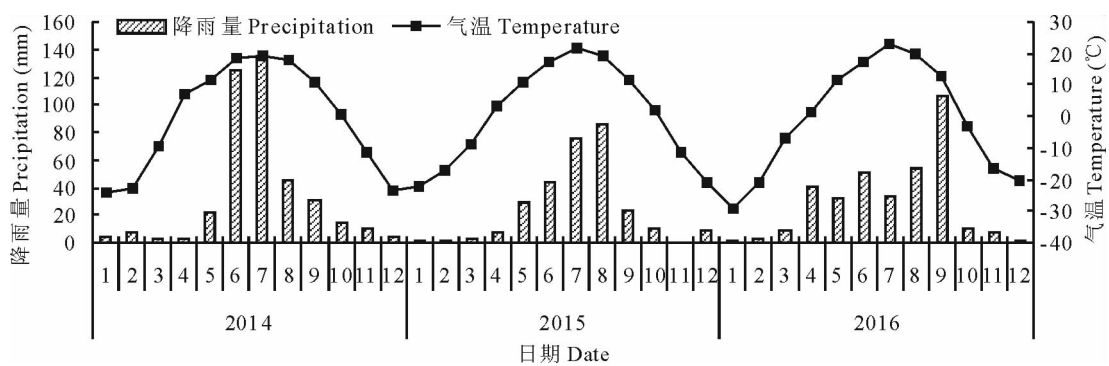


图 1 研究区域气温和降雨量变化

Fig. 1 Monthly precipitation and temperature in 2014–2015 for the experiment plot

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 试验地为呼伦贝尔羊草草甸草原打草场,2013 年 7 月对试验样地进行植物群落调查,2014 年 5 月选择地势平坦、植被分布均匀的代表性天然打草场进行围封,建立试验区。分别在 2014、2015 和 2016 年 6 月生长季节之初一次性均匀施撒肥料。本试验采用随机区组设计,根据该地的长期试验资料及土壤本底调查^[18-20],设置对照(CK)、单施腐殖酸复合微生物肥料(F)、蜜糖发酵复合微生物肥料(T)、海藻酸复合微生物肥料(H)、3 种复合微生物肥料混合施入(F+T+H)、腐殖酸加菌剂复合微生物肥料(F+J)和海藻酸加菌剂复合微生物肥料(H+J)7 个处理,微生物肥料的施入量如表 1 所示。每个处理重复 3 次,小区面积 30 m²(6 m×5 m),行距 2 m,共 21 个试验小区。

1.2.2 采样及处理 于 2014—2016 年每年 8 月初植物生长最旺盛的季节,采用样方法对各个小区进行植被调查。调查指标主要包括植被盖度、高度、密度。调查样方面积为 1 m²(1 m×1 m),剪取样方内植物地上部分,分类装至信封袋,带回实验室 65℃下烘干至恒重,称得地上生物量。

1.3 物种多样性测度

分种计算重要值,重要值=(相对密度+相对盖度+相对生物量)/3。式中:相对密度为某一物种的密度占全部物种密度之和的百分比;相对盖度为某一物种的分盖度占有所有分盖度之和的百分比;相对生物量为某一物种的生物量占全部物种生物量之和的百分比^[21]。将样方内不同植物按形态分类学归类,分别为禾本科(Gramineae)、豆科(Leguminosae)、毛茛科(Ranunculaceae)、莎草科(Cyperaceae)、菊科(Asteraceae)和杂草类 6 类主要植物。

物种多样性选用 Shannon—Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 指数,进行多样性测度^[22],其计算公式如下。

$$\text{Shannon—Wiener 指数: } H = -\sum P_i \ln P_i$$

Simpson 指数: $D=1-\sum P_i^2$

Pielou 均匀度指数: $J=H/\ln S$

Margalef 指数: $M=(S-1)/\ln N$

式中: P_i 为样方中种 i 的相对重要值; $P_i=N_i/N$; N_i 为种 i 的重要值; N 为种 i 所在样方的各个种的绝对重要值之和; S 为物种数目。

表 1 施微生物肥料改良试验设计和肥料用量
Table 1 Microbial fertilizer improved experimental design and fertilizer use

| 代号 Code | 处理 Treatments | 肥料生产公司 Production company | 有效活菌数 Living bacteria count | 施肥用量 Fertilizer application norm |
|------------|---|---|---|---|
| CK | 对照 Control | — | — | 0 |
| F | 腐殖酸 Humic acid | 福建诏安绿洲生化有限公司“绿乌龙”Fujian Zhaoan Oasis Biochemical co., LTD production of “green goal” | 有效活菌数>0.2 亿/g。Effective number of living bacterium is >0.2 billion/g. | 75 g/m ² |
| T | 糖蜜发酵 Molasses fermentation | 辽宁三色微谷有限公司“三色原菌剂” Liaoning Trichromatic Valley co., LTD production of “three color the original bacterium agent” | 有效活菌数>20 亿/g。Effective number of living bacterium is >20 billion/g. | 6 mL/m ² |
| H | 海藻酸 Alginic acid | 青岛明月海藻集团“五菌天王” Qingdao Bright Moon Seaweed Company production of “five bacteria pop” | 有效活菌数>0.2 亿/g。Effective number of living bacterium is >0.2 billion/g. | 75 g/m ² |
| F+T +H | 腐殖酸+糖蜜发酵+海藻酸 Humic acid+alginic acid+ molasses fermentation | 综合 3 种肥料 Add humic acid, alginic acid, molasses fermentation together | | 25 g/m ² +6 mL/m ² + 25 g/m ² |
| F+J | 腐殖酸+复合微生物菌剂 Humic acid+compound microbial inoculant | 复合微生物菌剂北京丹路生物工程有限公司 “复合微生物菌剂” Beijing Dan Road Biological Engineering co., LTD., production of “Compound Microbial Inoculant” | 有效活菌数>2.0 亿/g。Effective number of living bacterium is >2.0 billion/g. | 75 g/m ² +30 g/m ² |
| H+J | 海藻酸+复合微生物菌剂 Alginic acid+Compound microbial inoculant | | | 75 g/m ² +30 g/m ² |

1.4 数据分析

采用 Excel 2013 软件进行数据整理作图,SPSS 21.0 软件进行数据分析。利用单因素分析(One-Way ANOVA)对植被高度、盖度、密度和多样性指数进行方差分析,并用 Duncan 检验进行平均值之间的多重比较,显著性水平设为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 草原植物群落特征的比较

微生物肥料处理对羊草草原植物群落高度、盖度、密度及地上生物量均产生了不同影响,如表 2 所示。2014 年 T 处理下植物群落盖度为 61.38%,地上生物量为 280.93 g/m²,均高于对照组,群落密度为 736.89 株/m²,显著高于对照组($P<0.05$);F+T+H 处理下植物群落盖度为 61.42%,地上生物量为 269.91 g/m²,均高于对照组,群落密度为 758.67 株/m²,显著高于对照组($P<0.05$);H+J 处理下植物群落盖度显著大于对照组($P<0.05$),群落地上生物量最小为 206.96 g/m²。2015 年 T 处理下植物群落盖度最大为 48.27%,F+T+H、H+J 植物群落密度最大分别为 593.67 和 553.33 株/m²,群落地上生物量均显著大于对照组($P<0.05$)。2016 年 T、

F+J处理下植物群落高度显著高于对照组($P<0.05$);F+T+H 处理下植物群落密度、地上生物量均显著大于对照组($P<0.05$);H+J 处理下植物群落高度、盖度、密度、地上生物量均显著大于对照组($P<0.05$)。结果表明,2014 年 H+J 处理下植物群落盖度比对照组高 35.75%,但群落地上生物量比对照组减小了 17.82%,2015、2016 年植物群落密度分别比对照组高 9.99%、24.52%,群落地上生物量分别比对照组高 45.83%、37.25%;2016 年 F+J 处理下植物群落高度、盖度、地上生物量分别比对照组高 33.10%, 14.13%, 14.58%,但植物群落密度比对照组减小了 5.90%;与对照组相比,2014—2016 年 F、H 处理下植物群落特征无明显变化, F+T+H 处理下植物群落密度分别增加了 26.72%、17.94%、34.64%,地上生物量分别增加了 7.18%、49.97%、47.64%。

表 2 施加微生物肥料对植物群落特征的影响

Table 2 Effect of combined microbial fertilizer on plant communities

| 年份 Years | 处理 Treatment | 群落高度 Community height (cm) | 群落盖度 Community coverage (%) | 群落密度 Community density (株 Plant/m ²) | 群落地上生物量 Aboveground biomass of plant community (g/m ²) |
|-------------|-----------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|--|
| 2014 | CK | 25.55±4.49a | 49.11±5.82b | 598.67±58.97bc | 251.83±23.23ab |
| | F | 29.89±6.87a | 49.18±7.46b | 626.22±42.84b | 245.45±43.23ab |
| | T | 25.95±2.37a | 61.38±5.89ab | 736.89±43.62a | 280.93±6.26a |
| | H | 26.97±7.98a | 59.51±4.17b | 591.56±38.65bc | 267.32±32.93ab |
| | F+T+H | 27.38±5.15a | 61.42±7.30ab | 758.67±31.44a | 269.91±29.18ab |
| | F+J | 25.77±4.75a | 53.51±8.34b | 594.67±40.60bc | 223.88±15.73ab |
| | H+J | 29.13±2.61a | 76.44±10.89a | 633.78±56.86b | 206.96±16.80b |
| 2015 | CK | 22.87±3.91a | 40.90±6.85a | 503.33±43.65b | 155.62±37.41b |
| | F | 19.62±4.74a | 38.63±4.91a | 508.33±17.62b | 172.34±18.38ab |
| | T | 20.41±5.47a | 48.27±4.61a | 536.33±46.01b | 205.88±14.26ab |
| | H | 23.59±4.55a | 36.17±3.88a | 491.67±13.01b | 185.19±10.69ab |
| | F+T+H | 23.02±5.79a | 41.00±2.00a | 593.67±27.93a | 233.38±32.91a |
| | F+J | 21.68±1.88a | 45.03±6.16a | 481.33±50.84b | 185.94±15.50ab |
| | H+J | 22.26±3.66a | 38.10±5.37a | 553.33±88.82ab | 226.95±30.97a |
| 2016 | CK | 20.54±5.46c | 52.87±4.19bc | 458.00±36.10b | 169.01±12.75c |
| | F | 21.94±2.70c | 49.63±3.91c | 583.33±60.48a | 143.47±17.27c |
| | T | 25.46±4.83a | 62.77±2.22ab | 572.00±19.08a | 206.55±13.65bc |
| | H | 20.85±3.57c | 54.07±3.48bc | 577.33±55.87a | 183.53±13.23bc |
| | F+T+H | 22.11±4.12bc | 57.60±2.26bc | 616.67±8.33a | 249.54±12.74a |
| | F+J | 27.34±5.44a | 60.43±2.44ab | 431.00±18.00b | 193.66±10.56bc |
| | H+J | 24.62±4.78ab | 66.63±2.50a | 570.33±44.50a | 231.98±22.66ab |

注:同列数值后不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

Note: Different letters within the same column show significant difference at $P<0.05$. Same letters within the same column show no significant difference at $P>0.05$. The same blow.

2.2 草原植物群落主要物种重要值的比较

微生物肥料处理对羊草草原植物群落主要物种禾本科、豆科、毛茛科、菊科、莎草科、杂草类均产生了不同影响,如表 3 所示。与对照组相比,2014 年 T 处理下禾本科植物重要值最大为 51.63,杂草类植物重要值显著小于对照组($P<0.05$),F+T+H、F+J 处理下豆科植物重要值最大分别为 18.36、17.95,H+J 处理下毛茛科植物重要值显著大于对照组($P<0.05$);2015 年 F、T、F+J 处理下菊科植物重要值均显著小于对照组($P<0.05$),H 处

理下菊科植物重要值为 6.36, 显著小于对照组 ($P<0.05$), F+T+H 处理下禾本科、豆科植物重要值较大分别为 38.14、8.88, 其中豆科植物重要值显著大于对照组 ($P<0.05$), H+J 处理下豆科、毛茛科植物重要值大于对照组; 2016 年 F、T、H 处理下毛茛科植物重要值均显著小于对照组 ($P<0.05$), F+T+H 处理下禾本科植物重要值为 39.46, 显著高于对照组 ($P<0.05$), F+J 处理下豆科植物重要值为 8.02, 显著大于对照组 ($P<0.05$), H+J 处理下禾本科、豆科、菊科植物重要值均显著大于对照组 ($P<0.05$)。结果表明, 2014 年 T 处理下禾本科植物重要值比对照组高 9.59%、杂草类植物重要值比对照组小 38.55%, F+T+H、F+J 处理下豆科植物重要值分别比对照组高了 23.47%、20.71%; 2014、2015 年 H 处理下菊科植物重要值比对照组分别减小了 60.42%、55.08%; 2015、2016 年 F+T+H 处理下禾本科植物重要值分别增加了 3.64%、43.44%, 豆科植物重要值分别增加了 50.00%、18.80%, H+J 处理下豆科植物重要值分别增加了 76.35%、73.77%; 2014—2016 年 F 处理下植物群落主要物种重要值无明显变化。

表 3 施加微生物肥料对植物群落物种重要值的影响
Table 3 Effect of combined microbial fertilizer on species important value

| 年份 Years | 处理 Treatment | 禾本科 Gramineae | 豆科 Leguminosae | 毛茛科 Ranunculaceae | 菊科 Compositae | 莎草科 Cyperaceae | 杂草类 Others |
|-------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------------|------------------|-------------------|---------------|
| 2014 | CK | 47.11±6.14a | 14.87±4.31ab | 13.45±2.86c | 14.30±1.78ab | 9.82±1.75a | 25.63±3.08ab |
| | F | 49.24±7.54a | 12.85±2.49ab | 16.16±4.97bc | 8.23±1.42cd | 6.70±1.00a | 18.54±3.91cd |
| | T | 51.63±14.85a | 15.67±2.62ab | 17.30±1.96bc | 8.83±1.50cd | 6.17±1.37a | 15.75±2.31d |
| | H | 49.63±6.88a | 11.36±2.81b | 18.25±1.75ab | 5.66±0.96d | 7.61±1.59a | 24.81±4.26ab |
| | F+T+H | 46.89±5.80a | 18.36±2.78a | 16.66±3.32bc | 12.46±2.19ab | 7.07±2.09a | 28.06±3.91a |
| | F+J | 48.31±7.06a | 17.95±3.65a | 19.88±2.62ab | 14.36±1.80ab | 8.36±1.86a | 24.30±3.64abc |
| | H+J | 49.21±9.24a | 11.00±2.03b | 24.23±3.50a | 16.70±4.25a | 6.37±1.53a | 23.39±1.62abc |
| 2015 | CK | 36.80±6.32a | 5.92±0.91b | 18.20±2.51b | 14.16±1.65a | 10.18±1.11b | 27.16±3.59ab |
| | F | 30.14±4.00ab | 4.88±1.60b | 26.24±2.76ab | 6.10±1.02bc | 8.05±1.36b | 35.25±4.33a |
| | T | 32.26±5.45ab | 5.40±1.53b | 23.33±3.40ab | 9.61±0.62ab | 7.89±1.17b | 22.15±2.96b |
| | H | 30.86±4.19ab | 5.20±0.87b | 31.63±3.60a | 6.36±1.20bc | 10.23±1.06b | 30.39±2.46ab |
| | F+T+H | 38.14±9.57a | 8.88±1.07a | 20.99±3.54b | 8.68±1.49ab | 9.41±0.70b | 26.89±4.31ab |
| | F+J | 32.15±4.78ab | 5.72±0.47b | 27.07±3.88ab | 5.73±0.96c | 7.68±1.01b | 27.55±3.09ab |
| | H+J | 33.74±3.98ab | 10.44±1.11a | 18.23±3.76b | 9.13±1.38ab | 14.53±2.55a | 21.15±4.56b |
| 2016 | CK | 27.51±3.55b | 4.68±1.21c | 30.54±1.11a | 3.85±0.56b | 7.46±1.47abc | 24.63±4.16a |
| | F | 33.48±2.20ab | 4.69±1.03c | 26.36±9.61b | 3.64±1.00b | 5.71±1.68bc | 23.97±3.14a |
| | T | 35.47±3.56ab | 5.94±0.95bc | 23.19±3.56b | 6.31±1.13ab | 6.94±0.87abc | 26.33±5.28a |
| | H | 35.97±4.94ab | 4.71±1.05c | 28.13±3.25b | 6.74±1.96ab | 9.55±1.49a | 26.84±3.83a |
| | F+T+H | 39.46±6.14a | 5.56±0.82bc | 28.25±5.14b | 7.13±1.48a | 8.52±1.03ab | 26.28±6.08a |
| | F+J | 27.56±3.77b | 8.02±1.06ab | 29.46±3.44ab | 3.65±0.87b | 9.24±1.43a | 28.67±2.78a |
| | H+J | 38.82±6.06a | 8.13±1.29a | 25.84±2.62b | 9.33±1.23a | 4.83±0.61c | 23.99±4.98a |

2.3 草原植物群落物种多样性的比较

微生物肥料处理对羊草草原植物群落物种丰富度 Margalef 指数、多样性 Shannon—Wiener 指数、优势度 Simpson 指数、均匀度 Pielou 指数均产生了不同影响, 如图 2 所示。2014 年 F 处理下 Margalef 指数最小为 2.09; F+T+H 处理下 Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数均大于对照组, 分别为 2.97、1.14, 且 Pielou 指数显著大于对照组 ($P<0.05$); F+J、H+J 处理下 Pielou 指数分别为 1.13、1.15, 均显著大于对照组 ($P<0.05$)。2015 年 F 处理下 Shannon—Wiener 指数最小为 2.53; F+T+H 处理下 Margalef 指数显著大于对照组 ($P<$

0.05);H+J处理下 Margalef 指数、Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数最大,分别为 3.04、2.73、1.00,且 Margalef 指数显著大于对照组($P<0.05$)。2016 年 F 处理下 Margalef 指数为 1.40,显著小于对照组($P<0.05$);与对照组相比,T 处理下 Simpson 指数最小为 0.11;F+T+H 处理下 Margalef 指数、Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数最大,分别为 2.31、2.65、0.90,且 Shannon—Wiener 指数显著大于对照组($P<0.05$)。结果表明,2014—2016 年 F 处理下 Margalef 指数分别比对照组减小了 16.40%、5.22%、37.22%,H 处理下各指数无明显变化,F+T+H 处理下 Margalef 指数、Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数均增加;2014、2015 年 H+J 处理下 Pielou 指数分别比对照组增高了 7.62%、8.70%。

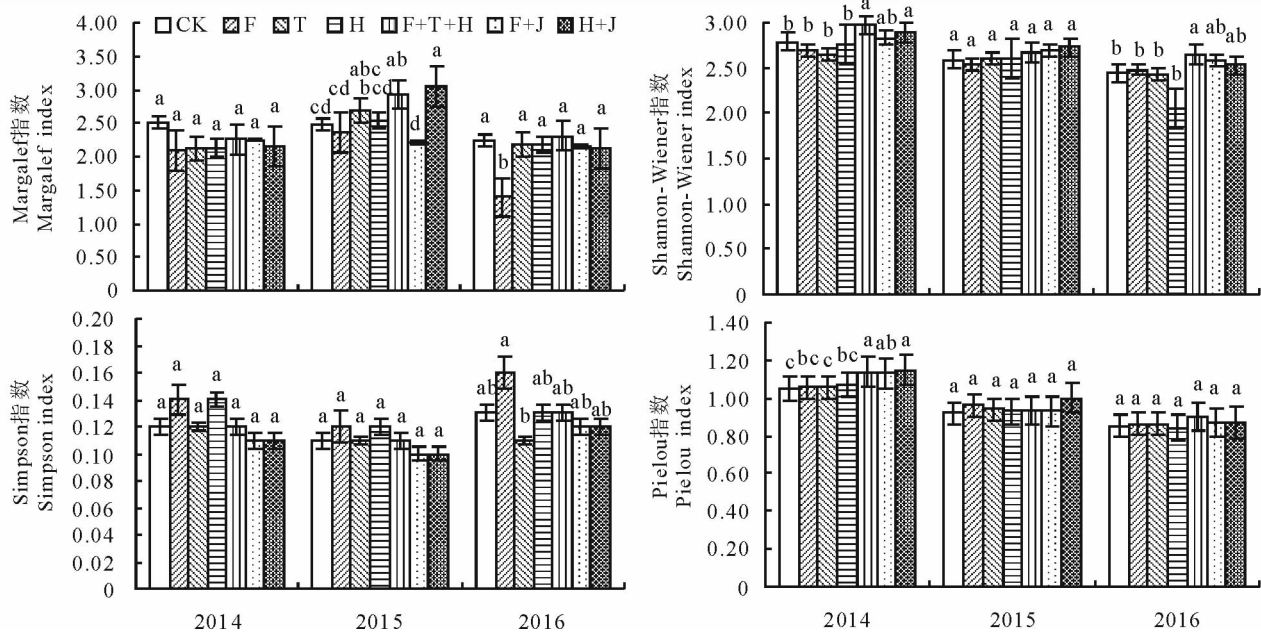


图 2 添加微生物肥料对植物群落物种多样性的影响

Fig. 2 Effect of combined microbial fertilizer on species diversity

不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。Different letters show significant difference ($P<0.05$). Same letters show no significant difference ($P>0.05$). The same blow.

3 讨论

3.1 群落特征对施加微生物肥料的响应

土壤微生物是草地生态系统中重要的组成部分,其活动能力的强弱与草地植被类型以及土壤营养元素有一定相关性,可以加速 C、N 等元素的循环,对有机质的分解转化也起主导作用。微生物肥料通过提高微生物的生命活动,增加植物营养元素的供应量,改善植物营养状况,从而增加作物的产量^[23]。本试验研究结果表明,2014—2016 年间 F+T+H 的配合施用均增加了植物群落的密度和地上生物量,植物群落密度分别增加了 26.72%、17.94%、34.64%,地上生物量分别增加了 7.18%、49.97%、47.64%。由于不同植物对肥料的利用率不同,使得植物群落的高度、盖度和密度发生不同的变化,进而影响植物群落地上生物量^[24]。本试验结果表明,H+J 配合施用 2014 年植物群落盖度比对照组高 35.75%,但群落地上生物量比对照组减小了 17.82%,2015、2016 年植物群落密度分别比对照组高 9.99%、24.52%,群落地上生物量分别比对照组高 45.83%、37.25%;2016 年 F+J 配合施用植物群落高度、盖度分别比对照组高 33.10%、14.13%,但植物群落密度、地上生物量分别比对照组减小了 5.90%、14.58%;2014—2016 年施加 H、F 植物群落特征均无明显变化。Ditommaso 等^[25]认为在多数研究中,养分添加促进了植物生长,提高了植物群落生产力,本试验结果与此存在一定差异。植物对养分添加的响应不仅与物种本身的功能特性有着密切的关系,还受物种所在群落环境的影响,是物种适应性和群落环

境的变化相互作用的结果^[26-27],本试验期间 2015、2016 年降雨量显著低于 2014 年,可能是导致出现该结果的主要原因。

3.2 群落主要物种重要值对施加微生物肥料的响应

本试验中施入微生物肥料对植物群落主要物种重要值具有显著影响,但不同物种响应有差别。在生态位理论框架中,物种在特定生境中的适合度决定于其生活史对策,而各物种的生活史对策主要决定于植物的个体表现特征,表现特征又决定于个体的生理、形态和功能特征,这些特征决定了植物的生长能力、竞争能力、存活能力等^[28]。2014 年施加 T 禾本科植物重要值比对照组高 9.59%、杂草类植物重要值比对照组小 38.55%,施加 F+J,豆科植物重要值比对照组高了 20.71%;施加 F,2014—2016 年植物群落主要物种重要值无明显变化,F+T+H 配合施用 2015、2016 年禾本科植物重要值分别增加了 3.64%、43.44%,豆科植物重要值分别增加了 50.00%、18.80%,H+J 配合施用豆科植物重要值分别增加了 76.35%、73.77%。根茎型禾草(羊草等)对复合微生物肥料添加的响应显著高于丛生型禾草和莲座型菊科植物等草类。Tilman^[29]的生态位优先占领假说表明,退化草地施肥后,促进了禾草类植物的生长,提高了禾本科植物重要值,相反弱势种群的植物在竞争中重要值显著降低而逐渐消失。本实验结果显示,施加 T,2014 年禾本科植物重要值比对照组高 9.59%,同时杂草类植物重要值比对照组小 38.55%;施加 H,2014、2015 年菊科植物重要值比对照组分别减小了 60.42%、55.08%。豆科植物与根瘤菌结瘤形成共生体,具有将大气中沉降氮转化为直接供植物生长发育所需氮素的能力^[30],所以豆科植物对微生物肥料的敏感度不及禾本科,施加 F+T+H、F+J 豆科植物重要值分别比对照组高了 23.47%、20.71%,但均不及禾本科增加幅度。与杨月娟等^[31]研究结果显示施肥使禾本科、豆科植物的重要值增加,杂草类重要值减少,削弱了杂草类植物在群落中的作用较为一致。

3.3 群落物种多样性对施加微生物肥料的响应

物种多样性是对一个群落内物种分布均匀程度和数量的测量指标,是草原群落的重要特征,表示各个物种对资源的利用能力和生境条件适应能力^[32-33]。关于施肥对植物群落组成的影响,已开展了相关研究,多数研究认为施肥会导致群落植物物种多样性下降,也有一些研究表明施肥对植物物种多样性无显著影响,但也有学者认为施肥增加了植物物种多样性^[34-36]。本试验结果表明,2014—2016 年施加 F+T+H 的 Margalef 指数、Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数均增加;2014、2015 年施加 H+J 的 Pielou 指数分别比对照组增加了 7.62%、8.70%,与第二种施肥会导致群落植物物种多样性增加的观点相一致。然而在施加 F,2014—2016 年的 Margalef 指数分别比对照组减小了 16.40%、5.22%、37.22%,施加 H 各指数无明显变化。分析出现不同结果的原因,群落植物物种丰富度和多样性指数的变化除与植被本身特性有关外,还可能受草原土壤基质的改善程度、种间与种内竞争的影响^[37],施加微生物肥料的种类不同,从而使不同种植物在群落中的地位也产生相应变化,但总体来说,在改良退化草地时,适当合理施肥可以促进生物多样性增加。

4 结论

(1)复合微生物肥料添加对羊草草原植物群落特征有不同影响,在试验的 3 年内,连续施加 F+T+H、H+J 群落密度、地上生物量增加,而 F、H、T、F+J 群落特征无明显变化。

(2)复合微生物肥料添加对羊草草原植物群落物种重要值有不同影响,在试验的 3 年内,连续施加 T、H、F+T+H、H+J 禾本科、豆科植物重要值增加,而 F 群落特征无明显变化。

(3)复合微生物肥料添加对羊草草原植物群落物种多样性有不同影响,在试验的 3 年内,连续施加 F+T+H 的 Margalef 指数、Shannon—Wiener 指数、Pielou 指数均增加,F 的 Margalef 指数减小,T、H、F+J、H+J 物种多样性变化不规律。

综上所述,比较 6 种复合微生物肥料添加对羊草草原植物群落的影响,连续施加腐殖酸+糖蜜发酵+海藻酸对于提高植物群落生物量和物种多样性效果最好。

参考文献 References:

- [1] Hooper D U, Vitousek P M. The effects of plant composition and diversity on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277 (5330): 1302-1305.
- [2] Tilman D, Knops J, Wedin D, *et al.* The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277(277): 1300-1302.
- [3] Kong B B, Wei X H, Du J L, *et al.* Effects of clipping and fertilization on the temporal dynamics of species diversity and functional diversity and their relationships in an alpine meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(3): 187-199.
孔彬彬, 卫欣华, 杜家丽, 等. 刈割和施肥对高寒草甸物种多样性和功能多样性时间动态及其关系的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(3): 187-199.
- [4] Gusewell S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [5] Huang J, Wang G F, An S Z, *et al.* Effect of nitrogen fertilization on the vegetation structure and biomass of degraded meadow and soil fertility. *Pratacultural Science*, 2009, 26(3): 75-78.
黄军, 王高峰, 安沙舟, 等. 施氮对退化草甸植被结构和生物量及土壤肥力的影响. *草业科学*, 2009, 26(3): 75-78.
- [6] Huang G Q, Wang X X, Qian H Y, *et al.* Negative impact of inorganic fertilizes application on agricultural environment and its counter measures. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 656-660.
黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策. *生态环境学报*, 2004, 13(4): 656-660.
- [7] Solomon S. IPCC (2007): climate change the physical science basis. *American Geophysical Union*, 2007, 9(1): 123-124.
- [8] Liu P, Liu X L. Advance in role mechanism of microbial fertilizer. *Journal of Microbiology*, 2013, 3(3): 26-31.
刘鹏, 刘训理. 中国微生物肥料的研究现状及前景展望. *农学学报*, 2013, 3(3): 26-31.
- [9] Meng Y, Xu F H, Meng Q Y, *et al.* Current application status and prospect of microbiological fertilizer in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(6): 276-283.
孟瑶, 徐凤花, 孟庆有, 等. 中国微生物肥料研究及应用进展. *中国农学通报*, 2008, 24(6): 276-283.
- [10] Ge J Q, Yu X C, Wang Z H. The function of microbial fertilizer and its application propects. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 87-88.
葛均青, 于贤昌, 王竹红. 微生物肥料效应及其应用展望. *中国生态农业学报*, 2003, 11(3): 87-88.
- [11] Sun Z T, Yao L T, Sun F M, *et al.* Effect of microbial fertilizer on the soil ecosystem and growth of cotton. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 54-56.
孙中涛, 姚良同, 孙凤鸣, 等. 微生物肥料对棉田土壤生态与棉花生长的影响. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 54-56.
- [12] Liu J, Li J, Ge C. Advance in role mechanism of microbial fertilizer. *Journal of Microbiology*, 2001, 21(1): 33-36.
刘健, 李俊, 葛诚. 微生物肥料作用机理的研究新进展. *微生物学杂志*, 2001, 21(1): 33-36.
- [13] Shan Y M, Wen C, Chen H J, *et al.* Effect of compound bio-fertilizers on community underground biomass in Horqin native grassland. *Jouanal of Agricultural Sciences*, 2017, 7(1): 28-34.
单玉梅, 温超, 陈海军, 等. 复合微生物肥料对科尔沁区天然打草场群落地下生物量的影响. *农业科学*, 2017, 7(1): 28-34.
- [14] Quan G L, Xie K Y, Tong Z Y, *et al.* The effect of compound bio-fertilizers on soil physical and chemical properties and soil enzyme activity in *Leymus chinensis* steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2): 27-36.
权国玲, 谢开云, 全宗永, 等. 复合微生物肥料对羊草草原土壤理化性质及酶活性的影响. *草业学报*, 2016, 25(2): 27-36.
- [15] Ta N. Effect of Microbial Fertilizer and Aeration Grass Growing and Soil Respiration of Natural Grassland[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016.
塔娜. 微生物肥料和打孔对天然打草场牧草生长和土壤特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016.
- [16] Chen B R, Li H S, Zhu Y X, *et al.* The spatial and environmental interpretation of the plant community of Hulunber grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1265-1271.
陈宝瑞, 李海山, 朱玉霞, 等. 呼伦贝尔草原植物群落空间格局及其环境解释. *生态学报*, 2010, 30(5): 1265-1271.
- [17] Chen W Y, Zhao M, Li G Y, *et al.* The influence of different types of fertilizer application level on the Gannan desertification of alpine meadow of plant characteristics and the productive forces. *Journal of Natural Resources*, 2012, (2): 254-267.
陈文业, 赵明, 李广宇, 等. 不同类型施肥水平对甘南沙化高寒草甸植物群落特征及生产力的影响. *自然资源学报*, 2012, (2): 254-267.
- [18] Zhu L B, Zheng Y, Zeng Z H, *et al.* Study on the vegetation and soil characteristics of different vegetation types in Hulunbeier typical steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(3): 32-36.
朱立博, 郑勇, 曾昭海, 等. 呼伦贝尔典型草原不同植被类型植被与土壤特征研究. *中国草地学报*, 2008, 30(3): 32-36.
- [19] Zhang F J, Wu Y N, Yang B L, *et al.* The research on the spatial heterogeneity of the soil nutrient and the quantitative properties of plant communities in Hulunbeier Steppe. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(2): 173-177.

- 张凤杰, 乌云娜, 杨宝灵, 等. 呼伦贝尔草原土壤养分与植物群落数量特征的空间异质性. 西北农业学报, 2009, 18(2): 173-177.
- [20] Lin L, Wu Y N, Kenji T, *et al.* Variation of soil physicochemical and microbial properties in degraded steppes in Hulunbeir of China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3407-3414.
林璐, 乌云娜, 田村宪司, 等. 呼伦贝尔典型退化草原土壤理化与微生物性状. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3407-3414.
- [21] He X D, Gao Y B, Liu H F. Amending of importance value and its application on classification of *Leymus chinensis* communities. Bulletin Botanical Research, 2004, 24(4): 466-472.
何兴东, 高玉葆, 刘惠芬. 重要值的改进及其在羊草群落分类中的应用. 植物研究, 2004, 24(4): 466-472.
- [22] Ma K P, Huang J H, Yu S L, *et al.* Plant community diversity in Dongling mountain, Beijing, China. Acta Ecologica Sinica, 1995, 18(3): 24-32.
马克平, 黄建辉, 于顺利, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 18(3): 24-32.
- [23] Dong C J, Jiang B G. Screening of bacteria applied in multiplex microbial fertilizer. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2005, 33(1): 56-57.
董昌金, 蒋宝贵. 复合微生物肥料高效菌株的筛选. 安徽农业科学, 2005, 33(1): 56-57.
- [24] Cheng J M, Jia H Y. Study on vegetation community structure and its succession on fertilization grassland. Research of Soil and Water Conservation, 1996, (4): 124-128.
程积民, 贾恒义. 施肥草地植被群落结构和演替的研究. 水土保持研究, 1996, (4): 124-128.
- [25] Dittmann A, Aarssen L W. Resource manipulations in natural vegetation: a review. Plant Ecology, 1989, 84(1): 9-29.
- [26] Wan H W, Yang Y, Bai S Q, *et al.* Variations in leaf functional traits of six species along a nitrogen addition gradient in *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 611-621.
万宏伟, 杨阳, 白世勤, 等. 羊草草原群落 6 种植物叶片功能特性对氮素添加的响应. 植物生态学报, 2008, 32(3): 611-621.
- [27] Pennings S, Clark C, Cleland E S, *et al.* Do individual plant species show predictable responses to nitrogen addition across multiple experiments. Oikos, 2005, 110(3): 547-555.
- [28] Niu K C, Liu Y N, Shen Z H, *et al.* Community assembly: the relative importance of neutral theory and niche theory. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 579-593.
牛克昌, 刘恽宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论. 生物多样性, 2009, 17(6): 579-593.
- [29] Tilman D. Resource competition and community structure. The Quarterly Review of Biology, 1984, 17(59): 1-296.
- [30] Chou M X, Wei X Y. Review of research advancements on the molecular basis and regulation of symbiotic nodulation of legumes. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(7): 876-888.
丑敏霞, 魏新元. 豆科植物共生结瘤的分子基础和调控研究进展. 植物生态学报, 2010, 34(7): 876-888.
- [31] Yang Y J, Zhou H K, Ye X, *et al.* Shortterm responses of plant community structure and function to nitrogen, phosphorus and potassium additions in an alpine meadow of Qinghai-Xizang Plateau. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(11): 2317-2323.
杨月娟, 周华坤, 叶鑫, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落结构和功能对氮、磷、钾添加的短期响应. 西北植物学报, 2014, 34(11): 2317-2323.
- [32] Wang Z W, Xing F, Zhu T C, *et al.* The responses of functional group composition and species diversity of *Aneurolepidium* Chinese grassland to flooding disturbance on Songnen plain. Journal of Plant Ecology, 2002, 26(6): 708-716.
王正文, 邢福, 祝廷成, 等. 松嫩平原羊草草地植物功能群组成及多样性特征对水淹干扰的响应. 植物生态学报, 2002, 26(6): 708-716.
- [33] Chen W Y, Qi D C, Li G Y, *et al.* Effect of fertilization on grass community diversity and productivity of degraded alpine grassland at Maqu, in south of Gansu province. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(6): 31-36.
陈文业, 戚登臣, 李广宇, 等. 施肥对甘南高寒草甸退化草地植物群落多样性和生产力的影响. 中国农业大学学报, 2009, 14(6): 31-36.
- [34] Ren Z, Li Q, Chu C, *et al.* Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community. Journal of Plant Ecology, 2010, 3(1): 25-31.
- [35] Wang C, Long R, Wang Q, *et al.* Fertilization and litter effects on the functional group biomass, species diversity of plants, microbial biomass, and enzyme activity of two alpine meadow communities. Plant and Soil, 2010, 331(1): 377-389.
- [36] Huberty L E, Gross K L, Miller C J. Effects of nitrogen addition on successional dynamics and species diversity in Michigan old-fields. Journal of Ecology, 1998, 86(5): 794-803.
- [37] Zheng H P, Chen Z X, Wang S R, *et al.* Effects of fertilizer on plant diversity and productivity of desertified alpine grassland at Maqu, Gansu. Acta Prataculturae Sinica, 2007, 16(5): 34-39.