

# 不同栽培模式下豫北沙化土壤微生物量和酶活性

蔺 芳

(新乡学院 生命科学技术学院, 河南 新乡 453000)

**摘要:** 通过连续 6 a 定位试验, 以沙化裸地为对照, 研究紫花苜蓿 *Medicago sativa* 单播、无芒雀麦 *Bromus inermis* 单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播 3 种栽培模式对豫北沙化地区土壤微生物量碳、氮、磷以及土壤酶的影响, 利用回归分析和通径分析对二者的关系进行研究。结果表明: 与沙化裸地相比, 0~40 cm 土层 3 种栽培模式下土壤微生物量碳、氮、磷质量分数和土壤酶活性均不同程度增加, 从大到小依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播和无芒雀麦单播, 且土壤微生物量碳、氮、磷质量分数和土壤酶活性均随土层的加深而降低, 呈现表聚性特征。相关性分析表明: 土壤微生物量碳、氮、磷与土壤 7 种酶均呈显著 ( $P<0.05$ ) 或极显著 ( $P<0.01$ ) 相关; 通径分析进一步表明: 土壤酶对土壤微生物量碳的直接贡献效应从大到小依次为脲酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和蛋白酶, 对土壤微生物量氮的直接贡献效应从大到小依次为脲酶、蔗糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶, 对土壤微生物量磷的直接贡献效应从大到小依次为蔗糖酶、碱性磷酸酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶和淀粉酶。由此认为, 相对于沙化裸地, 豫北地区经 6 a 人工草地建植, 土壤微生物量碳、氮、磷以及土壤酶活性有效提高, 土壤主要生物学性状优化, 以紫花苜蓿/无芒雀麦混播为最佳的栽培模式。图 1 表 6 参 20

**关键词:** 土壤学; 紫花苜蓿; 无芒雀麦; 栽培模式; 微生物量; 土壤酶

中图分类号: S154

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)03-0590-08

## Microbial biomass and enzymatic activity in sandy soils of northern Henan Province with different alfalfa and awnless brome cultivating patterns

LIN Fang

(School of Life Science and Technology, Xinxiang University, Xinxiang 453000, Henan, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different cultivating patterns on microbial content and related enzyme activities in sandy soils of northern Henan Province, through six consecutive years of positioning tests in northern Henan Province, compared with sandy bare land, the effects of three kinds of cultivating patterns (alfalfa single-sowing, awnless brome single-sowing, and alfalfa/awnless brome mixed-sowing) on soil microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (N), phosphorus (P), and soil enzymes were studied. Both a regression analysis and a path analysis were used. Results showed that compared with sandy bare land, the contents of soil MBC, N, P, and enzymes for the three kinds of cultivating patterns in the 0 to 40 cm soil layer increased in the order of alfalfa/awnless brome mixed-sowing>alfalfa single-sowing>awnless brome single-sowing. The contents decreased with lower soil layers, that is, surface aggregation features were present. The correlation analysis showed that the presence of soil MBC, N, P, and seven kinds of soil enzymes were significant ( $P<0.05$ ) or highly significant ( $P<0.01$ ) with  $r$  value ranging from 0.744–0.980. The path analysis further showed that the direct contribution effect of soil enzymes from large to small on soil MBC was urease>amylase>beta-glycosidase>sucrase>protease, on soil microbial biomass N was urease>sucrase>beta-glycosidase>alkaline phosphatase, and on soil microbial biomass P was sucrase>beta-glycosidase>alkaline phosphatase>catalase>

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102110192, 162102310250); 河南省高等学校重点科研项目(16A180034, 16A180049)

作者简介: 蔺芳, 从事草地生物多样性及土壤修复研究。E-mail: fanglin2035@126.com

amylase. In conclusion, after six years of artificially planted grasslands in northern Henan Province, compared to sandy bare land, the contents of soil MBC, N, P, and the activities of soil enzymes greatly improved optimizing the main physical and chemical soil properties with the alfalfa/awnless brome mixed-sowing being the best cultivating pattern. [Ch, 1 fig. 6 tab. 20 ref.]

**Key words:** soil science; alfalfa; awnless brome; cultivating pattern; microbial biomass; soil enzyme

土壤微生物量是土壤有机质和养分转化与循环的重要驱动力，微生物量库对土壤肥力的提高具有重要作用<sup>[1-2]</sup>。土壤微生物量碳(SMBC)、土壤微生物量氮(SMBN)和土壤微生物量磷(SMBP)是植被所需碳、氮、磷的重要“源”或“库”，是综合评价土壤质量或肥力的重要指标，也是土壤生态系统变化的预警及敏感指标<sup>[3]</sup>。土壤酶是陆地生态系统功能的基础，可作为评价土壤质量的生物指标<sup>[4]</sup>。SMBC，SMBN，SMBP 和土壤酶对土壤环境因子的变化十分敏感，土壤的微小变动均会引起其含量或活性的变化<sup>[5]</sup>，当前，对土壤微生物量和酶活性的监测已成为所有生态体系研究必不可少的内容<sup>[6]</sup>。紫花苜蓿 *Medicago sativa* 是世界范围内人工草地栽培面积最大的豆科 Leguminosae 牧草，因其根瘤能够有效固定空气中的游离态氮而提高土壤肥力<sup>[7]</sup>；无芒雀麦 *Bromus inermis* 是禾本科 Gramineae 优良的放牧型牧草，适口性好，营养价值高<sup>[8]</sup>。近年来，豆科和禾本科牧草栽培对人工草地中 SMBC，SMBN，SMBP 和土壤酶的影响已引起了众多研究者的格外关注<sup>[9]</sup>，本研究就豫北地区紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播和紫花苜蓿/无芒雀麦混播 3 种栽培模式下 SMBC，SMBN，SMBP 的质量分数及相关土壤酶活性进行了连续 6 a 的定位研究，旨在探寻既能满足豫北地区饲草优质高效生产，又能有效改良沙化土壤的人工草地栽培模式，以期为今后该地区人工草地的合理建植提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地河南省新乡市洪门镇原堤村(35°16'N, 113°57'E)，地处豫北平原，南临黄河，北面是余河通道，属黄河冲积平原，土壤沙化较为严重。该区属暖温带大陆性季风气候，年均气温为 14.2 ℃，年均降水量为 573.4 mm，年均日照时数为 2 400 h，年均湿度为 68.0%，无霜期为 220 d。降水年际间分配不均，主要集中在 7 和 8 月。供试土壤类别为砂壤土，试验地 0~40 cm 土层基础理化性质见表 1。

表 1 试验地 0~40 cm 土层土壤基础理化性质  
Table 1 Soil basic physical and chemical properties in 0–40 cm soil layer at test site

| 土层深度/cm | $\varphi$ 砂粒/% | $\varphi$ 粉粒/% | $\varphi$ 黏粒/% | $w$ 全氮/(g·kg <sup>-1</sup> ) | $w$ 全磷/(g·kg <sup>-1</sup> ) | $w$ 全钾/(g·kg <sup>-1</sup> ) | $w$ 碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | $w$ 速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | $w$ 速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> ) | $w$ 有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> ) | 持水量/% | pH   |
|---------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------|------|
| 0~10    | 53.41          | 33.31          | 16.11          | 1.11                         | 0.73                         | 13.24                        | 37.71                          | 14.94                          | 92.66                          | 6.45                          | 27.42 | 7.86 |
| 10~20   | 50.12          | 34.78          | 15.27          | 1.09                         | 0.71                         | 13.12                        | 33.54                          | 12.62                          | 86.54                          | 5.54                          | 28.01 | 7.85 |
| 20~30   | 49.04          | 36.22          | 15.05          | 1.07                         | 0.67                         | 12.87                        | 27.83                          | 10.81                          | 81.11                          | 4.52                          | 28.91 | 7.83 |
| 30~40   | 45.33          | 37.54          | 17.24          | 1.06                         | 0.62                         | 12.79                        | 21.87                          | 8.72                           | 78.25                          | 4.01                          | 29.83 | 7.84 |

1.2 试验设计

试验地总面积为 720 m<sup>2</sup>，2012 年 10 月用旋耕机进行整体旋耕作业，随后连续 6 a 进行播种试验。随机区组设计，重复 3 次·小区<sup>-1</sup>，共 12 个小区，各小区面积为 20 m<sup>2</sup>(4 m×5 m)，以沙化裸地为对照，设紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、紫花苜蓿/无芒雀麦混播 3 种不同的栽培模式；于 2012 年 10 月 6 日同时播种，紫花苜蓿的单播播量为 15.0 kg·hm<sup>-2</sup>，无芒雀麦的单播播量为 22.5 kg·hm<sup>-2</sup>，紫花苜蓿/无芒雀麦混播播量均为相应单播播量的一半。播种方式为条播，行距 30 cm。试验期间免耕处理，不施用任何肥料，定期刈割牧草，5 次·a<sup>-1</sup>，定期浇水与人工除草。

1.3 土壤样品采集及测定

1.3.1 土壤样品采集 2017 年 10 月 30 日试验结束后，以五点取样法在各小区用土钻分层(0~10，10~20，20~30，30~40 cm)取样。采集到的土样带回实验室，并剔除粗根和小石块，风干磨碎后过 0.15 mm 孔筛，备用。

1.3.2 土壤生物学指标测定 各生物学指标按各测定方法<sup>[10]</sup>。SMBC 采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定; SMBN 用氯仿熏蒸-茚三酮比色法测定; SMBP 采用熏蒸提取-全磷法测定; 脲酶用靛酚蓝比色法测定, 以 24 h 后 1.0 g 土壤中氨态氮质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示; 蔗糖酶、淀粉酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 以 24 h 后 1.0 g 土壤中葡萄糖质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示; 碱性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定, 以 1.0 g 土壤中 24 h 后苯酚的质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示; 蛋白酶用茚三酮比色法测定, 以 1.0 g 土壤中 24 h 后氨基氮的质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示;  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性用硝基苯比色法测定, 以对硝基酚的质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示; 过氧化氢酶用紫外分光光度法测定, 以 20 min 内 1.0 g 土壤中分解的过氧化氢的质量分数( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )表示。

#### 1.4 数据分析

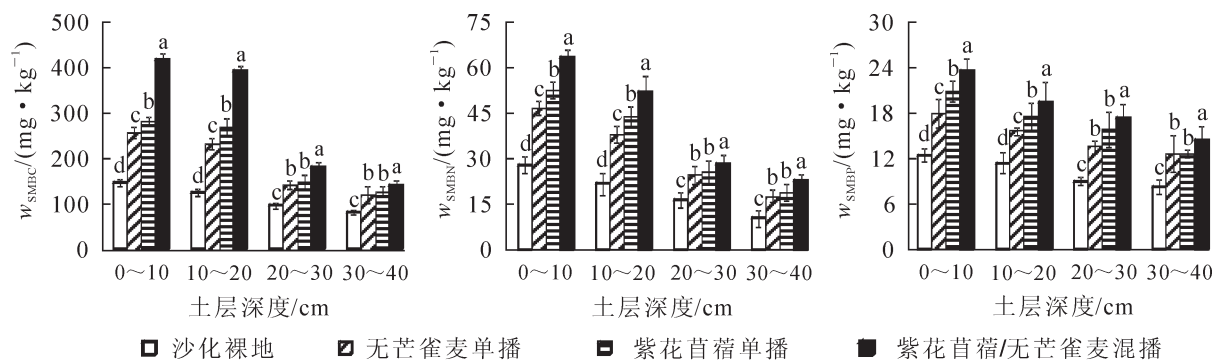
数据经过 Excel 2003 整理和作图后, 采用 SPSS 24.0 进行方差分析、回归分析和通径分析。不同栽培模式间各指标的差异采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差法(LSD)进行分析比较, 各因子间的相关关系采用 Pearson 相关系数法进行评价, 采用线性回归“Linear”程序进行通径分析, 所有数据均以 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准差来表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培模式下各土层土壤微生物量比较

由图 1 可知: 各样地 SMBC 质量分数表现为  $283.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (紫花苜蓿/无芒雀麦混播) $>207.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (紫花苜蓿单播) $>188.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (无芒雀麦单播) $>113.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (沙化裸地); SMBN 质量分数表现为  $41.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (紫花苜蓿/无芒雀麦混播) $>35.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (紫花苜蓿单播) $>31.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (无芒雀麦单播) $>18.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (沙化裸地); SMBP 质量分数表现为  $18.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (紫花苜蓿/无芒雀麦混播) $>16.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (紫花苜蓿单播) $>14.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (无芒雀麦单播) $>10.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (沙化裸地)。与沙化裸地相比, 3 种栽培模式下 SMBC, SMBN 和 SMBP 质量分数均显著增加( $P<0.05$ )。其中, 土壤表层(0~20 cm)混播模式下 SMBC, SMBN 和 SMBP 质量分数较 2 种单播模式均呈显著差异( $P<0.05$ ), 紫花苜蓿单播模式下 SMBC, SMBN 和 SMBP 质量分数显著大于无芒雀麦单播( $P<0.05$ ); 土壤亚表层(20~40 cm)混播模式较 2 种单播模式也均呈显著差异( $P<0.05$ ), 但 2 种单播模式的 SMBC, SMBN 和 SMBP 质量分数差异不显著( $P>0.05$ )。

从土壤剖面来看, 沙化裸地和 3 种栽培模式下 SMBC, SMBN 和 SMBP 质量分数整体表现为土壤表层(0~20 cm)高于亚表层(20~40 cm), 呈表聚性特征。



不同小写字母表示在相同土层不同栽培模式下差异显著( $P<0.05$ )

图 1 不同栽培模式下土层中土壤微生物量比较

Figure 1 Comparison of soil microbial content in different cultivating patterns

### 2.2 不同栽培模式下各土层土壤酶活性比较

表 2 可以看出: 不同栽培模式下土壤 7 种酶(脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、蛋白酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶)活性从高到低均依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播和沙化裸地, 与沙化裸地相比, 3 种栽培模式下 7 种酶活性均不同程度增加( $P<0.05$ )。

具体来说, 与单播相比, 各土层紫花苜蓿/无芒雀麦混播模式下脲酶和蔗糖酶活性均显著增加( $P<0.05$ ), 土壤表层(0~20 cm)紫花苜蓿单播较无芒雀麦单播显著增加( $P<0.05$ ), 亚表层(20~40 cm)2 种单

播则差异不显著( $P>0.05$ )。各土层 3 种栽培模式下碱性磷酸酶活性差异不显著( $P>0.05$ )。与单播相比,各土层紫花苜蓿/无芒雀麦混播模式下蛋白酶和淀粉酶活性均显著增加( $P<0.05$ ),但 2 种单播之间差异不显著( $P>0.05$ )。各土层混播和紫花苜蓿单播模式下  $\beta$ -葡萄糖苷酶活性较无芒雀麦单播呈显著增加( $P<0.05$ ),但混播和紫花苜蓿单播之间差异不显著( $P>0.05$ );较无芒雀麦单播,混播和紫花苜蓿单播使土壤表层(0~20 cm) $\beta$ -葡萄糖苷酶活性显著增加( $P<0.05$ ),但混播和紫花苜蓿单播之间差异不显著( $P>0.05$ )。此外,土壤 7 种酶的活性均随着土层深度的增加而减小。

表 2 不同栽培模式下土层土壤 7 种酶活性  
Table 2 7 soil enzyme activities in different soil layers under different cultivating patterns

| 栽培方式            | 土层/cm | $w$ 脲酶/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | $w$ 蛋白酶/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | $w$ 碱性磷酸酶/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | $w$ 蛋白酶/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | $w$ 淀粉/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | $w$ $\beta$ -葡萄糖苷酶/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | $w$ 过氧化氢酶/<br>( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |
|-----------------|-------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 沙化裸地            | 0~10  | 0.501±0.035 d                                | 4.198±0.310 d                                 | 0.423±0.032 b                                   | 10.843±1.150 c                                | 0.161±0.024 c                                | 3.086±0.275 c                                            | 1.983±0.185 c                                   |
|                 | 10~20 | 0.418±0.027 d                                | 3.713±0.274 d                                 | 0.307±0.026 b                                   | 8.387±0.634 c                                 | 0.132±0.017 c                                | 2.125±0.262 c                                            | 1.836±0.170 c                                   |
|                 | 20~30 | 0.287±0.020 c                                | 2.652±0.162 c                                 | 0.198±0.024 b                                   | 7.982±0.581 c                                 | 0.087±0.012 c                                | 1.562±0.255 c                                            | 1.435±0.149 c                                   |
|                 | 30~40 | 0.201±0.011 c                                | 2.026±0.116 c                                 | 0.163±0.019 b                                   | 6.458±0.536 c                                 | 0.076±0.011 c                                | 0.580±0.234 c                                            | 0.947±0.073 c                                   |
| 无芒雀麦<br>单播      | 0~10  | 0.756±0.041 c                                | 7.789±0.321 c                                 | 0.653±0.038 a                                   | 13.983±1.122 b                                | 0.412±0.034 b                                | 4.217±0.407 b                                            | 2.536±0.174 b                                   |
|                 | 10~20 | 0.678±0.036 c                                | 7.272±0.310 c                                 | 0.566±0.035 a                                   | 10.362±0.897 b                                | 0.365±0.033 b                                | 3.122±0.354 b                                            | 2.475±0.165 b                                   |
|                 | 20~30 | 0.489±0.028 b                                | 6.571±0.285 b                                 | 0.426±0.036 a                                   | 9.903±0.625 b                                 | 0.263±0.026 b                                | 2.258±0.276 b                                            | 2.287±0.130 b                                   |
|                 | 30~40 | 0.417±0.022 b                                | 6.138±0.278 b                                 | 0.371±0.030 a                                   | 8.962±0.601 b                                 | 0.153±0.021 b                                | 2.198±0.150 b                                            | 2.003±0.141 b                                   |
| 紫花苜蓿<br>单播      | 0~10  | 0.853±0.043 b                                | 8.423±0.363 b                                 | 0.672±0.055 a                                   | 14.098±1.163 b                                | 0.465±0.037 b                                | 5.764±0.462 a                                            | 2.807±0.188 a                                   |
|                 | 10~20 | 0.726±0.037 b                                | 7.876±0.437 b                                 | 0.587±0.051 a                                   | 11.386±1.242 b                                | 0.393±0.033 b                                | 3.765±0.264 a                                            | 2.788±0.202 a                                   |
|                 | 20~30 | 0.503±0.031 b                                | 6.765±0.423 b                                 | 0.441±0.048 a                                   | 10.837±0.960 b                                | 0.287±0.015 b                                | 2.701±0.277 a                                            | 2.312±0.175 b                                   |
|                 | 30~40 | 0.434±0.025 b                                | 6.351±0.365 b                                 | 0.385±0.042 a                                   | 9.176±0.636 b                                 | 0.176±0.010 b                                | 2.621±0.176 a                                            | 2.103±0.200 b                                   |
| 紫花苜蓿/无<br>芒雀麦混播 | 0~10  | 1.063±0.064 a                                | 8.932±0.513 a                                 | 0.701±0.062 a                                   | 16.385±1.301 a                                | 0.765±0.039 a                                | 6.027±0.583 a                                            | 2.840±0.233 a                                   |
|                 | 10~20 | 0.787±0.052 a                                | 8.127±0.427 a                                 | 0.639±0.055 a                                   | 14.248±0.976 a                                | 0.645±0.035 a                                | 3.839±0.285 a                                            | 2.817±0.246 a                                   |
|                 | 20~30 | 0.598±0.047 a                                | 7.534±0.318 a                                 | 0.498±0.047 a                                   | 13.783±0.814 a                                | 0.502±0.030 a                                | 3.004±0.211 a                                            | 2.748±0.175 a                                   |
|                 | 30~40 | 0.512±0.036 a                                | 7.021±0.336 a                                 | 0.412±0.033 a                                   | 12.408±0.643 a                                | 0.425±0.043 a                                | 2.723±0.166 a                                            | 2.583±0.183 a                                   |

说明：不同小写字母表明相同土层不同栽培模式下差异显著( $P<0.05$ )

2.3 不同栽培模式下土壤微生物量和土壤酶的相关性分析

对土层中 SMBC, SMBN, SMBP 与土壤酶活性的相关性分析可知(表 3): SMBC( $y_1$ ), SMBN( $y_2$ )和 SMBP( $y_3$ )彼此之间极显著正相关( $P<0.01$ ); 土壤脲酶( $x_1$ )、蔗糖酶( $x_2$ )、碱性磷酸酶( $x_3$ )、蛋白酶( $x_4$ )、淀粉酶( $x_5$ )、 $\beta$ -葡萄糖苷酶( $x_6$ )和过氧化氢酶( $x_7$ )彼此之间也表现出了极显著正相关( $P<0.01$ ); SMBC 和 SMBN 均与土壤脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶呈极显著正相关

表 3 土壤微生物量碳氮磷和土壤酶的相关性分析  
Table 3 Correlation between soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and soil enzyme

| 参数             | SMBC | SMBN    | SMBP    | 脲酶      | 蔗糖      | 碱性磷酸酶   | 蛋白酶     | 淀粉酶     | $\beta$ -葡萄糖苷酶 | 过氧化氢酶   |
|----------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|---------|
| SMBC           | 1    | 0.971** | 0.949** | 0.936** | 0.744*  | 0.900** | 0.856** | 0.912** | 0.900**        | 0.804** |
| SMBN           |      | 1       | 0.996** | 0.973** | 0.764*  | 0.947** | 0.874** | 0.871** | 0.953**        | 0.816** |
| SMBP           |      |         | 1       | 0.980** | 0.915** | 0.978** | 0.918** | 0.913** | 0.957**        | 0.929** |
| 脲酶             |      |         |         | 1       | 0.865** | 0.972** | 0.912** | 0.895** | 0.984**        | 0.899** |
| 蔗糖酶            |      |         |         |         | 1       | 0.898** | 0.833** | 0.821** | 0.818**        | 0.957** |
| 碱性磷酸酶          |      |         |         |         |         | 1       | 0.904** | 0.873** | 0.942**        | 0.922** |
| 蛋白酶            |      |         |         |         |         |         | 1       | 0.947** | 0.899**        | 0.911** |
| 淀粉酶            |      |         |         |         |         |         |         | 1       | 0.860**        | 0.895** |
| $\beta$ -葡萄糖苷酶 |      |         |         |         |         |         |         |         | 1              | 0.872** |
| 过氧化氢酶          |      |         |         |         |         |         |         |         |                | 1       |

说明：\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;\*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

( $P<0.01$ ), 与蔗糖酶显著正相关( $P<0.05$ ); SMBP 与土壤 7 种酶均极显著正相关( $P<0.01$ )。

2.4 不同栽培模式下土壤微生物量和土壤酶的逐步回归分析和途径分析

对 SMBC 相关的 7 个土壤酶经逐步回归分析, 剔除次要影响因素过氧化氢酶( $x_7$ )和碱性磷酸酶( $x_3$ ), 剩余的 5 个酶与 SMBC( $y_1$ )存在极显著线性关系, 其回归方程为  $y_1=754.492x_1-18.909x_2-13.309x_4+311.551x_5-48.216x_6+72.325$ , 该方程达极显著水平, 检验值  $F=75.779$ ,  $R^2=0.952$ ; 对 SMBN 相关的 7 个土壤酶经逐步回归分析, 剔除次要影响因素过氧化氢酶( $x_7$ )、蛋白酶( $x_4$ )和淀粉酶( $x_5$ ), 剩余的 4 个酶与 SMBN( $y_2$ )存在极显著线性关系, 其回归方程为  $y_2=98.297x_1-3.308x_2+36.871x_3-5.087x_6-5.867$ , 该方程达极显著水平, 检验值  $F=249.808$ ,  $R^2=0.981$ ; 对 SMBP 相关的 7 个土壤酶经逐步回归分析, 剔除次要影响因素脲酶( $x_1$ )和蛋白酶( $x_4$ ), 剩余的 5 个酶与 SMBP( $y_3$ )存在极显著线性关系, 其回归方程为  $y_3=0.817x_2+9.170x_3+5.215x_5+1.130x_6-2.459x_7+6.289$ , 该方程达极显著水平, 检验值  $F=273.483$ ,  $R^2=0.986$ 。

途径分析(表 4)进一步表明: 各因素对 SMBC 的直接途径系数按绝对值从大到小排序为脲酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和蛋白酶。脲酶对 SMBC 的直接途径系数最大(1.674), 有强烈的正直接作用, 尽管其他酶表现出对 SMBC 的负间接作用, 但最终表现为正效应; 结合脲酶且 SMBC 有极显著相关性, 说明脲酶是影响 SMBC 的主要因素。蔗糖酶、蛋白酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶对 SMBC 都表现出较大的负效应, 但受到其他酶的间接正效应, 最终表现为正效应, 与相关系数表现一致。淀粉酶对 SMBC 直接途径系数为 0.646, 间接途径系数总和为 0.266, 说明淀粉酶通过其他酶使得对 SMBC 的正效应进一步增强。

表 4 土壤相关酶对微生物量碳( $y_1$ )的途径系数

Table 4 Path coefficient of soil related enzymes to microbial carbon( $y_1$ )

| 酶                       | $x_1 \rightarrow y_1$ | $x_2 \rightarrow y_1$ | $x_4 \rightarrow y_1$ | $x_5 \rightarrow y_1$ | $x_6 \rightarrow y_1$ | 间接总和   |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| 脲酶( $x_1$ )             | <u>1.674</u>          | -0.350                | -0.338                | 0.578                 | -0.627                | -0.737 |
| 蔗糖酶( $x_2$ )            | 1.448                 | <u>-0.405</u>         | -0.309                | 0.530                 | -0.521                | 1.148  |
| 蛋白酶( $x_4$ )            | 1.527                 | -0.337                | <u>-0.371</u>         | 0.612                 | -0.573                | 1.229  |
| 淀粉酶( $x_5$ )            | 1.498                 | -0.333                | -0.351                | <u>0.646</u>          | -0.548                | 0.266  |
| $\beta$ -葡萄糖苷酶( $x_6$ ) | 1.647                 | -0.331                | -0.334                | 0.556                 | <u>-0.637</u>         | 1.538  |

说明: 划横线的数据为直接途径系数, 其他为间接途径系数

表 5 所示: 各因素对 SMBN 的直接途径系数按绝对值从大到小排序为脲酶、蔗糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶。脲酶对 SMBN 的直接途径系数很大(1.416), 有强烈的正直接作用, 尽管其通过其他酶表现出对 SMBN 的负间接作用, 但最终表现为正效应; 结合脲酶与 SMBN 的极显著相关性, 说明脲酶是影响 SMBN 的主要因素。蔗糖酶对 SMBN 呈负效应, 但是其通过其他酶的间接正效应, 使得最终总和表现为正效应。碱性磷酸酶对 SMBN 的直接途径系数只有 0.396, 而其通过其他因子对 SMBN 的间接途径系数却达 0.552, 说明碱性磷酸酶主要是通过其他酶的间接作用来影响 SMBN 的。 $\beta$ -葡萄糖苷酶对 SMBN 表现出直接的负效应, 但是其通过其他因子表现出的正效应抵消了直接的负效应, 最终表现为很强的正效应。

表 5 土壤相关酶对土壤微生物量氮( $y_2$ )的途径系数

Table 5 Path coefficient of soil related enzymes to soil microbial nitrogen( $y_2$ )

| 酶                       | $x_1 \rightarrow y_2$ | $x_2 \rightarrow y_2$ | $x_3 \rightarrow y_2$ | $x_6 \rightarrow y_2$ | 间接总和   |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------|
| 脲酶( $x_1$ )             | <u>1.416</u>          | -0.398                | 0.385                 | -0.429                | -0.442 |
| 蔗糖酶( $x_2$ )            | 1.225                 | <u>-0.460</u>         | 0.356                 | -0.357                | 1.224  |
| 碱性磷酸酶( $x_3$ )          | 1.376                 | -0.413                | <u>0.396</u>          | -0.411                | 0.552  |
| $\beta$ -葡萄糖苷酶( $x_6$ ) | 1.393                 | -0.376                | 0.373                 | <u>-0.436</u>         | 1.390  |

说明: 划横线的数据为直接途径系数, 其他为间接途径系数

表 6 所示: 各因素对 SMBP 的直接途径系数按绝对值从大到小排序为蔗糖酶、碱性磷酸酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、过氧化氢酶和淀粉酶。土壤蔗糖酶、碱性磷酸酶、淀粉酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶对 SMBP 的直接和间接途径系数都为正, 说明在土壤中它们对 SMBP 不仅表现出直接的正效应, 还通过其他相关酶来加强这种正效应。过氧化氢酶对 SMBP 表现出负效应, 但是受其他因子较大的间接正效应, 最终表现为正

表 6 土壤相关酶对土壤微生物量磷( $y_3$ )的通径系数

| Table 6 Path coefficient of soil related enzymes to soil microbial phosphorus( $y_3$ ) |                       |                       |                       |                       |                       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 酶                                                                                      | $x_2 \rightarrow y_3$ | $x_3 \rightarrow y_3$ | $x_5 \rightarrow y_3$ | $x_6 \rightarrow y_3$ | $x_7 \rightarrow y_3$ | 间接总和  |
| 蔗糖酶( $x_2$ )                                                                           | <u>0.412</u>          | 0.321                 | 0.209                 | 0.287                 | -0.312                | 0.505 |
| 碱性磷酸酶( $x_3$ )                                                                         | 0.370                 | <u>0.357</u>          | 0.222                 | 0.331                 | -0.301                | 0.622 |
| 淀粉酶( $x_5$ )                                                                           | 0.338                 | 0.312                 | <u>0.254</u>          | 0.302                 | -0.292                | 0.660 |
| $\beta$ -葡萄糖苷酶( $x_6$ )                                                                | 0.337                 | 0.336                 | 0.218                 | <u>0.351</u>          | -0.284                | 0.607 |
| 过氧化氢酶( $x_7$ )                                                                         | 0.394                 | 0.329                 | 0.227                 | 0.306                 | <u>-0.326</u>         | 1.256 |

说明：划横线的数据为直接通径系数，其他为间接通径系数

效应。

3 讨论与结论

3.1 不同栽培模式对土壤微生物量的影响

本研究中，人工草地建植 6 a 后，与沙化裸地相比，3 种栽培模式下 SMBC，SMBN 和 SMBP 质量分数均显著性增加，从高到低依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播。无芒雀麦单播的土壤微生物量最低，一方面是因为该模式下长期向外输出生物量而输入不足(试验期间未施肥且牧草均定期刈割)，导致土壤微生物能源的缺乏；另一方面是因为经过连续多年栽培，无芒雀麦单播土壤养分输出较多，不利于土壤微生物的生长繁殖，其土壤微生物的储量和活性均很低。由于紫花苜蓿的生物固氮作用，紫花苜蓿单播和混播可改善土壤养分状况，提高土壤微生物量。相对于单播，混播模式下植物生长更加旺盛，不仅可以为土壤系统输入更多的有机残体，还可以通过改善土壤微生物生长的微环境，提供更多的营养物质和能源物质以提高微生物活性<sup>[11]</sup>，进而提高土壤微生物量。

本研究中，3 种栽培模式下 SMBC，SMBN 和 SMBP 质量分数均表现为土壤表层大于亚表层，呈现表聚性。这是因为表层土壤水热和通气状况较好，表层中细根和凋落物的快速周转，有利于微生物生长和繁殖，增强了土壤养分的生物有效性<sup>[12]</sup>；随着土层的加深，微生物生境条件变差，微生物生物量的分布受到影响，因而其土壤微生物量明显低于表层<sup>[13]</sup>。

3.2 不同栽培模式对土壤酶活性的影响

本研究中，相较于沙化裸地，单播和混播模式下 7 种土壤酶活性较高，从高到低依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播、沙化裸地，得益于紫花苜蓿和无芒雀麦根茬和根系分泌物对土壤酶活性的促进<sup>[14]</sup>；紫花苜蓿单播模式大于无芒雀麦单播模式，究其原因，一方面是因为紫花苜蓿的生物固氮作用<sup>[15]</sup>，对脲酶和蛋白酶活性的影响较大，促进土壤氮素转化；另一方面，紫花苜蓿根系的根瘤菌会提升土壤中的腐殖质含量，促进蔗糖酶、淀粉酶和  $\beta$ -葡萄糖苷酶的活性<sup>[16]</sup>，从而提高土壤碳素转化效率，同时促进碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性<sup>[17]</sup>，对土壤有机磷转化、土壤微生物活动强度提高均有益。相比而言，紫花苜蓿/无芒雀麦混播对 7 种土壤酶活性效果更显著，这可能是混播模式中紫花苜蓿和多年生黑麦草共生，调节了其根系分泌和根茬腐解的作用，促进了根系的碳代谢生理，使这 7 种土壤酶活性处于较高水平，表现出与 SMBC，SMBN 和 SMBP 同样的变化规律，说明 7 种土壤酶与 SMBC，SMBN，SMBP 的关系较为密切。从土壤垂直分布来看，7 种土壤酶活性均表现为表层较高，主要是因为表层土壤与大气相连，其温度和通透性更好<sup>[18]</sup>，从而为微生物的良好生长提供更有利的条件<sup>[19]</sup>。

3.3 SMBC，SMBN，SMBP 和土壤酶的相互关系

本研究中，SMBC 和 SMBN 与土壤脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶呈极显著正相关( $P<0.01$ )，与蔗糖酶呈显著正相关( $P<0.05$ )；SMBP 与 7 种酶均呈极显著正相关( $P<0.01$ )。分析原因为土壤酶是由土壤中的细菌、真菌和植物根部分泌<sup>[20]</sup>，直接参与土壤中物质和能量转化<sup>[9]</sup>，其活性在一定程度上能表征土壤生物氧化过程的强弱<sup>[6]</sup>，反映土壤微生物活动的强度，进而影响土壤微生物量的高低。

本研究通过逐步回归分析对土壤酶彼此之间的显著相关关系进行了量化，发现入选的因子(土壤酶)对 SMBC，SMBN，SMBP 的决定系数高达 0.952，0.981 和 0.986，均达极显著水平，表明筛选的影响因子真实可靠。具体来说，对 SMBC 的直接贡献效应因子为脲酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶和蛋白

酶,对SMBN的直接贡献效应因子为脲酶、蔗糖酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和碱性磷酸酶,对SMBP的直接贡献效应因子为蔗糖酶,碱性磷酸酶, $\beta$ -葡萄糖苷酶,过氧化氢酶和淀粉酶。

### 3.4 结论

豫北地区人工草地建植6 a后,与沙化裸地相比,土壤脲酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶、蛋白酶、淀粉酶、 $\beta$ -葡萄糖苷酶和过氧化氢酶活性得到了提高,土层SMBC,SMBN和SMBP的积累明显,从高到低依次为紫花苜蓿/无芒雀麦混播、紫花苜蓿单播、无芒雀麦单播;SMBC,SMBN和SMBP与土壤7种酶均呈显著或极显著相关;通径分析表明:脲酶是影响SMBC和SMBN的首要因子,蔗糖酶是影响SMBP的首要因子。可见,在豫北地区实施人工草地建植可以有效改良土壤,紫花苜蓿/无芒雀麦混播是最佳的种植模式。

## 4 参考文献

- [1] FRIEDEL J K, MUNCH J C, FISCHER W R. Soil microbial properties and the assessment of available soil organic matter in a haplic Luvisol after several years of different cultivation and crop rotation [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, **28**(4/5): 479 – 488.
- [2] 叶莹莹, 刘淑娟, 张伟, 等. 喀斯特峰丛洼地植被演替对土壤微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(21): 6974 – 6982.  
YE Yingying, LIU Shujuan, ZHANG Wei, *et al.* Dynamics of soil microbial biomass and soil enzyme activity along a vegetation restoration gradient in a karst peak-cluster depression area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(21): 6974 – 6982.
- [3] 蒲琴, 胡玉福, 何剑锋, 等. 植被恢复模式对川西北沙化草地土壤微生物量及酶活性研究[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(4): 323 – 328.  
PU Qin, HU Yufu, HE Jianfeng, *et al.* Effect of vegetation restoration pattern on the soil microbial biomass and enzyme activity in desertification grassland of northwest Sichuan [J]. *J Soil Water Conserv*, 2016, **30**(4): 323 – 328.
- [4] 王文锋, 李春花, 黄绍文, 等. 不同施肥模式对设施菜田土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(3): 873 – 882.  
WANG Wenfeng, LI Chunhua, HUANG Shaowen, *et al.* Effects of different fertilization patterns on soil enzyme activities in greenhouse vegetable field [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(3): 873 – 882.
- [5] 李娟, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, **15**(5): 1093 – 1099.  
LI Juan, ZHAO Bingqiang, LI Xiuying, *et al.* Seasonal variation of soil microbial biomass and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes [J]. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2009, **15**(5): 1093 – 1099.
- [6] WANG Bing, XUE Sha, LIU Guobin, *et al.* Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China [J]. *Catena*, 2012, **92**(3): 186 – 195.
- [7] ZHANG Liqiong, WEI Xiaorong, HAO Mingde, *et al.* Changes in aggregate-associated organic carbon and nitrogen after 27 years of fertilization in a dryland alfalfa grassland on the Loess Plateau of China [J]. *J Arid Land*, 2015, **7**(4): 429 – 437.
- [8] 邵继承, 杨恒山, 范富, 等. 播种方式对紫花苜蓿+无芒雀麦草地土壤碳密度和组分的影响[J]. *草业科学*, 2010, **27**(6): 102 – 107.  
TAI Jicheng, YANG Hengshan, FAN Fu, *et al.* Effects of sowing methods on soil carbon density and composition in the alfalfa and *Bromus inermis* pasture [J]. *Pratacultural Sci*, 2010, **27**(6): 102 – 107.
- [9] RAIESI F, BEHESHTI B. Soil C turnover, microbial biomass and respiration, and enzymatic activities following range-land conversion to wheat-alfalfa cropping in a semi-arid climate [J]. *Environ Earth Sci*, 2015, **72**(12): 5073 – 5088.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 196 – 211.
- [11] MALHI S S, ZENTNER R P, HEIER K. Effectiveness of alfalfa in reducing fertilizer N input for optimum forage yield, protein concentration, returns and energy performance of brome-grass-alfalfa mixtures [J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2002, **62**(3): 219 – 227.
- [12] 赵彤, 闫浩, 蒋跃利, 等. 黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. *生态学报*, 2013, **33**(18): 5615 – 5622.

- ZHAO Tong, YAN Hao, JIANG Yueli, *et al.* Effects of vegetation types on soil microbial biomass C, N, P on the Loess Hilly Area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(18): 5615 – 5622.
- [13] KARA O, BABUR E, ALTUN L, *et al.* Effects of afforestation on microbial biomass C and respiration in eroded soils of Turkey [J]. *J Sustainable For*, 2016, **35**(6): 385 – 396.
- [14] ERKTAN A, CÉCILLON L, GRAF F, *et al.* Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics [J]. *Plant Soil*, 2016, **398**(1/2): 121 – 137.
- [15] JIANG Xiaojin, LIU Xiaoe, WANG Enheng, *et al.* Effects of tillage pan on soil water distribution in alfalfa-corn crop rotation systems using a dye tracer and geostatistical methods [J]. *Soil Tillage Res*, 2015, **150**: 68 – 77.
- [16] 张丽琼, 郝明德, 臧逸飞, 等. 苜蓿和小麦长期连作对土壤酶活性及养分的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(11): 3191 – 3196.
- ZHANG Liqiong, HAO Mingde, ZANG Yifei, *et al.* Effect of continuous cropping of wheat and alfalfa on soil enzyme activities and nutrients [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(11): 3191 – 3196.
- [17] BÖHME L, LANGER U, BÖHME F. Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, **109**(1/2): 141 – 152.
- [18] KATSALIROU E, DENG Shiping, NOFZIGER D L, *et al.* Long-term management effects on organic C and N pools and activities of C-transforming enzymes in prairie soils [J]. *Eur J Soil Biol*, 2010, **46**(5): 335 – 341.
- [19] TU Chen, TENG Ying, LUO Yongming, *et al.* PCB removal, soil enzyme activities, and microbial community structures during the phytoremediation by alfalfa in field soils [J]. *J Soils Sediments*, 2011, **11**(4): 649 – 656.
- [20] CHEN Hao, LI Dejun, ZHAO Jie, *et al.* Effects of nitrogen addition on activities of soil nitrogen acquisition enzymes: a meta-analysis [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2018, **252**: 126 – 131.