

## 4 种替代植物对黄顶菊入侵土壤养分和酶活性的影响

马杰<sup>1,2</sup>, 皇甫超河<sup>1</sup>, 易津<sup>2</sup>, 杨殿林<sup>1\*</sup>

1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019

**摘要:**入侵植物对土壤环境的影响是植物竞争取胜的重要生态策略之一, 而选择合适的植物可以替代控制和抵御外来植物的入侵。比较高丹草、向日葵、紫花苜蓿和多年生黑麦草4种植物与黄顶菊单种和混种后不同时期的土壤养分和土壤酶活性变化规律。结果表明: (1) 黄顶菊单独种植根区土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均显著低于紫花苜蓿和黄顶菊混种群落, 其有效磷含量显著低于高丹草和黄顶菊混种群落; (2) 紫花苜蓿和黄顶菊混种群落土壤脲酶、磷酸酶、蔗糖酶活性均显著高于黄顶菊单种群落。因此, 在本试验条件下, 高丹草、紫花苜蓿对土壤氮素转化利用能力比黄顶菊高, 且能竞争性抑制黄顶菊对土壤磷素的吸收, 利于实现对黄顶菊的替代控制。

**关键词:**黄顶菊; 高丹草; 紫花苜蓿; 土壤养分; 土壤酶活性; 替代控制

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2011) 05-0805-08

生物入侵被认为是导致世界范围内生态系统退化和生物多样性丧失的主要原因之一<sup>[1-3]</sup>。黄顶菊 (*Flaveria bidentis*), 又称二齿黄菊, 是一年生草本植物, 属于菊科堆心菊族黄顶菊属, 原产于南美洲。2001年首次在我国天津市、河北省发现, 目前已经蔓延到河北省84个县、天津市5个区和河南省、山东省的部分地市, 对发生地的植物多样性和粮食生产构成了巨大的威胁<sup>[4-5, 10]</sup>。黄顶菊种子结实量大, 种子小且易于扩散, 一旦入侵农田, 将与农作物争水、争肥、争阳光, 将会严重影响农作物的生长, 黄顶菊的根、茎、叶均能释放化感物质<sup>[6]</sup>, 在其入侵过程中, 这些化感物质能够抑制植物种子萌发和幼苗生长<sup>[6-7]</sup>, 同时黄顶菊植株表现出比伴生种更为优越的光合性状<sup>[8]</sup>, 从而严重影响了入侵地生物多样性水平, 且威胁到了农业生产安全。目前, 关于外来入侵植物的控制, 国内外大多采用的是人工拔除、化学防除和生物防治, 对黄顶菊的研究也主要集中在黄顶菊植株的化感效应等方面<sup>[6-7, 9]</sup>。近年来, 利用本地植物或具有高经济价值的植物来替代控制外来入侵植物的扩张和蔓延取得了较好的效果, 研究表明高丹草 (*Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 和多年生黑麦草 (*Lolium perenne*) 对黄顶菊具有较强的竞争优势, 是较好的替代控制材料<sup>[10]</sup>, 并且高丹草和紫花苜蓿已经在田间替代试验中表现出对黄顶菊良好的控制效果<sup>[11]</sup>。而向日葵 (*Helianthus annuus*), 是一年生草本, 生长迅速, 可以利用其生长迅速的特点在前期对黄顶菊产生竞争, 进而达

到对黄顶菊良好的控制效果。替代控制被认为是控制外来入侵植物而保持生态环境健康和稳定发展的一种有效的措施。关于黄顶菊对土壤生态的影响国内尚少见相关报道, 且之前关于外来入侵植物的研究都是通过直接在外来植物的入侵地采样, 野外调查不同植物土壤特性的差异来推断入侵植物的影响。这类研究结论的可靠性是以不同植物土壤的初始状态一致为前提的, 而这一点在野外取样中通常很难保证, 因此成为该类研究的主要缺陷。而将入侵种和土著种移栽到已知背景的土壤中, 监测不同植物土壤特性的改变则可以很好地解决这一问题。

众所周知, 土壤是生态系统的重要组成部分, 研究入侵植物与土壤环境之间的关系是揭示植物入侵机理的重要途径<sup>[12]</sup>。土壤能够通过腐屑分解活动改变养分的矿化速率及其在土壤中的空间分布, 影响土壤理化性质, 改变植物根际的激素状况, 从而间接地改变植物之间的竞争平衡, 影响植物发育、群落结构和演替<sup>[13]</sup>。植物对土壤养分的吸收利用和土壤的反馈作用是物种竞争取胜的一个重要驱动机制<sup>[14-18]</sup>。土壤酶是“植物-土壤酶-土壤养分”系统的联系纽带, 是土壤养分变化的重要参与者<sup>[14, 19-20]</sup>。

替代控制是利用植物间的相互竞争现象, 用一种或多种植物生长优势来抑制有害植物, 通常是通过资源的竞争而体现的<sup>[15-16]</sup>。黄顶菊入侵可以改变土壤养分和土壤酶活性, 创造对自身生长有利的土壤环境, 并借此增强其竞争能力, 实现种群的进

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目 (11ZCGYNC00300); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201103027)

作者简介: 马杰 (1983年生), 男, 硕士研究生, 主要从事植物生理生态、植物保护和生物安全的研究。E-mail: majie313@yahoo.com.cn

\*通信作者: 杨殿林 (1965年生), 男, 研究员, 主要从事生态农业与生物多样性研究。E-mail: dianlinyong@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-05-09

一步扩张<sup>[21]</sup>。王蕾等<sup>[22]</sup>研究表明黄顶菊根系分泌物改变了部分土壤理化性质,且通过对黄顶菊入侵后不同生长期土壤酶活性的比较,得出黄顶菊根系分泌物改变了土壤酶活性。闫素丽等<sup>[23]</sup>研究表明黄顶菊入侵降低了土壤细菌群落多样性,这些替代植物与黄顶菊混种后,又可提高土壤细菌群落多样性。本研究在初始养分条件相同的农田采用高丹草、紫花苜蓿、多年生黑麦草和向日葵与黄顶菊进行替代控制试验,比较分析几类群落土壤有效养分、土壤酶活性的差异和动态,以期了解几类群落对土壤酶活性和土壤养分的影响以及土壤反馈作用在其种间竞争中的作用,为黄顶菊的替代控制及其生态管理提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于河北省沧州市献县陌南镇镇北(38°15.505'N, 115°57.838'E),地处华北平原,海拔5米,该地区气候类型属于温带大陆性季风气候。四季分明,年降水量约560 mm,日照全年平均为2800 h,日照率为31.96%,无霜期189 d,年平均气温12.3℃。该地区的土壤类型属于潮土,土质较坚实,质地较黏,轻度盐渍化,土壤pH值偏弱碱性,土壤全氮含量为82 g·kg<sup>-1</sup>,土壤有效磷含量为2.8 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤速效钾含量为121 mg·kg<sup>-1</sup>。该地区农田初始养分条件相同,为入侵植物群落和本地植物群落生境的选择提供了自然条件。

### 1.2 试验材料

黄顶菊种子采自河北省沧州市献县陌南镇镇北。高丹草(*Sorghum bicolor*×*Sorghum sudanense*)、多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、向日葵(*Helianthus annuus*)种子均购自北京鑫农丰种业公司。

### 1.3 试验设计

2009年4月底,人工建立黄顶菊单种(H)、多年生黑麦草单种(D)、高丹草单种(G)、紫花苜蓿单种(Z)、向日葵单种(X)、多年生黑麦草和黄顶菊混种(D+H)、高丹草和黄顶菊混种(G+H)、紫花苜蓿和黄顶菊混种(Z+H)、向日葵和黄顶菊混种(X+H)植物群落。试验中,首先播种牧草种子,播种方式均为开沟条播,行距30 cm,播深1.5~2.5 cm,覆土使其与地表保持平整。然后将黄顶菊与细河沙按照1:10比例混合均匀撒于表土层,镇压一遍,使种子与土壤颗粒密切接触。为使各试验处理达到设计密度比例要求且分布均匀,在播种后20 d进行间苗,必要时移栽补种相同生长阶段幼苗,此时供试植物幼苗多为1~2片真叶,以满足试验设计要求。试验过程中不施肥,每10~15 d人工拔除一

次滋生的其他植物,适时定量浇水。在单位面积总植株密度一定的条件下,单种植密度黄顶菊、高丹草、紫花苜蓿、多年生黑麦草处理设定为300株·m<sup>-2</sup>,向日葵单种处理设置为30株·m<sup>-2</sup>;混种植密度黄顶菊、高丹草、紫花苜蓿和多年生黑麦草替代处理设定为150株·m<sup>-2</sup>,向日葵混种处理设置为15株·m<sup>-2</sup>。试验采用完全随机区组试验设计,小区大小为3.0 m×3.0 m,共11个处理,每个处理重复5次,共计55个小区。

播种的同时,对初始样地土壤进行取样,生长1个月,从6月至9月,每隔30 d对这11类群落根区土壤进行取样。每个处理的每个重复均采用5点取样法,在植物主根周围向下垂直取0~20 cm的土壤,组成混合土样,装袋取回。将取回的鲜土分成2份,1份立即过筛、分装保存于冰箱,在2周内完成土壤铵态氮、硝态氮和土壤酶活性的测定;1份于室内自然风干、过筛、分装用于土壤速效磷的测定。

### 1.4 试验方法

土壤铵态氮含量测定采用氯化钾浸提-靛蓝比色法<sup>[24]</sup>;土壤硝态氮含量采用氯化钾浸提-紫外分光光度法<sup>[24]</sup>;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[24]</sup>。土壤脲酶活性测定采用柠檬酸盐比色法<sup>[25-27]</sup>,以24 h后1 g土壤中NH<sub>3</sub>-N的毫克数表示;土壤磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法<sup>[25-27]</sup>,酶活性以2 h后100 g土壤中P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的毫克数表示;土壤蔗糖酶活性的测定采用3,5-二硝基水杨酸比色法<sup>[25-27]</sup>,酶活性以24 h后1 g土壤中葡萄糖的毫克数表示。

### 1.5 数据分析

不同种群随时间变化其土壤酶活性和土壤养分的差异及其变化趋势,运用重复测量方差分析,采用Tukey多重比较法;同一时期不同群落土壤酶活性及土壤养分的差异运用单因素方差分析(One-Way ANOVA;LSD Test);土壤酶活性和土壤养分间的关系运用二元变量相关分析,采用Pearson分析方法。数据分析采用SPSS 13.0统计软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植物群落根区土壤养分及其动态的比较

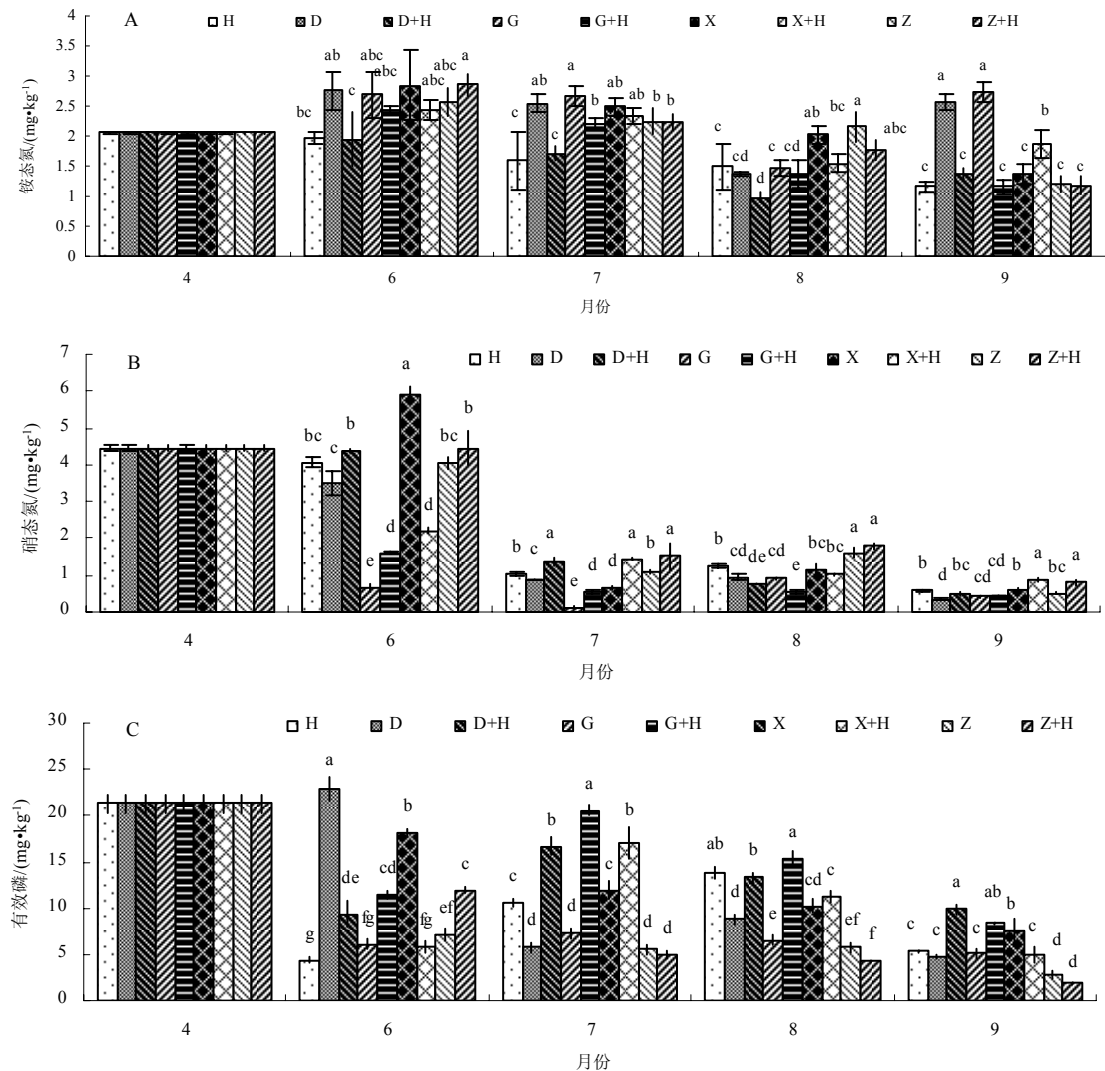
如图1所示,不同群落不同层次间不同土壤养分含量差异较大,具体表现如下所述。

1)各群落土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量在生长初期(6月)均高于初始土壤NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量(图1A),而土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N在生长初期除向日葵群落高于初始土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量外,其余群落均等于或低于土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量(图1B)。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量在多年生黑麦草和黄顶菊混种群落最低,在生长后期(9月)多

年生黑麦草群落和向日葵群落的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量明显高于其他群落。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量在高丹草群落最低，在生长初期（6月）黄顶菊群落、多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落差异不显著；在生长旺盛期（8月），高丹草和黄顶菊混种群落的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量最低，紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量最高，其余群落无显著差异。在生长末期， $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在黄顶菊群落显著低于多年生黑麦草群落、高丹草群落、向日葵与黄顶菊混种群落，而与其他群落无显著差异。在发育过程中，黄顶菊群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均呈下降趋势，其余群落则均先降低后升高；

而  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  含量则在多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草和黄顶菊混种群落均呈下降趋势，其余群落则均先降低后升高再降低，在生长末期达到最低，最低值在黄顶菊群落、多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落依次为 0.59、0.50、0.44、0.51  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  与在生长初期最高含量值相比分别降低了 85.5%、88.6%、72.7%和 87.4%（图 1A，图 1B）。

2) 黄顶菊群落、多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵和黄顶菊混种群落土壤有效磷含量在生长过程中均先升高，后下降，而向日葵群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落则呈下降趋势。在生长后期黄顶菊群落、多年生黑麦草群落、高丹



H、D、G、Z、X、D+H、G+H、Z+H、X+H 分别代表黄顶菊单种群落、多年生黑麦草单种群落、高丹草单种群落、紫花苜蓿单种群落、向日葵单种群落、多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落、向日葵和黄顶菊混种群落。不同字母表示在同一时期不同群落间根系养分的差异显著 (mean±SD, n=5)

图 1 不同植物群落土壤有效养分含量及季节动态

Fig.1 Soil available nutrient contents and their seasonal dynamics of different plant communities

草群落、向日葵和黄顶菊混种群落有效磷含量无显著差异,其余群落差异显著,但生长旺盛期黄顶菊群落有效磷含量显著高于紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落。在生长过程中,不同群落土壤有效磷含量从 8 月到 9 月均呈下降趋势,黄顶菊群落、多年生黑麦草群落、多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵群落、向日葵和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落依次降低了 61.1%、42.0%、13.5%、21.5%、45.5%、25.7%、55.8%、50.9%、48.1% (图 1C)。

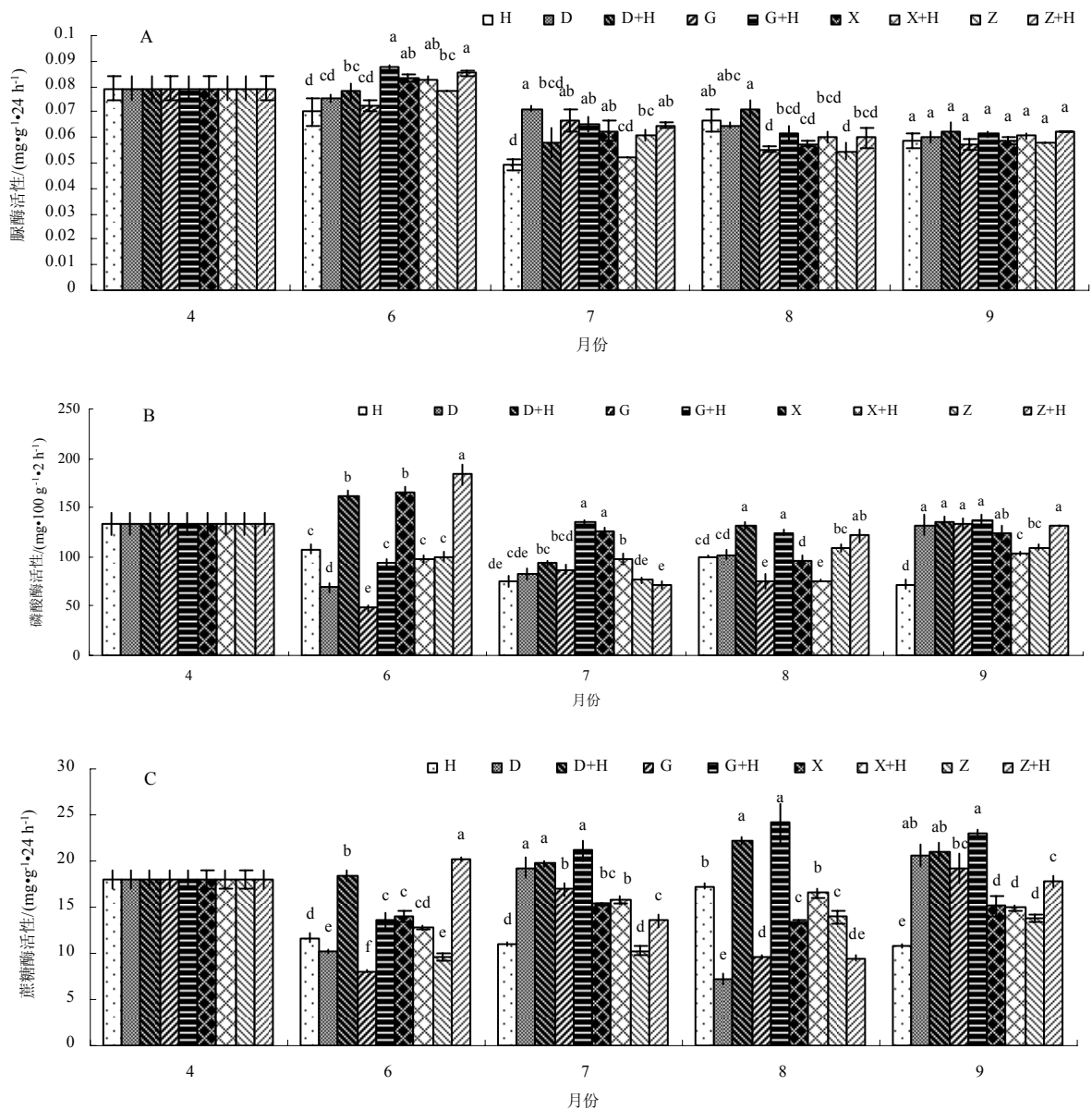
2.2 不同群落土壤酶活性的比较及其动态

不同群落土壤 3 种酶活性与初始土壤酶活性相

比差异不同,群落间不同土壤酶活性关系很不一致,变化趋势也不相同(图 2)。

不同土壤酶活性在不同群落间的变化为:

1) 脲酶活性在生长初期和生长期黄顶菊群落脲酶活性显著低于其他群落脲酶活性,在生长后期,脲酶活性没有显著差异。在发育过程中,脲酶活性在多年生黑麦草群落、高丹草群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵群落呈下降趋势,在向日葵和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落则先降低后升高,说明该酶在不同植物种类间变化不同,黄顶菊群落、多年生黑麦草群落、多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵群落、向日



图注同图 1

图 2 不同植物群落土壤酶活性含量及季节动态

Fig.2 Soil enzymatic activities and their seasonal dynamics of different plant communities

葵和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落在生长初期酶活性均最高，分别为0.07、0.075、0.078、0.073、0.087、0.083、0.083、0.078、0.085 mg·g<sup>-1</sup>·24 h<sup>-1</sup>，与各自生长后期相比分别高18.6%、25%、23.8%、28.1%、42.6%、40.7%、36.1%、34.5%、37.1%（图2A）。

2) 磷酸酶活性在生长初期紫花苜蓿和黄顶菊混种群落显著高于其他群落，在生长后期黄顶菊群落则显著低于其他所有群落。在生长过程中，多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、向日葵群落、向日葵和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落磷酸酶活性则均先降低后升高，而仅多年生黑麦草群落磷酸酶活性呈升高趋势，在生长后期活性最高，为132.5 mg·100 g<sup>-1</sup>·2 h<sup>-1</sup>（图2B）。

3) 在生长旺盛期蔗糖酶活性在高丹草和黄顶菊混种群落达到最高，在多年生黑麦草群落最低；在多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落生长过程中，蔗糖酶活性均呈单峰曲线变化，在生长旺盛期达到最高，最高值分别为22.26、24.14、16.51、13.97 mg·g<sup>-1</sup>·24 h<sup>-1</sup>，与各自初期相比其酶活性分别升高了20.65%、78.29%、28.88%、45.37%（图2C）。

### 2.3 不同群落土壤酶活性与土壤养分之间的关系

从图1、图2分析发现，不同植物群落土壤酶活性与土壤肥力因子具有较为密切的关系，对其不同土壤酶活性与土壤肥力的相关分析见表1。

表1 相关系数表明：

1) 脲酶活性除在高丹草群落外，其他群落与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量呈显著正相关；而仅在向日葵群落、高丹草和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落与NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈显著正相关，其他群落无显著相关性；但脲酶活性与有效磷含量相关性在不同群落间不一致，在多年生黑麦草和黄顶菊混种群落、向日葵和黄顶菊混种群落呈显著负相关，在多年生黑麦草群落、向日葵群落、紫花苜蓿群落呈显著正相关，其他群落无显著相关性。

2) 磷酸酶活性在高丹草和黄顶菊混种群落与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量呈显著负相关，在向日葵群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、有效磷含量呈显著正相关，在高丹草群落、向日葵和黄顶菊混种群落、紫花苜蓿群落与3种养分均无显著相关性。

3) 蔗糖酶活性在高丹草和黄顶菊混种群落与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N含量均呈显著负相关，在紫花苜蓿群落与3种养分均呈显著负相关，而在黄顶菊群落仅与有效磷含量呈显著负相关，与其他养分无显

表1 不同植物群落土壤酶活性与土壤养分的相关系数  
Table 1 The correlation coefficients of soil enzymatic activities and soil nutrients of different plant communities

植物群落	土壤酶	w(铵态氮)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(硝态氮)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	w(有效磷)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
H		0.362	0.633*	-0.189
D		0.354	0.793**	0.704*
D+H		0.157	0.648*	-0.611*
G		0.533	-0.261	0.357
G+H	脲酶	0.759**	0.979**	-0.186
X		0.644*	0.952**	0.893**
X+H		0.355	0.757**	-0.683*
Z		0.568	0.883**	0.593*
Z+H		0.788**	0.909**	0.942**
H			0.671*	0.767**
D		-0.205	-0.770**	-0.679*
D+H		0.115	0.581*	-0.879**
G		0.220	-0.410	-0.442
G+H	磷酸酶	-0.587*	-0.943**	0.270
X		0.528	0.810**	0.770**
X+H		0.493	0.193	-0.272
Z		-0.384	0.061	-0.296
Z+H		0.296	0.726**	0.634*
H			-0.009	-0.081
D		0.579*	0.521	-0.583*
D+H		-0.898	-0.791**	0.221
G		0.463	-0.757**	-0.169
G+H	蔗糖酶	-0.747**	-0.934**	0.183
X		-0.346	-0.379	-0.360
X+H		-0.573	-0.780**	0.605*
Z		-0.625*	-0.618*	-0.589*
Z+H		0.293	0.478	0.493

n=20；\*：α=0.05，\*\*：α=0.01；H、D、G、Z、X、D+H、G+H、Z+H、X+H：同图1。

著相关性。

### 3 讨论

外来入侵植物多具有生长速度快和养分吸收能力强的特性，众多研究表明，入侵植物会提高入侵地土壤的肥力水平，而较高的土壤养分水平反过来又可以促进入侵种的快速生长，有利于进一步的入侵和扩散<sup>[28-29]</sup>。同时，植物通过影响生境土壤对自身产生积极作用而影响其他植物的生长，被认为是植物竞争演替的重要驱动机制之一<sup>[30]</sup>。张天瑞等<sup>[21]</sup>前期研究表明，与裸土和本地植物土壤相比，黄顶菊入侵显著提高了有机质、全氮、硝态氮和铵态氮的含量。而在增施氮肥的条件下，黄顶菊表现出更高的利用效率，显示出其较强入侵性<sup>[31]</sup>。闫素丽等<sup>[23]</sup>研究表明，单独种植黄顶菊的土壤细菌多样性下降，并且在整个生长期多样性指数多数情况下低于高丹草、向日葵、紫花苜蓿和多年生黑麦草单种或与黄顶菊混种的土壤，黄顶菊入侵降低了土壤细

菌群落多样性,4种替代植物与黄顶菊混种后,又可提高土壤细菌群落多样性,这种变化对黄顶菊成功入侵和替代防控具有重要作用。对加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)<sup>[32]</sup>、小檗(*Berberis thunbergii*)<sup>[33]</sup>、糖蜜草(*Melinis minutiflora*)<sup>[33-34]</sup>和紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)<sup>[14]</sup>等植物的研究也发现,这些入侵种均因能提高土壤无机氮养分含量,体现出正反馈效应,从而大大增加了本身的竞争力。

本研究各植物群落土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量在生长初期都要高于初始土壤对应含量,说明各种植物均具有提高土壤可利用氮的能力。比较而言,紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落、高丹草群落、高丹草和黄顶菊混种群落、向日葵群落、向日葵和黄顶菊混种群落土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  含量均显著高于黄顶菊群落对应土壤养分含量。同时,紫花苜蓿群落、紫花苜蓿和黄顶菊混种群落土壤  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  明显高于黄顶菊群落对应土壤。表明紫花苜蓿、高丹草、向日葵可能具备比黄顶菊更强的对土壤氮素的转化利用能力,从而在种间竞争中处于优势。研究发现,植物竞争中紫花苜蓿增加土壤有效氮的能力同时高于高丹草和向日葵。因此,我们认为在本试验条件下,紫花苜蓿等对土壤氮素的更强的转化利用能力是其竞争取胜的重要生理机制之一。

与土壤无机氮含量关系类似,在黄顶菊群落土壤有效磷的含量在生长期开始,均高于在多年生黑麦草群落、高丹草群落、紫花苜蓿群落的含量,而在紫花苜蓿和黄顶菊混种群落最低。这说明黄顶菊增加土壤可利用磷的能力比紫花苜蓿要强,但在种间竞争中紫花苜蓿大大降低了黄顶菊土壤可利用磷的能力;可以推测,黄顶菊吸收可利用磷的量较紫花苜蓿少,在种间竞争中大大促进了紫花苜蓿对可利用磷的吸收。研究表明,土壤有效磷含量的降低通常会限制植物的生长<sup>[14]</sup>,微环境土壤养分的高低与植物间的竞争和演替有着非常紧密的关系<sup>[35]</sup>。可见,在竞争中高丹草强烈抑制黄顶菊吸收利用磷的能力和有效磷的竞争性利用可能是高丹草生长竞争取胜的一种重要生理策略。

不同植物群落土壤养分含量的差异,其中一个非常重要的原因是植物根系分泌物引起土壤酶活性改变所导致的。研究表明,土壤脲酶直接参与土壤中含氮有机化合物的转化,其活性强度常用来表征土壤氮素供应强度,研究脲酶活性能够了解氮素转化能力和氮素有效化强度<sup>[34]</sup>。磷酸酶能够酶促分解土壤含磷化合物参与循环,磷酸酶活性与有效磷含量正相关<sup>[34,36]</sup>;而蔗糖酶对土壤有机质的转化和增加可溶性物质具有很重要的作用<sup>[37-38]</sup>。李会娜等

<sup>[39]</sup>对紫茎泽兰的研究表明,紫茎泽兰入侵提高了脲酶和磷酸酶的活性。本研究不同植物群落3种土壤酶活性与其土壤养分含量变化一致,说明土壤酶活性在不同植物群落土壤养分变化中可能发挥着重要作用。紫花苜蓿和黄顶菊混种群落的3种酶活性(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶)均显著高于黄顶菊群落,这也是导致不同植物群落土壤养分发生变化的重要机制之一,这与蒋智林对紫茎泽兰<sup>[14]</sup>的研究结果一致。从不同植物群落酶活性的季节动态变化来看,不同土壤酶活性差异不同,高丹草和黄顶菊混种群落的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与三种酶均显著相关,蔗糖酶活性均呈现单峰趋势,在生长旺盛期达到最高,脲酶活性均呈下降趋势;紫花苜蓿和黄顶菊混种群落的脲酶活性与3种养分均呈显著正相关,磷酸酶活性与有效磷呈显著正相关,其他群落变化各异。这可能是此时期植物根系分泌活跃、雨水充足和气温上升等原因共同引起的。这些均可能由植物根系分泌、雨水和气温等原因共同引起的。各物种植株不同养分利用效率的差异及其不同的生理策略是各物种在不同条件下竞争能力差异的内在原因。

今后应进一步研究不同入侵生境黄顶菊的替代和管理措施(如增施氮磷肥料)条件下土壤养分循环的影响规律,以利于更全面地了解生态替代技术调控外来入侵植物的土壤生态学机制,为形成更有效的生态学控制技术提供科学依据。

#### 4 结论

(1) 黄顶菊群落根际土壤铵态氮、硝态氮含量均显著低于紫花苜蓿和黄顶菊混种群落,而其有效磷含量显著低于高丹草和黄顶菊混种群落。紫花苜蓿和黄顶菊混种群落的3种酶活性(脲酶、磷酸酶、蔗糖酶)均显著高于黄顶菊群落。

(2) 试验中土壤酶活性和不同土壤肥力之间相关分析结果显示,脲酶与硝态氮、铵态氮含量在高丹草和黄顶菊混种群落和紫花苜蓿和黄顶菊混种群落呈显著正相关;磷酸酶与有效磷含量在紫花苜蓿和黄顶菊混种群落呈显著正相关,而蔗糖酶在高丹草和黄顶菊混种群落呈显著负相关。初步认为高丹草、紫花苜蓿对土壤含氮化合物的活性比黄顶菊强,而且在种间竞争中能够抑制黄顶菊对土壤有效磷的活化,以此达到竞争抑制效果。

#### 参考文献:

- [1] VITDUSEK P M, TUMER D R, PARTON W J, et al. Litter decomposition on the MauRa Loa environment matrix, Hawaii, I: Patterns mechanisms and models[J]. Ecology, 1994, 75(2):418-429.
- [2] BASKIN Y. Winners and losers in a changing world: Global changes may promote invasions and alter the fate of invasive species[J]. Bio

- Science, 1998, 48(10):788-792.
- [3] 万方浩, 郑小波, 郭建英. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.  
WAN Fanghao, ZHENG Xiaobo, GUO Jianying. Invasive alien species in agriculture and forestry and control of biological[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [4] 高贤明, 唐廷贵, 梁宇, 等. 外来植物黄顶菊的入侵警报及防控对策[J]. 生物多样性, 2004, 12(2):274-279.  
GAO Xianming, TANG Tinggui, LIANG Yu, et al. An alert regarding biological invasion by a new exotic plant, *Flaveria bidentis*, and strategies for its control[J]. Chinese Biodiversity, 2004, 12(2):274-279.
- [5] 刘全儒. 中国菊科植物一新归化属——黄菊属[J]. 植物分类报, 2005, 43(2): 178-180.  
LIU Quanru. A newly naturalized genus of Compositae in China—*Flaveria*[J]. Journal of Systematics and Evolution, 2005, 43(2): 178-180.
- [6] 任艳萍, 江莎, 古松, 等. 外来植物黄顶菊根、茎、叶的化感作用初探[J]. 植物保护, 2009, 35(3):36-40.  
Ren Yanping, JIANG Sha, GU Song, et al. Preliminary studies on allelopathy of the aqueous extracts of an alien plant, *Flaveria bidentis* [J]. Plant protection, 2009, 35(3):36-40.
- [7] 张凤娟, 李继军, 徐兴友, 等. 环境因子对黄顶菊种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1947-1953.  
ZHANG Fengjuan, LI Jiqun, XU Xingyou, et al. Influence of environmental factors on seed germination of *Flaveria bidentis*(L.) Kuntze [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4):1947-1953.
- [8] 皇甫超河, 王志勇, 杨殿林. 外来入侵种黄顶菊及其伴生植物光合特性初步研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(4):0781-0788.  
HUANGFU Chaohe, WANG Zhiyong, YANG Dianlin. Basic Photosynthetic Characteristics of Exotic Invasive Weed *Flaveria bidentis* and Its Companion Species[J]. Acta Bot Boreal -Occident Sin, 2009, 29(4):0781-0788.
- [9] 李香菊, 张米茹, 李永军, 等. 黄顶菊水提取液对植物种子发芽及根根伸长的化感作用研究[J]. 杂草科学, 2007, (4): 15-19.  
LI Xiangju, ZHANG Miru, LI Yongjun, et al. Allelopathy study of aqueous extract of *Flaveria bidentis* on seed germination and radicle elongation [J]. Weed Science, 2007, 4:15-19.
- [10] 马杰, 易津, 皇甫超河, 等. 入侵植物黄顶菊与 3 种牧草竞争效应研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(5):1020-1028.  
MA Jie, YI Jin, HUANGFU Chaohe, et al. Competitive Effects between Invasive Plant *Flaveria bidentis* and Three Pasture Species[J]. Acta Bot Boreal -Occident Sin, 2010, 30(5):1020-1028.
- [11] 皇甫超河, 张天瑞, 刘红梅, 等. 三种牧草植物对黄顶菊田间替代控制[J]. 生态学杂志, 2010, 29(8):1511-1518.  
HUANGFU Chaohe, ZHANG Tianrui, LIU Hongmei, et al. Field replacement control of *Flaveria bidentis* with three forage species[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(8): 1511-1518.
- [12] CHAPIN F S. Effects of plant traits on ecosystem and regional processes: a conceptual framework for predicting the consequences of global change[J]. Annals of Botany, 2003, 91: 455-463.
- [13] Kreuzer K, Bonkowski M, Langel R, et al. Decomposer animals (Lumbricidae, Collembola) and organicmatter distribution affect the performance of *Lolium perenne* (Poaceae) and *Trifolium repens* (Fabaceae)[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 2005-2011.
- [14] 蒋智林, 刘万学, 万方浩, 等. 紫茎泽兰与非洲狗尾草单、混种群落土壤酶活性和土壤养分的比较[J]. 植物生态学报, 2008, 32(4): 900-907.  
JIANG Zhilin, LIU Wanxue, WAN Fanghao, et al. Competitive Effects Between *Ageratina adenophora* (Asteraceae) and *Setaria sphacelata* (Gramineae)[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 41(5): 1347-1354.
- [15] LUGO A E. The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures[J]. Forest Ecology and Management, 1997, 99: 9-19.
- [16] 姚朝晖, 张无敌, 刘祖明. 恶性有毒杂草紫茎泽兰的防治与利用[J]. 农业与技术, 2003, 23(1):23-28.  
YAO Chaohui, ZHANG Wudi, LIU Zuming. Control and Utilization of the Poisonous Weed *Eupatorium adenophorum*[J]. Agriculture & Technology, 2003, 23(1):23-28.
- [17] VITOUSEK P M, ABER C J, HOWARTH R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle:causes and consequences[J]. Ecological Applications, 1997, 7:737-750.
- [18] SUDING K N, LARSON J R, THORSOS E, et al. Species effects on resource supply rates:do they influence competitive interactions[J].? Plant Ecology, 2004, 175:47-58.
- [19] 施卫明. 根系分泌物与养分有效性[J]. 土壤, 1993, 5.  
SHI Weiming. Root exudates and nutrient availability[J]. Soils, 1993, 5.
- [20] Alkorta I, Aizpurua A, Riga P, et al. Albizu I, Amezaga I, Garbisu C. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health[J]. Reviews on Environmental Health, 2003, 18:65-73.
- [21] 张天瑞, 皇甫超河, 白小明, 等. 黄顶菊入侵对土壤养分和酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(7):1-5.  
ZHANG Tianrui, HUANGFU Chaohe, BAI Xiaoming, et al. Effects of *Flaveria bidentis* invasion on soil nutrient contents and enzyme activities[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7):1-5.
- [22] 王蕾. 外来植物黄顶菊入侵对土壤理化性质及生物活性的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008:1-5.  
WANG Lei. Effect of *Flaveria Bidentis*(L) Kuntze on Soil Physical and Chemical Properties and Biological Activity[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2008: 1-5.
- [23] 闫素丽, 皇甫超河, 李刚, 等. 4种牧草植物替代控制对黄顶菊入侵土壤细菌多样性的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 45-55.  
YAN Suli, HUANGFU Chaohe, LI Gang, et al. Effects of replacement control with four forage species on bacterial diversity of soil invaded by *Flaveria bidentis*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35 (1): 45-55.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1981.  
BAO Shidan. Soil Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3th ed. Beijing: China Agriculture Press, 1981.
- [25] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.  
GUAN Songyin. Soil enzyme and study method[M]. Beijing: ChinaAgriculture Press, 1986.
- [26] 郑洪元, 张德生. 土壤动态生物化学及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1987.  
ZHENG Hongyuan, ZHANG Desheng. Soil Dynamics Biochemistry and Research[M]. Beijing: ChinaAgriculture Press, 1987.
- [27] 郑洪元, 周礼恺, 张德生. 土壤酶活性[M]. 北京: 农业出版社, 1980.  
ZHENG Hongyuan, ZHOU Kaili, ZHANG Desheng. Soil enzyme[M]. Beijing: ChinaAgriculture Press, 1980.
- [28] HUENNEKE L, HAMBURG S P, KOIDE R, et al. Effects of soil resources on plant invasion and community structure in Californian serpentine grassland[J]. Ecology, 1990, 71(2):478-491.
- [29] GRUBB P J. Root competition in soil of different fertility: A paradox resolved[J].? Phytocoenologia, 1994, 24:495-505.
- [30] HOLMGREM M, SCHEFFER M, HUSTON M A. The interplay of facilitation and competition in plant communities[J]. Ecology, 1997, 78(7): 1966-1975.
- [31] 皇甫超河, 王楠楠, 陈冬青, 等. 增施氮肥对黄顶菊与高丹草苗期竞争

- 的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(3):672-678.  
HUANGFU Chaohe, WANG Nannan, CHEN Dongqing, et al. Effects of increased soil nitrogen on the competitive performance of *Flaveria bidentis* and *Sorghum bicolor*×*Sorghum sudanense* at seedling stage[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(3):672-678.
- [32] 李东坡, 武志杰, 陈利军, 等. 长期培肥黑土脲酶活性动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12):2208-2212.  
LI Dongpo, WU Zhijie, CHEN Lijun, et al. Dynamics of urease activity in a long-term fertilized black soil and its affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12):2208-2212.
- [33] 杨玉盛, 何宗明, 俞新妥, 等. 杉木林取代阔叶林后土壤微生物学活性变化的研究[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(4):313-318.  
YANG Yusheng, HE Zhongming, YU Xintuo, et al. Changes of soil biological activities after the replacement of broadleaved forest by Chinese fir forest[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1997, 3(4): 313-318.
- [34] 陆建忠, 裴伟, 陈家宽, 等. 入侵种加拿大一枝黄花对土壤特性的影响[J]. 生物多样性, 2005, 13(4):347-356.  
LU Jianzhong, QIU Wei, CHEN Jiakuan, et al. Impact of invasive species on soil properties: Canadian goldenrod (*Solidago canadensis*) as a case study[J]. Chinese Biodiversity, 2005, 13(4): 347-356.
- [35] ASNER G P, BEATTY S W. Effects of an African grass invasion on Hawaiian shrubland nitrogen biogeochemistry[J]. Plant and Soil, 1996, 186: 205-211.
- [36] 王娟, 谷雪景, 赵吉. 羊草草原土壤酶活性对土壤肥力的指示作用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):934-938.  
WANG Juan, GU Xuejing, ZHAO Ji. Function of Soil Enzyme Activities in Indicating Soil Fertility in Leyluse Chinensis Steppe[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4):934-938.
- [37] 孟亚利, 王立国, 周治国, 等. 麦棉两熟复合根系群体对棉花根际非根际土壤酶活性和土壤养分的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(5): 904-910.  
MENG Yali, WANG Ligu, ZHOU Zhiguo, et al. Effect of the Composite Root Population of Wheat-Cotton Double Cropping System on Soil Enzyme Activity and Soil Nutrient Content at the Cotton Rhizosphere and Non-Rhizosphere Zones[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(5):904-910.
- [38] 马杰. 入侵植物黄顶菊生态调控研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010: 41-45.  
MA Jie. Research on Ecological Control of Invasive Plant *Flaveria bidentis*[D]. HuhhoT: Inner Mongolia Agricultural University, 2010: 41-45.
- [39] 李会娜, 刘万学, 戴莲, 等. 紫茎泽兰入侵对土壤微生物、酶活性及肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3964-3971.  
LI Huina, LIU Wanxue, DAI Lian, et al. Invasive Impacts of *Ageratina adenophora* (Asteraceae) on the Changes of Microbial Community Structure, Enzyme Activity and Fertility in Soil Ecosystem [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3964-3971.

## Effects of four replacement plants on nutrient and enzymatic activities of soil invaded by *Flaveria bidentis*

MA Jie<sup>1,2</sup>, HUANGFU Chaohe<sup>1</sup>, YI Jin<sup>2</sup>, YANG Dianlin<sup>1\*</sup>

1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China;

2. Inner Mongolia Agricultural University College Of Agricultural, Inner Mongolia HuhhoT 010019, China

**Abstract:** Effect on soil environment is one of important ecological strategies by which invasive plants outperform native species, and selection of appropriate plants might replace the invasive plants or resist their further invasion. In present study, changes in soil fertility and soil enzyme activity were investigated in the cultivation of four replacement plants (*Sorghum bicolor*×*Sorghum sudanense*, *Helianthus annuus*, *Medicago sativa* and *Lolium perenne*) mixed with *Flaveria bidentis* in different growth period. The results showed that compared with *F. bidentis* monoculture, (1)  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  levels of rhizosphere soil in were increased significantly when mixed with *M. sativa*, and available phosphorus content was significantly higher when mixed *S. bicolor*×*S. sudanense*; (2) the urease, phosphatase and invertase activities in *M. sativa* replacement treatment were significantly higher. It can be inferred that both *S. bicolor*×*S. sudanense* and *M. sativa* might have superior capacity in utilization soil of nitrogen compounds than *F. bidentis*, and they can competitively inhibit its activation of phosphorus in soil as well in our experiment condition, helping explain their effective replacement control on this invasive species.

**Key words:** *Flaveria bidentis*; *Sorghum bicolor*×*Sorghum sudanense*; *Medicago sativa*; Soil enzyme activities; Soil nutrient; Replacement control