



丹江口水源涵养区退耕还草土壤线虫群落变化特征

周广帆, 秦洁, 祁小旭, 王瑞琪, 赵建宁, 谭炳昌, 杨殿林

引用本文:

周广帆, 秦洁, 祁小旭, 等. 丹江口水源涵养区退耕还草土壤线虫群落变化特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(3): 308–318.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0247>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

覆盖作物不同利用方式对猕猴桃园土壤微生物群落结构的影响

李青梅, 张玲玲, 赵建宁, 张艳军, 刘红梅, 王华玲, 王慧, 杨殿林, 张凡, 翁昌明  
*农业资源与环境学报*. 2020, 37(3): 319–325 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0627>

十堰猕猴桃果园生草生态效应的分析

朱先波, 潘亮, 王华玲, 肖丽丽, 钟云鹏, 齐秀娟, 吴伟  
*农业资源与环境学报*. 2020, 37(3): 381–388 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0486>

保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展

沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 王明亮, 杨殿林, 赵建宁, 李刚, 轩清霞, 王亮  
*农业资源与环境学报*. 2020, 37(3): 361–370 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0496>

茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 沈晓琳, 赵建宁, 王慧, 黄进, 张小福  
*农业资源与环境学报*. 2020, 37(3): 371–380 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0605>

土壤与基质栽培系统对生菜(*Lactuca sativa*)根际细菌群落的影响

梁韵, 赵丽, 黄丹枫  
*农业资源与环境学报*. 2017, 34(1): 73–79 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0147>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

周广帆, 秦洁, 祁小旭, 等. 丹江口水源涵养区退耕还草土壤线虫群落变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 308–318.

ZHOU Guang-fan, QIN Jie, QI Xiao-xu, et al. Effect of restoration of cultivated land to artificial grassland on soil nematodes communities in Danjiangkou water ecological conservation function area[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 308–318.



开放科学 OSID

## 丹江口水源涵养区退耕还草土壤线虫群落变化特征

周广帆<sup>1,2,3</sup>, 秦洁<sup>2,3</sup>, 祁小旭<sup>2,3</sup>, 王瑞琪<sup>2,3</sup>, 赵建宁<sup>2,3</sup>, 谭炳昌<sup>2,3</sup>, 杨殿林<sup>2,3\*</sup>

(1. 沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191)

**摘要:**为评估丹江口水源涵养区退耕还草的土壤生态效应, 2017年9月, 选取3块同一土壤类型、退耕3年的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)草地作为退耕还草的代表样地, 以相邻未退耕的玉米(*Zea Mays*)田为对照, 比较分析退耕还草土壤线虫群落的变化特征。结果表明: 退耕还草样地0~10 cm土层含水量显著提高15.86% ( $P < 0.05$ ), pH值显著降低5.06% ( $P < 0.05$ ); 10~20 cm土层pH值显著降低4.57% ( $P < 0.05$ ), 有效磷含量显著降低26.83% ( $P < 0.05$ )。退耕种植紫花苜蓿草地共鉴定出土壤线虫18 307条, 49个属, 未退耕玉米田共鉴定出土壤线虫10 706条, 45个属, 退耕还草后土壤线虫c-p类群由短世代型向长世代型转移, 土壤环境受到扰动降低, 土壤线虫群落的多样性和稳定性增加, 结构指数(SI)和富集指数(EI)表明退耕还草提高了土壤健康程度, 同时降低了土壤所受的干扰程度。土壤线虫数量与土壤pH值、含水量、全氮和硝态氮含量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ); 食细菌线虫和食真菌线虫相对丰度与土壤有效磷含量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 植物寄生性线虫和捕/杂食线虫相对丰度与有机碳和铵态氮含量呈极显著相关 ( $P < 0.01$ ), 与全氮含量呈显著相关 ( $P < 0.05$ )。研究表明, 退耕还草改变了土壤pH值及全氮、有效磷养分含量, 改变了土壤线虫群落结构和多样性, 提升了土壤健康水平。

**关键词:**丹江口; 水源涵养区; 退耕还草; 土壤理化因子; 土壤线虫; 生态指数

中图分类号: S154.386

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)03-0308-11

doi: 10.13254/j.jare.2018.0247

### Effect of restoration of cultivated land to artificial grassland on soil nematodes communities in Danjiangkou water ecological conservation function area

ZHOU Guang-fan<sup>1,2,3</sup>, QIN Jie<sup>2,3</sup>, QI Xiao-xu<sup>2,3</sup>, WANG Rui-qi<sup>2,3</sup>, ZHAO Jian-ning<sup>2,3</sup>, TAN Bing-chang<sup>2,3</sup>, YANG Dian-lin<sup>2,3\*</sup>

(1. College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Agro-Environment Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 3. Key Laboratory of Origin Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Agro-product Safety, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** To collect basic data for the comprehensive analysis and evaluation of the soil ecological effects of restoring farmland to grassland, we evaluated the various characteristics of soil nematode communities in restoring cultivated land to artificial grassland in the Danjiangkou water ecological conservation function area. In this study, three alfalfa (*Medicago sativa*) meadows with the same soil type and three years' fallow usage were selected as representative plots for the restoration of farmland to grassland. A maize (*Zea Mays*) field with adjacent unreturned cropland was used for comparison to analyze the changing characteristics of nematodes in the returned cropland soil in September 2017. The results showed that the water content was significantly increased by 15.86% and pH was significantly decreased by

收稿日期: 2018-09-19 录用日期: 2018-12-19

作者简介: 周广帆(1992—), 女, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 研究方向为草地资源与生态。E-mail: zhouguangfan2016@outlook.com

\*通信作者: 杨殿林 E-mail: yangdianlin@caas.cn

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015); 国家自然科学基金项目(41877343)

Project supported: Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTCX2016015); The National Natural Science Foundation of China(41877343)

5.06% in the 0~10 cm soil layer; The pH was significantly reduced by 4.57%, and effective phosphorus content was significantly reduced by 26.83% in the 10~20 cm soil layer. A total of 18 307 soil nematodes and 49 genera were identified in the alfalfa grassland, and a total of 10 706 soil nematodes and 45 genera were identified in the corn field. The soil nematode c-p group was transferred from the short-generation to the long-generation and soil environment was less disturbed. The diversity and stability increased and structural index (SI) and enrichment index (EI) showed that returning farmland to grass improved soil health and reduced the degree of soil disturbance. The number of soil nematodes was significantly correlated with soil pH, water content, total nitrogen, and nitrate nitrogen content; The relative abundance of bacterivores nematodes and fungal nematodes was significantly correlated with soil available phosphorus content; The relative abundance of plant parasitic nematodes, and catch/omnivorous nematodes was significantly correlated with organic carbon and ammonium nitrogen content and significantly correlated with total nitrogen content. The soil pH value, total N, and available P contents can be changed by restoring farmland to grassland, which can alter the community structure and diversity of soil nematodes and improve soil health.

**Keywords:** Danjiangkou; water ecological conservation function area; restoring farmland to grassland; soil physicochemical properties; soil nematode; ecological index

南水北调工程是实现我国水资源优化配置、促进经济社会可持续发展、保障和改善民生的战略性基础设施。丹江口水源涵养区是南水北调中线工程核心水源区、国家级生态示范区和鄂西北国家级重点生态功能保障区,也是秦巴山区集中连片特困地区。丹江口水源涵养区水土流失面积占土地总面积的42.1%。自2014年开始,丹江口水源涵养区实施退耕还草工程,大面积退耕种植紫花苜蓿(*Medicago sativa*),成为国家在丹江口水源涵养区生态建设的重要举措之一。

退耕还草改变土壤生态环境<sup>[1]</sup>,其中一个重要过程就是土壤线虫群落结构分异及动态变化<sup>[2]</sup>。土壤线虫是土壤中最丰富的后生动物,具有较高的生物多样性,占据土壤食物网中心位置,一般作为土壤生态系统变化的敏感性指示生物;土壤线虫在土壤有机质分解、植物营养的矿化、养分循环、能量流动以及维持生态系统稳定等方面具有重要的作用<sup>[3-7]</sup>。土壤线虫群落对不同的土地利用方式和植被恢复措施有不同的响应<sup>[8-10]</sup>,种植苜蓿能明显改善中度退化草地土壤线虫群落结构<sup>[11]</sup>。对丹江口水源涵养区退耕还草的研究以往大多集中在水土保持、养分流失等方面<sup>[12-14]</sup>,而关于退耕还草土壤线虫群落变化特征鲜见

报道。因此本研究从不同土地利用方式角度着手,探讨玉米田转变成紫花苜蓿人工草地后对土壤线虫群落的影响,以期解释退耕还草土壤线虫群落变化特征,从而为全面分析和预测丹江口水源涵养区土壤生态效应、保护生物多样性、有效提升区域水源涵养能力、调整和优化农业生产结构、推进农业可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况及试验设计

试验区位于湖北省十堰市郧阳区,地处110°07'~111°16'E,32°25'~33°16'N,属于北亚热带大陆性季风气候,年均气温15.4℃,年平均降水量769.6 mm,无霜期244~255 d。土壤类型为黄棕壤。该地区从2014年开始实施退耕还草,为探讨玉米田转变成紫花苜蓿人工草地后对土壤线虫群落的影响,在丹江口水源涵养区上游设置三个取样区:选取坡向、坡位基本相同的三块紫花苜蓿草地为退耕代表样地(间隔大于1 km,退耕前均长期种植玉米),且选取相邻未退耕的玉米田为对照(间隔小于10 m)。退耕还草样地基本情况见表1。紫花苜蓿地和玉米田均按常规方

表1 退耕还草样地基本情况

Table 1 Basic situation of sampling sites for restoring farmland to grassland

采样点 Sampling point	作物类型 Crops	经度 Longitude	纬度 Latitude	坡向 Aspect	海拔高度 Altitude/m
郧阳区安阳镇小细峪村	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	110°60'	32°50'	东南	183
	玉米 <i>Zea mays</i>				
郧阳区安阳镇小河村	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	110°09'	32°49'	东南	199
	玉米 <i>Zea mays</i>				
郧阳区谭家湾镇王道岭村	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	110°52'	32°57'	东南	647
	玉米 <i>Zea mays</i>				

式管理:紫花苜蓿年刈割4次,玉米(*Zea mays*)收获后秸秆不还田;紫花苜蓿地施肥量为120 kg N·hm<sup>-2</sup>、75.0 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>;玉米田施肥量为315 kg N·hm<sup>-2</sup>、100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>·hm<sup>-2</sup>。

### 1.1.1 土壤样品采集

2017年9月下旬,在取样区内紫花苜蓿草地和玉米田各布设6个10 m×10 m的样方,按照“多点、等量、混合”的原则,每个样方内按“S”形选取10个采样点,用内径为5 cm的土钻于0~10、10~20 cm分层取样,四分法混匀,每层取1 kg左右的新鲜土样放入无菌自封袋内,共72份土壤样品,放入4℃冰盒带回。一部分新鲜土样用于土壤线虫的分离鉴定;另一部分土样于室内自然风干,研磨过筛后用于土壤理化因子测定。

### 1.1.2 测定方法

测定的土壤理化因子主要包括土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、有效磷以及土壤含水量和pH。土壤有机碳测定用重铬酸钾-浓硫酸外加热氧化法;土壤全氮采用凯氏法蒸馏后用AA3-流动分析仪测定;铵态氮和硝态氮经0.01 mol·L<sup>-1</sup>氯化钾溶液浸提后用AA3-流动分析仪测定;土壤有效磷采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法;土壤含水量用烘干法;土壤pH采用玻璃电极法(pHS-3)按水土比2.5:1测定<sup>[15]</sup>。

土壤线虫的测定:每份土壤样品取50 g新鲜土壤,利用改良的浅盘法<sup>[16]</sup>于室内25℃下分离48 h。过筛后将土壤线虫冲洗于可立离心管中,静置2 h,弃掉上清液后离心管中剩余9 mL液体,加入约1 mL的固定液(9%福尔马林、1%甘油和2~3滴冰醋酸)保存,在显微镜下进行计数和到属水平的鉴定。土壤线虫数量折算成每百克干土中含有的线虫条数。鉴定采用形态学方法,参照文献<sup>[17]</sup>分类图。

根据土壤线虫不同类群的相对多度,划分不同类群的优势度,土壤线虫个体数占总捕获量10%以上为极优势属(+++++),占5%~10%为优势属(++++),占2%~5%为常见属(+++),占1%~2%为稀有属(++),占1%以下为极稀有属(+)<sup>[17]</sup>。

土壤线虫多样性采用通用指数<sup>[18]</sup>:香农-威纳指数(Shannon Wiener Index,  $H'$ )、丰富度指数(Margalef Index, SR)、优势度指数(Dominance,  $\lambda$ )来表示<sup>[15]</sup>, $H'$ 用来表示物种多样性,多样性越高,所参与的食物网越稳定:

$$H' = -\sum_{i=1}^n p_i \times \ln p_i \quad (1)$$

式中: $p_i$ 为第*i*个分类单元中个体所占的比例。

$\lambda$ 反映物种多度的分布状况:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad (2)$$

SR反映群落物种丰富度,表示土壤线虫群落中种类的丰富程度:

$$SR = (S-1)/\ln N \quad (3)$$

式中: $S$ 为鉴定分类单元的数目; $N$ 为鉴定的线虫个体数目。

土壤线虫根据其取食习性和食道特征可分为食细菌线虫(Bacterivores, Ba)、食真菌线虫(Fungivores, Fu)、植物寄生线虫(Plant parasites, Pp)和捕/杂食线虫(Predators-omnivore, Op)。根据土壤线虫不同的生活史策略,分为由r-对策者向K-对策者过渡的5个c-p(Colonizer-persister)类群:c-p 1,世代时间短,繁殖速度快,典型的机会主义者,在食物富集的条件下能够快速生长,代谢快,耐环境压力;c-p 2,世代时间短,机会主义者,较耐环境压力;c-p 3,世代时间较长,对环境压力较为敏感;c-p 4,世代时间长,对环境压力敏感;c-p 5,世代时间很长,繁殖速度慢,对环境压力特别敏感<sup>[19]</sup>。

土壤线虫群落功能结构通过总成熟度指数( $\sum MI$ )、自由生活线虫成熟度指数(MI)、植物寄生线虫成熟度指数(PPI)和通路指数(Nematode channel ratio, NCR)等来表征<sup>[17]</sup>。

$$\sum MI(MI, PPI) = \sum_{i=1}^n v(i) \times f(i) \quad (4)$$

式中: $v(i)$ 是在生态演替中属于K-选择和r-选择科属分别赋予的c-p值; $f(i)$ 是土壤线虫科/属在线虫种群中所占的比例。

NCR指数用于探测有机质的分解途径。土壤线虫群落的多个营养类群使它们有条件反映土壤食物网中的能流通道:当NCR=0时,为完全的真菌分解通道;NCR=1时,为完全的细菌分解途径;NCR=0.50可作为两种分解通路的临界值<sup>[20]</sup>:

$$NCR = B/(B+F) \quad (5)$$

式中: $B$ 和 $F$ 分别为食细菌线虫和食真菌线虫所占线虫总数的相对多度。

土壤线虫的结构指数(Structure index, SI)和富集指数(Enrichment index, EI)结合分析可以较好地指示干扰程度和食物网的变化以及对可利用资源的响应。SI和EI的值在0~100之间变化,可以50为临界点,将其组合形成一个象限图,划分为A、B、C、D四个象限:A象限(EI>50, SI<50)表示土壤受干扰程度较高;B象



限( $EI>50, SI>50$ )表示土壤受干扰程度较低,食物网稳定成熟;C象限( $SI>50, EI<50$ )表示土壤未受干扰,食物网处于结构化的状态;D象限( $SI<50, EI<50$ )表示土壤环境处于受胁迫状态,食物网退化<sup>[17]</sup>。

$$SI=100[s/(s+b)] \quad (6)$$

$$EI=100[e/(e+b)] \quad (7)$$

式中: $s$ 代表 $Ba_3\sim Ba_5$ 、 $Fu_3\sim Fu_5$ 、 $Om_3\sim Om_5$ 、 $Ca_2\sim Ca_5$ 类群; $e$ 代表 $Ba_1$ 和 $Fu_2$ 类群; $b$ 代表 $Ba_2$ 和 $Fu_2$ 类群。

## 1.2 数据处理与分析

不同土层紫花苜蓿和玉米地土壤中的土壤理化性质(包括土壤含水量、pH、有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、有效磷)、土壤线虫数量和土壤线虫相对丰度以及土壤线虫多样性指数和生态指数均采用差异显著性比较 $t$ 检验(Student- $t$  test,  $P<0.05$ )进行;土壤理化因子和土壤线虫相关性采用Pearson相关性分析。 $t$ 检验和相关性分析运用IBM SPSS Statistics 21软件,作图运用Origin Pro 9.1软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 退耕还草土壤理化因子变化

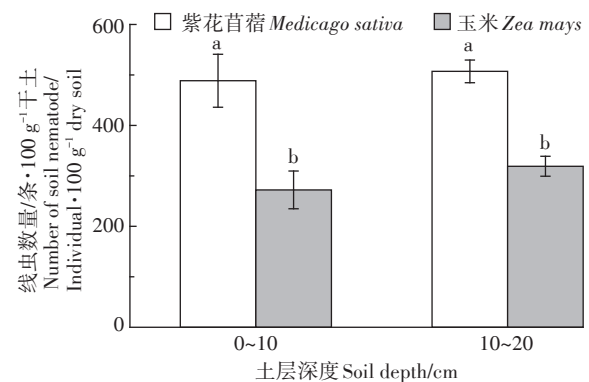
退耕种植紫花苜蓿草地与未退耕玉米田相比,0~10 cm土层含水量显著提高了15.86%,pH值显著降低了5.06%,有机碳、全氮、铵态氮和硝态氮含量增加但差异未达到显著水平;10~20 cm土层中,pH值显著降低4.57%,有效磷含量显著降低26.83%,土壤含水量、有机碳、全氮、铵态氮和硝态氮含量增加但差异未达到显著水平(表2)。

### 2.2 退耕还草土壤线虫群落组成和营养类群变化

退耕种植紫花苜蓿草地共鉴定出土壤线虫18307条,49个属,0~10 cm土层中线虫平均密度为488条·100 g<sup>-1</sup>干土,真头叶属(*Eucephalobus*)、真滑刃属(*Aphelenchus*)和丝尾垫刃属(*Fileuchus*)是极优势属;10~20 cm土层线虫平均密度为507条·100 g<sup>-1</sup>干土,

真滑刃属和丝尾垫刃属是极优势属。未退耕玉米田共鉴定出土壤线虫10706条,45个属,0~10 cm土层线虫平均密度为272条·100 g<sup>-1</sup>干土,真头叶属、真滑刃属和丝尾垫刃属是极优势属;10~20 cm土层平均密度为319条·100 g<sup>-1</sup>干土,真滑刃属和丝尾垫刃属是极优势属。短腔属(*Brevibucca*)、地单宫属(*Geomonhystera*)、无咽属(*Alaimus*)等仅在紫花苜蓿草地土壤中发现,而齿咽属(*Odontopharynx*)、单宫属(*Monhystera*)、类隐咽属(*Paraphanolaimus*)等仅在玉米田土壤中发现。土壤线虫丰度在退耕草地和未退耕农田之间存在显著差异( $P<0.05$ ,图1),退耕还草显著提高了土壤线虫的丰度。在退耕还草条件下,极优势属虽未发生改变,但伴生属已发生改变,土壤线虫群落组成发生改变(表3)。

退耕种植紫花苜蓿草地与未退耕玉米田相比,土壤线虫各营养类群相对丰度差异不显著(图2)。退耕种植紫花苜蓿草地土壤的通路指数分别为0.48(0~10 cm)和0.41(10~20 cm),未退耕玉米田土壤的通路



同一土层不同字母代表作物类型间差异显著( $P<0.05$ )。下同  
The different letters indicated significant difference among different crops within the same soil depth ( $P<0.05$ ). The same below

图1 退耕还草土壤线虫丰度变化

Figure 1 Changes in abundance of soil nematodes under conversion of cropland into grassland

表2 退耕还草土壤理化因子变化(均值±标准误)

Table 2 Soil physicochemical properties under conversion of cropland into grassland (Mean±SE)

土壤深度 Soil depth/cm	作物类型 Crops	土壤含水量 Soil water content/%	pH	有机碳 Organic carbon/ g·kg <sup>-1</sup>	全氮 Total N/ g·kg <sup>-1</sup>	铵态氮 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ mg·kg <sup>-1</sup>	硝态氮 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷 Available P/ mg·kg <sup>-1</sup>
0~10	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	19.29±0.34a	7.51±0.14b	11.19±0.84a	1.16±0.10a	3.71±0.56a	10.51±1.14a	7.75±0.49a
	玉米 <i>Zea mays</i>	16.65±0.80b	7.91±0.04a	9.72±0.85a	0.92±0.08a	3.52±0.51a	8.40±1.03a	11.29±1.69a
10~20	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	20.41±0.37a	7.52±0.14b	10.57±0.84a	0.97±0.09a	3.66±0.43a	6.14±0.58a	6.49±0.55b
	玉米 <i>Zea mays</i>	19.87±0.55a	7.88±0.04a	9.41±0.85a	0.81±0.08a	3.38±0.49a	4.93±0.55a	8.87±0.82a

注:同一土层不同字母代表作物类型间差异显著( $P<0.05$ )。

Notes: The different letters indicated significant difference among different crops within the same soil depth ( $P<0.05$ ).

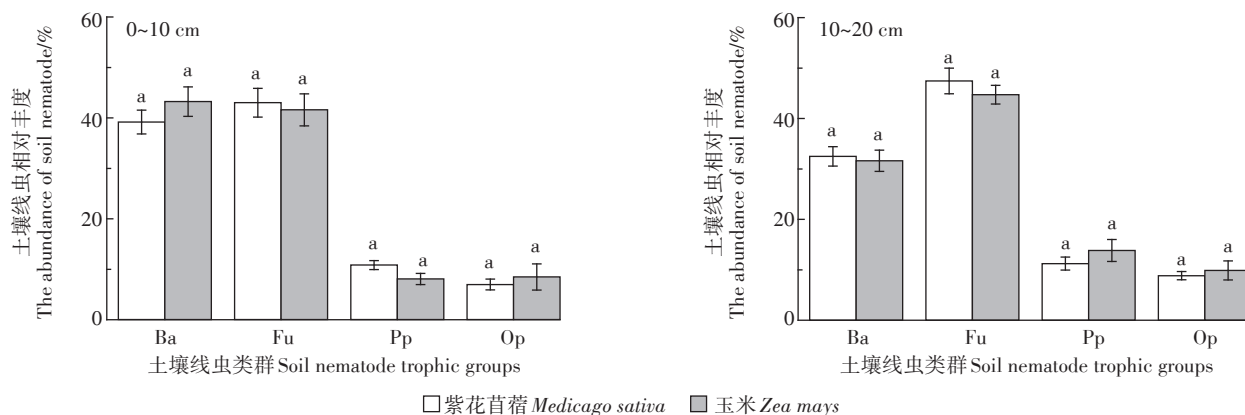


图2 退耕还草土壤线虫营养类群变化

Figure 2 Changes of soil nematode trophic groups under conversion of cropland into grassland

表3 退耕还草对土壤线虫优势度的影响

Table 3 Effect of conversion of cropland into grassland on the dominance of soil nematodes

类群 Taxa	属 Genus	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>		玉米 <i>Zea mays</i>		c-p
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm	
食细菌线虫 Ba	真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	+++++	+++	+++++	+++	2
	头叶属 <i>Cephalobus</i>	+++	++++	+++	+++	2
	丽突属 <i>Acrobeles</i>	++	++	++++	++	2
	拟丽突属 <i>Acrobelloides</i>	+	++	+	+++	2
	盆咽属 <i>Panagrolaimus</i>	+++	++	+++	+	1
	三等齿属 <i>Pelodera</i>	+++	+++	++	+++	1
	小杆属 <i>Rhabditis</i>	+++	++++	+++	++++	1
	原杆属 <i>Protorhabditis</i>	+++	++	+++	+++	1
	真单宫属 <i>Eumonhystera</i>	+++	+++	+++	++	2
	中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	++	+++	+	++	1
	高杯侧属 <i>Amphidelus</i>	+	+	+	+	4
	威尔斯属 <i>Wilsonema</i>	++++	+	++	+	2
	梭咽属 <i>Prismatolainus</i>	+	+++	+	++	2
	板唇属 <i>Chiloplacus</i>	+		+		2
	短腔属 <i>Brevibucca</i>	+				2
	齿咽属 <i>Odontopharynx</i>			+		1
	地单宫属 <i>Geomonhystera</i>	+				2
	项链线虫属 <i>Desmoscolex</i>		+		+	3
	单宫属 <i>Monhystera</i>			+		1
	无咽属 <i>Alaimus</i>		+			4
食真菌线虫 Fu	丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	+++++	+++++	+++++	+++++	2
	真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	+++++	+++++	+++++	+++++	2
	滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	++++	++++	++++	++++	2
	细齿属 <i>Leptonchus</i>	++	++	+	+	4
	短矛属 <i>Doryllium</i>	++	+++	+	++	4
	大矛属 <i>Enchodelus</i>	+				4
	垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>		+			4
	膜皮属 <i>Diphtherophora</i>		+	+		3
	类隐咽属 <i>Paraphanolaimus</i>			+		2

续表3 退耕还草对土壤线虫优势度的影响

Continued table 3 Effect of conversion of cropland into grassland on the dominance of soil nematodes

类群 Taxa	属 Genus	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>		玉米 <i>Zea mays</i>		c-p	
		0~10 cm	10~20 cm	0~10 cm	10~20 cm		
植物寄生线虫 Pp	垫刃属 <i>Tylenchus</i>	++	+	++	++	2	
	矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	+++	++++	++++	+++	3	
	螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	+++	+	++	+	3	
	裸矛属 <i>Psilenchus</i>	+	+++	++	++++	2	
	环属 <i>Criconea</i>	+			+	3	
	长针属 <i>Longidorus</i>	+		+	+	5	
	头垫刃属 <i>Cephalenchus</i>				+	3	
	毛刺属 <i>Trichodorus</i>	+	+			4	
	独壁齿属 <i>Campydora</i>	+				1	
	伪垫刃属 <i>Nothotylenchus</i>		+			2	
	根结属 <i>Meloidogyne</i>			+		3	
	潜根属 <i>Hirschmanniella</i>			+		3	
	刺咽属 <i>Belonolaimus</i>	+				5	
	捕/杂食线虫 Op	盘咽属 <i>Discolaimus</i>	+	+	+	+	5
		铧齿属 <i>Mylonchulus</i>	+++	+++	+++	+++	4
锐咽属 <i>Carcharolaimus</i>		+	+		+	5	
三孔属 <i>Tripyla</i>		+	+	+	++	3	
缢咽属 <i>Axonchium</i>		+	++	+	+	5	
真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>			+	+	+	4	
锯齿属 <i>Prionchulus</i>		+	+	+	+	4	
中矛线属 <i>Mesodorylaimus</i>		+	+			5	
单齿属 <i>Mononchus</i>		+	+	+	+	4	
拟矛线属 <i>Dorylaimoides</i>		+	+			4	
螫属 <i>Pungentus</i>		+	+			4	
扁腔属 <i>Sectonema</i>			+			5	
前矛线属 <i>Prodorylaimus</i>				+		4	
桑尼属 <i>Thornia</i>				+		4	
原色矛属 <i>Prochromadora</i>			+			3	
矛线属 <i>Dorylaimus</i>		+		+	4		
色矛属 <i>Chromadorita</i>				+	3		

注:+++++为极优势属,++++为优势属,+++为常见属,++为稀有属,+,为极稀有属。

Notes:+++++ is a extremely dominant genus,++++ is a dominant genus,+++ is a common genus,++ is a rare genus,and + is a very rare genus.

指数分别为0.50(0~10 cm)和0.41(10~20 cm)(表4),均不超过0.50,表明土壤中能流通道分解途径以真菌分解为主。

### 2.3 退耕还草对土壤线虫生态指数的影响

土壤线虫具有数量巨大、种群丰富等特点,因此常用生态指数表示其生态特征。在0~10 cm土层中,退耕种植紫花苜蓿草地土壤线虫的丰富度指数SR、香农-威纳指数 $H'$ 显著高于未退耕玉米田,而优势度指数 $\lambda$ 显著低于未退耕玉米田,退耕还草显著提高了0~10 cm土层中线虫群落的丰富度和多样性,显著降

低了土壤线虫的优势度( $P<0.05$ );10~20 cm土层中,退耕种植紫花苜蓿草地的优势度指数 $\lambda$ 显著低于未退耕玉米田,而SR、 $H'$ 指数无显著差异(表4)。

在退耕种植紫花苜蓿草地和未退耕玉米田中,均表现为土壤线虫c-p 2类群占优势,占总数的59%~73%。与未退耕玉米田相比,退耕还草土壤线虫c-p 2类群占比有所降低,c-p 3~5类群占比则有所增加,且在10~20 cm土层中具有显著差异(图3)。

退耕还草条件下,对土壤线虫的成熟度指数进行分析,0~10 cm土层中,自由生活线虫成熟度指数

表4 退耕还草土壤线虫多样性指数和成熟度指数分析

Table 4 Analysis of the diversity index and maturity index of soil nematodes under conversion of cropland into grassland

指标 Index	0~10 cm		10~20 cm	
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	玉米 <i>Zea mays</i>	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	玉米 <i>Zea mays</i>
丰富度指数 SR	2.71±0.06a	2.28±0.14b	2.96±0.06a	3.01±0.10a
香农-威纳指数 $H'$	2.48±0.04a	2.18±0.07b	2.54±0.03a	2.45±0.05a
优势度指数 $\lambda$	0.12±0.01b	0.15±0.01a	0.10±0.01b	0.12±0.01a
通路指数 NCR	0.48±0.03a	0.50±0.04a	0.41±0.03a	0.41±0.02a
总成熟度指数 $\Sigma MI$	2.16±0.03a	2.14±0.04a	2.30±0.03a	2.17±0.04b
自由生活线虫成熟度指数 MI	1.85±0.05a	1.92±0.07a	2.00±0.05a	1.82±0.07b
植物寄生线虫成熟度指数 PPI	0.31±0.03a	0.22±0.03b	0.30±0.04a	0.35±0.05a

(MI)比未退耕玉米田降低,但不具有显著差异,植物寄生线虫成熟度指数(PPI)显著增加;10~20 cm 土层中,MI值显著提高,PPI值降低,但不具有显著差异。从总成熟度指数( $\Sigma MI$ )来看,0~10 cm 土层中, $\Sigma MI$ 有所增加,但还未达到显著差异;在10~20 cm 土层中, $\Sigma MI$ 显著增加(表4)。总体上,退耕还草改变了土壤线虫的成熟度指数。

由图4可知,退耕种植紫花苜蓿草地0~10 cm 土层的富集指数EI值为39.45~75.83,结构指数SI值为

7.96~58.38,10~20 cm 土层的EI值为50.38~79.78,SI值为39.94~74.06;未退耕玉米田0~10 cm 土层EI值为5.60~95.20,SI值为4.80~64.00,10~20 cm 土层EI值为51.75~81.90,SI值为15.04~71.03。0~10 cm 土层中,退耕地更集中靠拢于A、B象限,未退耕农田分布于D象限的较多,说明退耕还草后土壤环境受到的干扰较低,食物网由退化向结构化状态发展;10~20 cm 土层中,与退耕地的分布相比较,未退耕农田各样地更向B象限靠拢,表明退耕还草土壤受到的

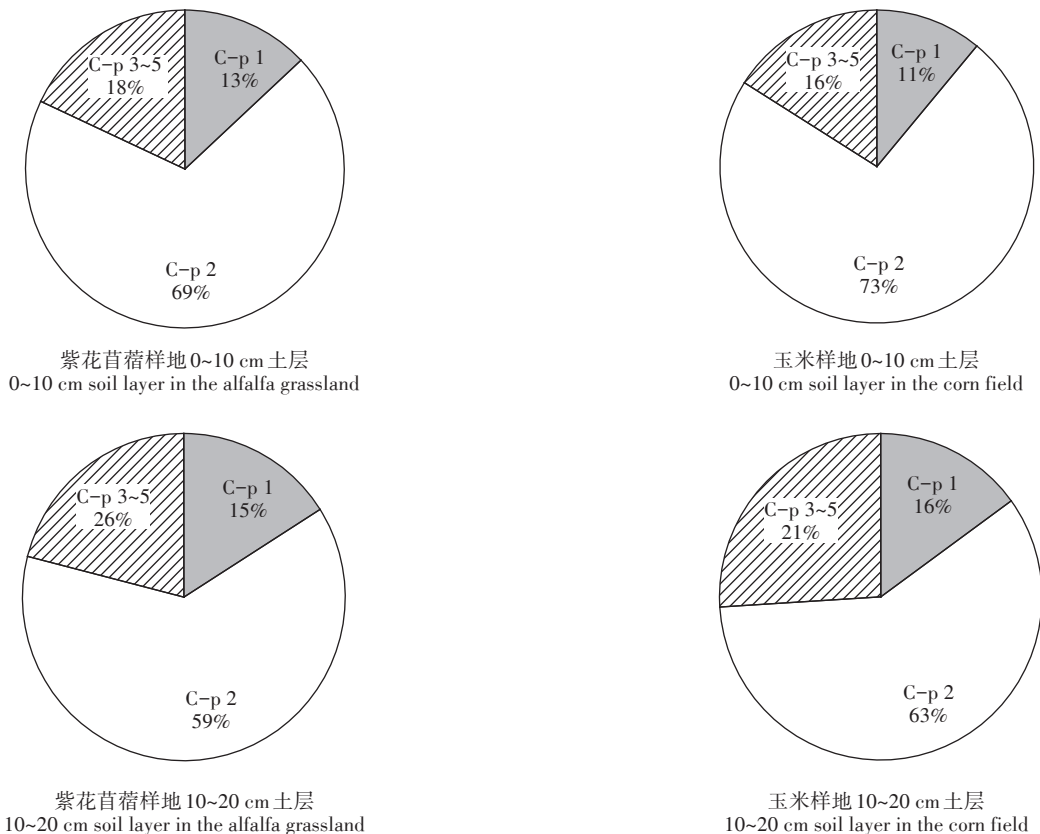


图3 退耕还草对土壤线虫c-p类群分布的影响

Figure 3 Effect of conversion of cropland into grassland on soil nematode c-p groups distribution



干扰程度降低,食物网趋向于成熟。

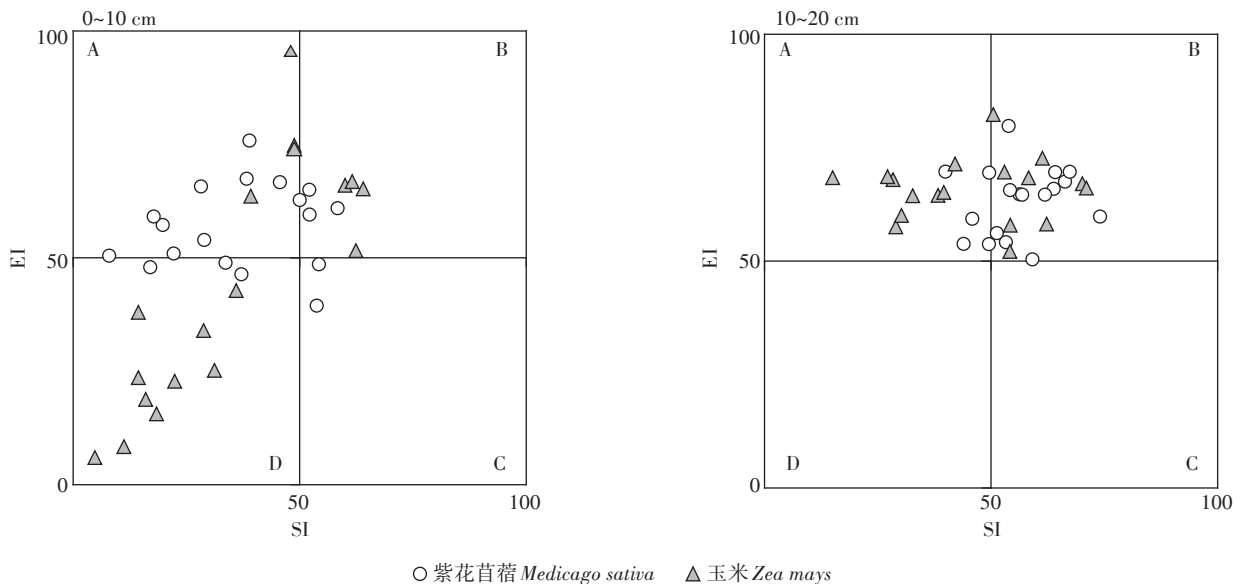
#### 2.4 土壤线虫群落特征指数与土壤理化因子的关系

土壤线虫群落特征指数和土壤理化因子相关分析(表5)表明,土壤含水量与土壤线虫  $N$ 、 $P_p$ 、 $H'$ 、 $PPI$ 、 $EI$  和  $SI$  呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与  $MI$  呈显著负相关( $P<0.05$ ),与  $SR$  呈显著正相关( $P<0.05$ );  $pH$  与土壤线虫  $N$ 、 $H'$ 、 $\lambda$  呈极显著相关( $P<0.01$ ),与  $\Sigma MI$ 、 $SI$  呈显著负相关( $P<0.05$ ); 有机碳与土壤线虫  $N$ 、 $P_p$ 、 $O_p$ 、 $MI$ 、 $PPI$  呈极显著相关( $P<0.01$ ),与  $SI$  呈显著相关( $P<0.05$ ); 全氮与土壤线虫  $N$  和  $MI$  呈极显著正相关

( $P<0.01$ ),与  $PPI$  值呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与  $P_p$  和  $O_p$  分别呈显著负相关和显著正相关( $P<0.05$ ); 铵态氮与  $P_p$ 、 $O_p$ 、 $MI$  和  $PPI$  呈极显著相关( $P<0.01$ ),与  $\Sigma MI$  呈显著正相关( $P<0.05$ ); 硝态氮与土壤线虫  $N$  呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与  $SR$  呈显著负相关( $P<0.05$ ); 有效磷与  $Ba$ 、 $Fu$  和  $SR$  呈极显著相关( $P<0.01$ ),与  $P_p$  呈显著负相关( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

土地利用方式转变显著影响土壤团聚体和理化



○ 紫花苜蓿 *Medicago sativa*    △ 玉米 *Zea mays*

图4 退耕还草对土壤线虫区系的影响

Figure 4 Soil nematode faunal analysis under conversion of cropland into grassland

表5 土壤线虫群落特征指数与土壤理化因子的相关性分析

Table 5 Correlation coefficients between nematode indices and soil physicochemical properties

指标 Index	土壤含水量 Soil water content	pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total N	铵态氮 $NH_4^+-N$	硝态氮 $NO_3^-N$	有效磷 Available P
个体数 $N$	0.587**	-0.545**	0.342**	0.367**	0.039	0.445**	-0.052
Ba 相对丰度	-0.064	0.046	-0.046	-0.034	-0.185	0.161	0.391**
Fu 相对丰度	-0.105	0.045	0.066	0.076	0.157	-0.089	-0.362**
$P_p$ 相对丰度	0.537**	-0.082	-0.375**	-0.251*	-0.600**	-0.061	-0.238*
$O_p$ 相对丰度	-0.185	-0.059	0.361**	0.232*	0.558**	0.021	0.221
丰富度指数 $SR$	0.274*	-0.080	0.038	-0.089	0.036	-0.246*	-0.344**
香农-威纳指数 $H'$	0.356**	-0.319**	0.110	0.008	0.066	-0.047	-0.117
优势度指数 $\lambda$	-0.221	0.303**	-0.098	-0.003	-0.126	0.057	-0.005
总成熟度指数 $\Sigma MI$	-0.157	-0.255*	0.179	0.083	0.257*	-0.003	-0.107
自由生活线虫成熟度指数 $MI$	-0.249*	-0.141	0.442**	0.313**	0.596**	0.089	0.096
植物寄生线虫成熟度指数 $PPI$	0.466**	-0.011	-0.502**	-0.396**	-0.676**	-0.135	-0.222
富集指数 $EI$	0.549**	-0.130	0.151	0.098	-0.158	-0.028	-0.104
结构指数 $SI$	0.434**	-0.237*	0.262*	0.163	-0.027	0.008	-0.121

注:\*\*表示极显著相关( $P<0.01$ ),\*表示显著相关( $P<0.05$ )。

Notes:\*\* indicates a extremely significant correlation( $P<0.01$ ),and \* indicates a significant correlation( $P<0.05$ ).

因子<sup>[21-22]</sup>,极显著改变土壤生物学性质<sup>[23]</sup>,导致土壤环境变化。退耕还草增加植被覆盖率,减少土壤侵蚀和水分流失,随退耕时间的推移,土壤碳汇效应逐渐显现<sup>[24]</sup>,显著提高土壤有机碳和全氮的含量,有效改善土壤理化性质<sup>[25-27]</sup>,提升土壤固碳及水源涵养能力<sup>[28]</sup>,促进了土地的可持续性。本研究中退耕还草有效增加土壤有机碳和全氮含量,是因为紫花苜蓿为豆科植物,具有较强的固氮能力,且根系发达,根系分泌物及死亡对土壤有机质和全氮含量的积累有很大的贡献<sup>[29]</sup>。段倩倩等<sup>[30]</sup>研究发现豆科植物在固氮过程中能外排大量的H<sup>+</sup>,降低了pH值,这与本研究发现的退耕还草土壤pH显著降低的结果一致。在本研究中,退耕还草土壤速效磷含量显著降低,一方面可能是因为紫花苜蓿生长过程中需从土壤中吸收大量的磷元素<sup>[31]</sup>,另一方面可能是因为紫花苜蓿的磷肥投入量比玉米田少了25%。综上所述,退耕还草有效提高了土壤含水量和土壤养分含量,为土壤线虫群落变化提供了条件。

研究发现退耕还草土壤线虫数量显著增加,群落结构发生改变,同时群落的稳定性显著提高。地上植物群落和土壤环境因子的改变都会影响土壤线虫群落组成<sup>[32-33]</sup>,土壤线虫群落的变化与地上植物具有极强的相关性<sup>[32]</sup>,植物通过地下根系生物量和分泌物改变土壤环境,作为初级消费者的植物寄生线虫和食微线虫数量发生相应改变,而捕/杂食线虫作为次级消费者也随之改变。土壤中各种营养成分的改变会对土壤食物网的复杂程度以及土壤线虫群落结构造成显著影响<sup>[18,34]</sup>,本研究发现土壤线虫数量与pH值呈极显著负相关关系,土壤pH值影响有机大分子物质的生物降解和矿化过程<sup>[35]</sup>,且pH被认为是影响土壤微生物群落结构的重要因素<sup>[36]</sup>,而土壤线虫与土壤微生物之间存在捕食关系<sup>[37]</sup>,退耕还草通过改变土壤生境和地下微食物网结构影响土壤线虫群落和营养类群组成。本研究结果显示土壤线虫的食细菌类群和食真菌类群与土壤有效磷呈极显著相关关系,土壤中有效磷的降低影响土壤线虫的营养类群和成熟度指数,土壤有机碳与植物寄生线虫和捕/杂食线虫含量具有极显著相关性,土壤养分改变了土壤微食物网的结构与功能<sup>[38]</sup>。

退耕还草不仅改变土壤线虫的群落组成,且影响土壤食物网的能量流动和土壤微食物网稳定性。Ingwersen等<sup>[39]</sup>研究发现当土壤有机质丰富且分解较快时,土壤食物网能量流动更倾向于细菌分解通道;而

土壤有机质缺乏且难分解时,土壤食物网能量流动更倾向于真菌分解通道。但是在本研究中退耕还草通路指数研究结果却显示土壤能流通道分解途径以真菌分解为主,退耕还草土壤中真菌类群占比最大,原因可能是退耕前长期的耕作导致土壤有机碳含量较低,在短时间内土壤仍然处于有机质缺乏的状态。成熟度指数在生态系统功能水平上可以更好地揭示土壤环境的健康状态<sup>[19]</sup>。Urzelai等<sup>[9]</sup>研究发现在陆地生态系统中草地土壤线虫的成熟度指数比长期耕作的农田系统高,本研究也发现退耕还草对土壤线虫群落的成熟度和稳定性有显著促进作用,且土壤线虫中r-对策者减少而K-对策者增加,世代交替变慢,土壤微食物网环境趋向于稳定,该结果与明凡渤等<sup>[40]</sup>在农田中的研究结果一致。退耕还草减少了因耕作对土壤的扰动,土壤环境稳定性增加,促进土壤食物网向成熟方向发展。

#### 4 结论

(1)丹江口水源涵养区坡耕地玉米田退耕还草种植紫花苜蓿3年,0~10 cm土层的含水量显著增加,土壤pH显著降低;在10~20 cm土层中,土壤pH和有效磷含量显著降低。

(2)退耕还草通过改变土壤pH、含水量、有机碳、全氮、铵态氮和有效磷含量促进了土壤线虫数量的显著增加,对土壤线虫营养类群产生了一定的影响,c-p类群的短世代型减少,长世代型增加,降低了世代交替和能量流动,群落多样性和稳定性增加,土壤线虫生态指数(成熟度指数、结构指数和富集指数)的变化揭示退耕种植紫花苜蓿土壤微食物网环境趋向于稳定,食物网趋向于成熟,地下生态系统更稳定。

#### 参考文献:

- [1] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应[J].土壤学报,2011,48(6):1219-1226.  
SONG Tong-qing, PENG Wan-xia, ZENG Fu-ping, et al. Soil ecological effects of converting cropland to forest and grassland in depressions between Karst hills[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1219-1226.
- [2] 王邵军,蔡秋锦,阮宏华.土壤线虫群落对闽北森林植被恢复的响应[J].生物多样性,2007(4):356-364.  
WANG Shao-jun, CAI Qiu-jin, RUAN Hong-hua. Soil nematode community response to vegetation restoration in northern Fujian[J]. *Biodiversity Science*, 2007(4):356-364.
- [3] Neher D A, Wu J, Barbercheck M E, et al. Ecosystem type affects interpretation of soil nematode community measures[J]. *Applied Soil Ecology*

- gy, 2005, 30(1):47-64.
- [4] 陈云峰, 韩雪梅, 李钰飞, 等. 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5):1072-1084.  
CHEN Yun-feng, HAN Xue-mei, LI Yu-fei, et al. Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5):1072-1084.
- [5] 张薇, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 土壤线虫对环境污染的指示作用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1973-1978.  
ZHANG Wei, SONG Yu-fang, SUN Tie-heng, et al. Soil nematode as a bioindicator of environment pollution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1973-1978.
- [6] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8):1541-1546.  
LI Yu-juan, WU Ji-hua, CHEN Hui-li, et al. Nematodes as bioindicator of soil health: Methods and applications[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8):1541-1546.
- [7] Zhao J, Neher D A. Soil nematode genera that predict specific types of disturbance[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64:135-141.
- [8] Francisco F N, Damaris G V. Soil nematodes associated with different land uses in the Los Tuxtlas biosphere reserve, Veracruz, Mexico[J]. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 2017, 88:136-145.
- [9] Urzelai A, Hernández A J, Pastor J. Biotic indices based on soil nematode communities for assessing soil quality in terrestrial ecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 247(2):253-261.
- [10] 王祖艳, 邵元虎, 夏汉平, 等. 基于土壤线虫群落分析的油页岩废渣地不同植被类型恢复过程中的土壤食物网能流状况[J]. 生态学报, 2017, 37(17):5612-5620.  
WANG Zu-yan, SHAO Yuan-hu, XIA Han-ping, et al. Energy flow analysis of soil food webs based on soil nematode communities: A case study from an oil shale minedland afforested with different pioneer tree species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17):5612-5620.
- [11] 吴东辉, 尹文英, 卜照义. 松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤线虫的群落特征[J]. 生态学报, 2008, 28(1):1-12.  
WU Dong-hui, YIN Wen-ying, BU Zhao-yi. Changes among soil nematode community characteristics in relation to different vegetation restoration practices in the moderate degraded grasslands of Songnen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1):1-12.
- [12] 章影, 廖畅, 姜庆虎, 等. 丹江口库区土壤侵蚀对土地利用变化的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):104-111.  
ZHANG Ying, LIAO Chang, JIANG Qing-hu, et al. Response of soil erosion to land use change in Dangjiangkou reservoir area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1):104-111.
- [13] 闫东锋, 王德彩, 杨喜田. 丹江口库区不同植被类型地表根系对土壤渗透性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(3):35-44.  
YAN Dong-feng, WANG De-cai, YANG Xi-tian. Effects of surface root system on soil infiltration at different vegetation types in Danjiangkou reservoir area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(3):35-44.
- [14] 殷格兰, 邵景安, 郭跃, 等. 南水北调中线核心区土地利用变化及其生态环境响应研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(1):59-69.  
YIN Ge-lan, SHAO Jing-an, GUO Yue, et al. Study of land use change and eco-environmental response in the core area of mid-route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(1):59-69.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 4版. 北京: 中国农业出版社, 2013.  
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. 4th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2013.
- [16] 毛小芳, 李辉信, 陈小云, 等. 土壤线虫三种分离方法效率比较[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3):149-151.  
MAO Xiao-fang, LI Hui-xin, CHEN Xiao-yun, et al. Extraction efficiency of soil nematodes by different methods[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3):149-151.
- [17] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3):239-251.
- [18] Neher A D, Darby J B. Nematodes as environmental indicators[M/OL]. Cabi Publishing, 2009:107-123.
- [19] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. *Oecologia*, 1990, 83(1):14-19.
- [20] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4):199-210.
- [21] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6):1561-1568.  
LIU Yan, SONG Tong-qing, CAI De-suo, et al. Soil fertility characteristics under different land use patterns in depressions between Karst hills[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6):1561-1568.
- [22] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15):5183-5190.  
LIU Yan-li, LI Cheng-liang, GAO Ming-xiu, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River Delta region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15):5183-5190.
- [23] 张静, 高云华, 张池, 等. 不同土地利用方式下赤红壤生物学性状及其与土壤肥力的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3423-3430.  
ZHANG Jing, GAO Yun-hua, ZHANG Chi, et al. Biological properties of lateritic red soil and their relationships with soil fertility in southern China under different land use types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12):3423-3430.
- [24] 廖洪凯, 李娟, 龙健, 等. 土地利用及退耕对喀斯特山区土壤活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(1):240-247.  
LIAO Hong-kai, LI Juan, LONG Jian, et al. Effects of land use and abandonment on soil labile organic carbon in the Karst region of southwest China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1):240-247.
- [25] 郭胜利, 路鹏, 党廷辉. 退耕还草对土壤水分养分演变的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8):1383-1388.  
GUO Sheng-li, LU Peng, DANG Ting-hui. Changes of soil C, N and soil water under conversion of cropland into grassland[J]. *Acta Bot Borreal-Occident Sin*, 2003, 23(8):1383-1388.
- [26] 苏永中. 黑河中游边缘绿洲农田退耕还草的土壤碳、氮固存效应

- [J]. 环境科学, 2006, 27(7):1312-1318.  
SU Yong-zhong. Soil carbon and nitrogen sequestration following cropland to forage grassland conversion in the marginal land in the middle of Heihe River basin, northwest China[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7):1312-1318.
- [27] 吴旭东, 张晓娟, 谢应忠, 等. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J]. 草业学报, 2013, 22(1):245-251.  
WU Xu-dong, ZHANG Xiao-juan, XIE Ying-zhong, et al. Vertical distribution characters of soil organic carbon and soil enzyme activity in alfalfa field with different growing years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(1):245-251.
- [28] 潘成忠, 上官周平, 刘国彬. 黄土丘陵沟壑区退耕草地土壤质量演变[J]. 生态学报, 2006, 26(3):690-696.  
PAN Cheng-zhong, SHANGGUAN Zhou-ping, LIU Guo-bin. Soil quality evolution of farming-withdrawn grassland in hilly and gully loess regions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):690-696.
- [29] 张超. 黄土丘陵区根际微生物对退耕地植被恢复的响应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
ZHANG Chao. Rhizosphere microbial response to the revegetation of abandoned cropland in the hilly loess region[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [30] 段倩倩, 杨晓红, 黄先智. 植物与丛枝菌根真菌在共生早期的信号交流[J]. 微生物学报, 2015, 55(7):819-825.  
DUAN Qian-qian, YANG Xiao-hong, HUANG Xian-zhi. Signal exchange between plants and Arbuscular Mycorrhizae fungi during the early stage of symbiosis: A review[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, 55(7):819-825.
- [31] 郭志彬, 王道中, 李凤民. 退化耕地转化为紫花苜蓿草地对土壤理化性质的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(5):888-894.  
GUO Zhi-bin, WANG Dao-zhong, LI Feng-min. Effects of converting degraded cropland to alfalfa (*Medicago sativa*) grassland on soil physicochemical properties[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(5):888-894.
- [32] Hu J, Chen G, Hassan W M, et al. Fertilization influences the nematode community through changing the plant community in the Tibetan Plateau[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 78:7-16.
- [33] Ito T, Araki M, Higashi T, et al. Responses of soil nematode community structure to soil carbon changes due to different tillage and cover crop management practices over a nine-year period in Kanto, Japan [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89:50-58.
- [34] Parfitt R L, Yeates G W, Ross D J, et al. Effect of fertilizer, herbicide and grazing management of pastures on plant and soil communities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3):175-186.
- [35] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(4):237-242.  
WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(4):237-242.
- [36] 刘晶, 赵燕, 张巧明, 等. 不同利用方式对豫西黄土丘陵区土壤微生物量及群落结构特征的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(8):36-47.  
LIU Jing, ZHAO Yan, ZHANG Qiao-ming, et al. Effects of land use on soil microbial biomass and community structure in the loess hill region of west Henan[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8):36-47.
- [37] Jiang Y J, Liu M Q, Zhang J B, et al. Nematode grazing promotes bacterial community dynamics in soil at the aggregate level[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11(12):2705-2717.
- [38] 杜晓芳, 李英滨, 刘芳, 等. 土壤微食物网结构与生态功能[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2):403-411.  
DU Xiao-fang, LI Ying-bin, LIU Fang, et al. Structure and ecological functions of soil micro-food web[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(2):403-411.
- [39] Ingwersen J, Poll C, Streck T, et al. Micro-scale modelling of carbon turnover driven by microbial succession at a biogeochemical interface [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 40(4):864-878.
- [40] 明凡渤, 门丽娜, 刘新民. 内蒙古武川县农田退耕还草对中小型土壤动物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7):1838-1843.  
MING Fan-bo, MEN Li-na, LIU Xin-min. Effects of different management modes of grassland after returned from cropland on meso- and micro-faunal communities in Wuchuan County of Inner Mongolia, north China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(7):1838-1843.