

# 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果

李红燕<sup>1</sup>, 胡铁成<sup>1</sup>, 曹群虎<sup>2</sup>, 鱼昌为<sup>2</sup>, 曹卫东<sup>3</sup>, 黄冬琳<sup>1</sup>, 翟丙年<sup>1</sup>, 高亚军<sup>1,4\*</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2 陕西省长武县农业技术推广中心, 陕西长武 713600; 3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**【目的】黄土高原旱地土壤贫瘠, 夏闲期雨热资源难以被充分利用。本研究通过田间试验研究不同夏季绿肥品种及其种植方式对绿肥鲜重、绿肥养分还田量、土壤养分含量、土壤酶活性、土壤水溶性有机碳和微生物量碳含量的影响, 旨在筛选出适宜当地夏闲期种植的绿肥品种及种植方式, 为促进黄土高原地区农业可持续发展提供理论依据和技术支持。【方法】本研究采用随机区组设计, 以夏季裸地休闲为对照, 设绿肥(绿豆、长武怀豆、毛叶苕子、油菜)和绿肥种植方式(麦后播种、麦田套种)为研究因素, 共9个处理。绿肥盛花期全区齐地收割地上部并称重计鲜草产量, 分析绿肥地上部氮磷钾含量; 每个小区采集50株绿肥下长、宽、深均为20 cm的土体中的根系, 称重并进行分析; 绿肥收获翻压20天后, 于各小区采集0—20 cm土壤样品, 测定土壤养分含量, 土壤微生物量碳, 土壤水溶性有机碳含量以及主要酶含量。【结果】绿肥麦后播种生物量要高于麦田套种; 麦后播种以怀豆和油菜生物量较高, 套种以油菜生物量显著高于其他处理。不同种植方式下绿肥总养分还田量与生物量规律类似; 麦后播种长武怀豆显著提高了氮素和磷素还田量, 麦后播种油菜显著提高了磷素和钾素还田量; 套种时氮、磷和钾还田量由高到低顺序为油菜>毛叶苕子>绿豆>长武怀豆, 不同绿肥间差异达到显著水平。翻压油菜土壤有机质、速效磷及速效钾含量都要显著高于休闲处理; 麦后播种长武怀豆并翻压2年后, 0—20 cm土壤有机质、总氮、矿质氮、速效磷及速效钾含量较休闲分别提高了12.4%、22.2%、95.9%、28.6%和11.2%。种植绿肥与休闲相比, 土壤水溶性有机碳和微生物量碳含量均有所提高, 其中套种油菜增加达显著水平, 麦后播种各绿肥间土壤微生物量碳含量差异不显著, 但都显著高于休闲。与休闲相比, 麦后播种绿肥均提高了土壤酶活性; 套种绿肥除绿豆处理的脲酶和过氧化氢酶低于休闲外, 其他处理均提高了土壤酶活性。土壤各测定指标与绿肥生物量之间均有显著或极显著的正相关关系, 表明土壤肥力的提高主要取决于还田绿肥的生物量。【结论】长武怀豆和油菜翻压入土后, 能够增加土壤的养分含量和酶活性, 培肥效果优于绿豆和毛叶苕子。麦后播种绿肥的生物量、养分还田量显著高于套种, 土壤养分含量及土壤酶活性也较高。所以在黄土旱塬地区可选择麦后播种长武怀豆和油菜可有效改善土壤肥力。

**关键词:** 怀豆; 油菜; 麦后播种; 土壤性质

中图分类号: S551; S553

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)05-1310-09

## Effect of improving soil fertility by planting different green manures in different patterns in dryland

LI Hong-yan<sup>1</sup>, HU Tie-cheng<sup>1</sup>, CAO Qun-hu<sup>2</sup>, YU Chang-wei<sup>2</sup>, CAO Wei-dong<sup>3</sup>,  
HUANG Dong-lin<sup>1</sup>, ZHAI Bing-nian<sup>1</sup>, GAO Ya-jun<sup>1,4\*</sup>

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Shaanxi Changwu District Agro-technology Extension Center, Changwu, Shaanxi 713600, China;

3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

4 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

收稿日期: 2015-10-14 接受日期: 2016-03-06 网络出版日期: 2016-06-03

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005, 201503124); 国家自然科学基金(41401330); 国家现代农业(小麦)产业技术体系(CARS-03-1-31); 国家农作物种质资源平台; 农业科研杰出人才及其创新团队培养计划资助。

作者简介: 李红燕(1987—), 女, 贵州遵义人, 硕士, 主要从事土壤与肥料方面的研究工作。E-mail: 81328568@qq.com

\* 通信作者 E-mail: yajungao@nwsuaf.edu.cn

**Abstract: [ Objectives ]** The soil of dryland areas of the Loess Plateau is often barren, the heat and precipitation resources can not be fully utilized during summer fallow period. Therefore, a field experiment was conducted to investigate effects of green manure crop varieties and planting patterns on their biomass, nutrient contents, soil nutrient contents, soil enzyme activities, soil microbial biomass carbon (SMBC) and dissolve organic carbon (DOC) to determine the best green manure crop variety and planting pattern, which can be regarded as the theoretic base and technical support for the development of sustainable agriculture in the Loess Plateau. **[ Methods ]** An experiment with randomized complete block design was conducted. The bare fallow in summer was used as control, two factors were green manure varieties (Mung bean, Huai bean, Hairy vetch and Rape) and planting patterns (after wheat harvest and intercropped with wheat), counting to 9 treatments. The green manure was harvested in full blooming stage and the yield of fresh grass was weighted, the N, P and K contents were analyzed. The root samples were collected inside volume 20 cm × 20 cm × 20 cm at the bottom of 50 plants in each plot and weighted, soil samples (0–20 cm deep) were collected 20 days after the green manure was returned into field, and the contents of nutrients, soil microbial biomass carbon (SMBC) and dissolve organic carbon (DOC), as well as the activities of main soil enzymes, were determined. **[ Results ]** The results indicated that the after wheat harvest had greater biomass than intercropping, the Huai bean and rape treatments had greater biomass than other green manures in the after wheat harvest, and the biomass of rape treatments was significantly increased in contrast with other green manures in the intercropped with wheat. The changes of green manure nutrient contents were similar to those biomass in different planting patterns. Huai bean provided the highest amounts of nitrogen and phosphorous, while rape offered the highest amounts of phosphorous and potassium through incorporation in the after wheat harvest, and the amounts of nitrogen, phosphorous and potassium through incorporation in the intercropped with wheat were rape > hairy vetch > Mung bean > Huai bean. The rape treatment significantly increased soil organic matter (SOM), available phosphorous and available potassium compared with the fallow. After 2 years of the after wheat harvest, the Huai bean treatment enhanced soil organic matter (SOM), total nitrogen, mineral nitrogen, available phosphorous and available potassium contents in the depth of 0–20 cm by 12.4%, 22.2%, 95.9%, 28.6% and 11.2%, respectively, compared with the fallow. Incorporation of green manure during summer fallow period increased soil microbial biomass carbon (SMBC) content and dissolve organic carbon (DOC) content compared with the fallow, and the rape treatments significantly increased soil microbial biomass carbon (SMBC) and dissolve organic carbon (DOC) in the intercropped with wheat. There were no significant differences of soil microbial biomass carbon (SMBC) between the green manure treatments in the after wheat harvest, however, the contents were greater than those of the fallow ( $P < 0.05$ ). Green manure in the after wheat harvest enhanced soil enzyme activities compared with the fallow, and other intercropped with wheat green manures increased soil enzyme activities except the Mung bean treatment which decreased the enzyme activities of urease and catalase. The significant correlations between soil properties and green manure biomass indicated that the soil fertility was determined by the amount of green manure biomass to soil. **[ Conclusions ]** The Huai bean and rape treatments could significantly increase soil nutrient contents and soil enzyme activities and they were better than Mung bean and hairy vetch. As for the planting patterns, the after wheat harvest was better than the intercropped with wheat. Huai bean and rape as green manure applied after wheat harvest can effectively improve soil quality in dryland of the Loess Plateau.

**Key words:** huai bean; rape; after wheat harvest; soil property

黄土高原大部分区域光、热、水资源满足作物一熟有余而两熟不足, 因此常有大片土地夏季或冬季处于休闲状态。利用这些剩余的资源插播短期绿

肥作物不仅可以减少杂草生长和病虫害发生<sup>[1]</sup>, 而且能提高土地和劳动力资源利用率<sup>[2-3]</sup>。夏闲期种植作物在一定程度上消耗了土壤水分, 对后季作物(如冬

小麦)产量的影响会由于降水量等环境因素不同而存在差异<sup>[4]</sup>,在降水正常的年份,播种绿肥通常不会降低后季作物产量<sup>[5-6]</sup>,有利于充分利用土地资源,保护农田生态环境,促进可持续发展。

绿肥作物种植方式多种多样,有间、套、复种(麦后播种),不同作物与不同种植方式的效果不同。如玉米与苜蓿间作,土壤有机质质量分数上升,体积质量下降,土壤全氮、全磷、全钾质量分数提高<sup>[7]</sup>。豌豆与大麦间作时,由于豌豆对大麦存在一个遮阴的效应,导致大麦籽粒不饱满<sup>[8]</sup>。小麦和大豆套种可以有效调节土壤湿度、温度及理化性状,促使氮素向有利于作物吸收及减少损失方向发展<sup>[9]</sup>。在麦行间套作鹰嘴豆可以增加土壤的有效磷含量从而缓解土壤缺磷情况<sup>[10]</sup>。麦茬复种油菜,由于油菜根系能分泌大量有机物活化分解土壤中难溶性磷素,激活土壤生物活性,加速麦茬在土壤中的有机腐化,提高土壤肥力<sup>[11]</sup>。绿肥种类繁多,既有豆科绿肥,也有禾本科、十字花科绿肥等。那么在黄土高原地区适合种植哪些品种的绿肥,并且哪种种植方式更有效有待研究。

本研究采用田间试验,以长武怀豆(大豆的当地品种)、绿豆、毛叶苕子和油菜为研究对象,比较其麦后播种与套种对旱地土壤理化性质和生物学性质的影响,以期筛选出该地区培肥效果最佳的绿肥种类及种植方式,为黄土高原地区可持续农业建立合理的土地用养制度提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原中南部的陕西省长武县丁家镇丁家村,海拔 1220 m,属西北内陆暖温带半湿润大陆性季风气候,雨热同季,四季冷暖干湿分明,年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。热量丰富,年平均日照 2226.5 h,积温 2994℃,多年平均降水 584 mm,且季节性分布不均,多集中于夏秋季节。试验地土壤为黄盖粘黑垆土(Cumuli-Ustic Isohumosols,系统分类名称:堆垫干润均腐土),母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,全剖面土质均匀疏松,通透性好,土壤养分含量为:有机质 14.1 g/kg、全氮 0.89 g/kg、全磷 0.61 g/kg、硝态氮 12.42 mg/kg、铵态氮 2.32 mg/kg、速效磷 5.43 mg/kg、速效钾 153.3 mg/kg,pH 为 7.80。研究区农业生产主要依赖生育期的天然降水和前期土壤蓄水,属于典型的旱作农业区,主要种植制度为一年一熟。

### 1.2 试验方案

试验采取两因素(绿肥种类和绿肥种植方式)完全随机区组设计。绿肥种类包括绿豆(播种量 113 kg/hm<sup>2</sup>)、长武怀豆(播种量 150 kg/hm<sup>2</sup>)、毛叶苕子(播种量 150 kg/hm<sup>2</sup>)和油菜(播种量 15 kg/hm<sup>2</sup>);种植方式为麦后播种(小麦收获后硬茬播种绿肥)和麦田套种(小麦生长后期麦田撒播绿肥),以休闲不种绿肥为对照,共 9 个处理。小区面积为 100 m<sup>2</sup>(4 m×25 m),重复 4 次。

绿肥套种 2011 年于 6 月 15 日施行,麦后播种于 6 月 30 日小麦收获后施行,8 月 30 日用旋耕机将绿肥直接翻压于土壤中,翻压深度 10—20 cm。2012 年 6 月 5 日绿肥套种,麦后 6 月 30 日播种绿肥,9 月 1 日翻压绿肥。

### 1.3 测定项目及方法

绿肥盛花期齐地收割全区绿肥地上部,称重计鲜草产量;每个小区随机选取 20 株绿肥地上部进行植株养分分析,随机选取 50 株绿肥,采集其下部长、宽、深均为 20 cm 的土体中的根系,用自来水将根系冲洗干净,晾干水分后称重,并将其中 20 株根系用作分析样品。绿肥收获翻压 20 天(2012 年 9 月 20 日)后于各小区采集 0—20 cm 土壤样品,进行土壤肥料指标分析。

绿肥植物样品 95℃ 杀青 30 分钟,于 65℃ 烘至恒重,计算含水量;烘干植物样经粉碎混匀后,用硫酸过氧化氢湿法消解,流动分析仪测定全氮含量,钼黄比色法测定全磷含量,火焰光度法测定全钾含量;采用烘干法测定土壤样品水分含量,用 1 mol/L 氯化钾浸提连续流动分析仪法测硝铵态氮含量,用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠浸提比色法测有效磷含量,火焰光度法测速效钾含量,凯式定氮法测定全氮含量,采用氯仿熏蒸浸提用 TOC 有机碳分析仪测定微生物量碳含量;重铬酸钾外加热法测有机质含量;用蒸馏水 2:1 进行浸提,25℃ 下恒温震荡 30 min,(250 次/min)离心 10 min(4000 转/min)后采用重铬酸钾法测定水溶性有机碳含量,磷酸苯二钠比色法测碱性磷酸酶含量,靛酚蓝比色法测定脲酶含量,3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶含量,容量滴定法测定过氧化氢酶<sup>[12]</sup>含量。土壤总体酶活性的计算方程如下:

$$Et = \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i}{X} \right)$$

计算式表述为:将测出的整个土壤酶活性计算

其平均值, 将其平均值作为对照, 然后再计算各种土壤酶活性的相对值, 最后总和作为总体酶活性。式中,  $X_i$  表示的是各种供试土壤第  $i$  种土壤酶活性的测定值,  $\bar{X}$  为相同酶的活性的平均,  $E_t$  值表示总体酶活性的大小<sup>[13]</sup>。

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 和 DPS7.5 统计软件进行统计分析, LSD 法检验差异显著性 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 种植方式对不同绿肥鲜重的影响

由表 1 看出, 麦后播种怀豆地上部鲜重显著高于绿豆、毛叶苕子与油菜, 后三者之间无显著差异

( $P < 0.05$ ); 根系生物量由高到低为怀豆 > 油菜 > 绿豆 > 毛叶苕子, 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。绿肥套种时, 地上部生物量由高到低为油菜 > 毛叶苕子 > 绿豆 > 怀豆, 差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ); 根系生物量的高低与地上部规律类似。总体来说, 麦后播种绿肥地上部鲜重高于麦田套种。2012 年种植方式对绿肥鲜重的影响与第一年相似, 只有麦后播种油菜鲜重提高, 与麦后播种怀豆无显著差异, 麦后播种怀豆和油菜的鲜重都要显著高于其他处理。综合两年结果看, 绿肥麦后播种生物量要高于麦田套种, 播种怀豆和油菜鲜重较高, 套种油菜鲜重最高。套种条件下, 绿肥种子体积大的绿肥鲜重小于体积小的, 可能因为种子过大无法入土发苗。

表 1 2011 年和 2012 年麦后播种和套种不同绿肥的鲜重 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ , FW)

Table 1 Green manure biomass sown after wheat harvest and intercropped with wheat in 2011 and 2012

种植方式 Planting pattern	种类 Variety	2011		2012	
		地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
麦后播种 After wheat harvest	怀豆 Huai bean	16420 a	1754 a	16076 a	1718 a
	绿豆 Mung bean	11618 b	1234 c	11948 b	1269 b
	毛叶苕子 Hairy vetch	10507 b	613 d	11885 c	694 e
	油菜 Rape	11429 b	1563 b	15067 a	2060 a
套种 Intercropped with wheat	怀豆 Huai bean	1402 e	127 f	1546 b	141 e
	绿豆 Mung bean	3603 d	376 e	3619 d	378 d
	毛叶苕子 Hairy vetch	7249 c	416 e	7942 c	456 cd
	油菜 Rape	10839 b	1538 b	10714 b	1520 ab

注 (Note): 同列数据后不同字母表示同一种种植方式不同绿肥间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters mean significant differences among the green manure treatments under same cropping system at  $P < 0.05$ .

### 2.2 种植方式对不同绿肥处理养分还田量的影响

2011 年和 2012 年总养分还田量见表 2。麦后播种绿肥时, 氮素还田量长武怀豆与毛叶苕子之间没有显著差异, 但都显著高于绿豆和油菜 ( $P < 0.05$ ); 磷素还田量长武怀豆与油菜之间没有显著差异, 但显著高于绿豆与毛叶苕子 ( $P < 0.05$ ); 钾素还田量油菜显著高于其他三种绿肥 ( $P < 0.05$ )。绿肥套种时, 氮素还田量由高到低为油菜 > 毛叶苕子 > 绿豆 > 长武怀豆, 且差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 磷素和钾素还田量高低与氮素类似。总体来说, 麦后播种绿肥养分还田量高于套种绿肥, 这与绿肥生物量规律类似, 说明生物量越高, 养分还田量越高。

### 2.3 种植方式对不同绿肥处理 0—20 cm 土壤养分含量的影响

绿肥翻压 20 天后的土壤养分结果 (表 3) 表明,

麦后播种绿肥时, 不同绿肥处理的土壤有机质和全氮含量之间均无显著差异; 长武怀豆和毛叶苕子处理的土壤矿质氮含量差异不显著, 但均显著高于油菜处理 ( $P < 0.05$ ); 油菜处理土壤速效磷含量与长武怀豆处理相当, 但显著高于绿豆和毛叶苕子处理 ( $P < 0.05$ ); 不同绿肥处理土壤速效钾无显著差异。麦后播种长武怀豆时, 土壤有机质、全氮、有效氮磷钾含量均显著高于休闲处理; 麦后播种油菜时土壤有机质、速效磷和速效钾含量均显著高于休闲处理。套种绿肥时, 油菜处理有机质含量显著高于怀豆处理; 四种绿肥处理土壤全氮含量和矿质氮含量之间均无显著差异; 油菜处理土壤速效磷含量显著高于毛叶苕子、长武怀豆和绿豆处理 ( $P < 0.05$ ); 油菜处理土壤速效钾含量显著高于怀豆处理 ( $P < 0.05$ )。套种长武怀豆时, 土壤养分含量与休闲处理

表 2 2 年绿肥总养分还田量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 2 Total green manure nutrients returned to soil in the two years' period

种植方式 Planting pattern	种类 Variety	养分 Nutrient		
		N	P	K
麦后播种 After wheat harvest	怀豆 Huai bean	260.2 a	20.9 a	128.2 c
	绿豆 Mung bean	168.0 cd	17.3 b	121.6 c
	毛叶苕子 Hairy vetch	247.5 ab	18.5 b	154.0 b
	油菜 Rape	233.5 b	22.2 a	182.6 a
套种 Intercropped with wheat	怀豆 Huai bean	23.3 f	1.8 f	8.5 f
	绿豆 Mung bean	53.5 e	5.6 d	40.1 e
	毛叶苕子 Hairy vetch	159.4 d	11.5 c	103.0 d
	油菜 Rape	180.9 c	17.7 b	145.8 b

注 (Note): 同列数据后不同字母表示同一种种植方式不同绿肥间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Values followed by different letters mean significant differences among the green manure treatments under same cropping system at  $P < 0.05$ .

表 3 种植翻压绿肥 2 年后不同处理土壤养分含量

Table 3 Soil nutrient contents of different treatments after 2 years of the green manure application

种植方式 Planting pattern	种类 Variety	有机质	全氮	矿质氮	有效磷	速效钾
		OM (g/kg)	Total N (g/kg)	Min N (mg/kg)	Avail. P (mg/kg)	Avail. K (mg/kg)
休闲 Fallow		13.7 b	0.9 b	9.7 c	6.3 d	147.0 b
麦后播种 After wheat harvest	怀豆 Huai bean	15.4 a	1.1 a	19.0 a	8.1 ab	163.5 a
	绿豆 Mung bean	14.9 ab	1.1 ab	14.0 abc	7.4 bc	157.9 ab
	毛叶苕子 Hairy vetch	14.6 ab	1.0 ab	18.1 ab	7.7 bc	153.3 ab
	油菜 Rape	15.4 a	1.0 ab	10.4 c	8.8 a	167.1 a
套种 Intercropped with wheat	怀豆 Huai bean	13.5 b	0.9 ab	11.8 bc	5.7 d	147.3 b
	绿豆 Mung bean	14.1 ab	1.0 ab	12.6 abc	5.9 d	151.3 ab
	毛叶苕子 Hairy vetch	14.5 ab	1.0 ab	14.8 abc	7.1 c	156.2 ab
	油菜 Rape	15.3 a	0.9 ab	9.2 c	7.9 b	175.0 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示同一种种植方式不同绿肥间差异显著 ( $< 0.05$ ) Value followed by different letters mean significant differences among the green treatments under same cropping system at  $< 0.05$ .

间无显著差异; 套种油菜时土壤有机质、速效磷和速效钾含量均显著高于休闲处理。长武怀豆麦后播种时土壤养分含量显著高于套种, 而其他三种绿肥麦后播种与套种对土壤养分含量影响不大。

由表 4 可见, 麦后播种绿肥时, 4 种绿肥处理的土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量间均无显著差异; 然而, 麦后播种怀豆和油菜时, 土壤水溶性有机碳含量均显著高于休闲处理; 与休闲相比, 麦后播种四种绿肥时均显著提高了微生物量碳含量。套种绿肥时, 油菜处理的土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量均显著高于长武怀豆处理 ( $P < 0.05$ ); 与休

闲相比, 套种油菜时显著提高了土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量。长武怀豆麦后播种时土壤微生物量碳含量均显著高于套种处理, 其他三种绿肥麦后播种与套种时土壤碳含量均无显著差异。

## 2.4 种植方式对不同绿肥处理 0—20 cm 土壤酶活性的影响

翻压绿肥两年后土壤酶活性结果 (表 5) 表明, 四种绿肥麦后播种时, 脲酶活性和蔗糖酶活性均无显著差异; 毛叶苕子处理的土壤磷酸酶活性显著低于其他三种绿肥; 油菜处理的土壤过氧化氢酶活性显著高于绿豆处理 ( $P < 0.05$ )。绿肥麦后播种时土壤

表 4 翻压 2 年后不同绿肥处理土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量(mg/kg)

Table 4 SMBC and DOC of different treatments after 2 years of the green manure application

种植方式 Planting pattern	种类 Variety	微生物量碳 Soil microbial biomass carbon	水溶性有机碳 Water soluble organic carbon
休闲 Fallow		142.4 c	16.2 d
麦后播种 After wheat harvest	怀豆 Huai bean	184.9 a	40.3 ab
	绿豆 Mung bean	184.8 a	26.9 abcd
	毛叶苕子 Hairy vetch	190.2 a	31.6 abcd
	油菜 Rape	194.5 a	38.6 abc
套种 Intercropped with wheat	怀豆 Huai bean	158.5 bc	23.2 bcd
	绿豆 Mung bean	170.7 ab	20.4 cd
	毛叶苕子 Hairy vetch	189.1 a	32.2 abcd
	油菜 Rape	193.2 a	43.5 a

注 (Note): 同列不同字母表示同一种种植方式不同绿肥处理间差异显著 Different letters mean significant differences among the green manure treatments under same cropping system at  $P < 0.05$ .

表 5 不同绿肥处理的土壤酶活性

Table 5 Soil enzyme activities in different treatments

种植方式 Planting pattern	绿肥种类 Variety	磷酸酶 Phosphatase (mg/g)	脲酶 Urease [mg/(g·d)]	蔗糖酶 Sucrase [mg/(g·d)]	过氧化氢酶 Catalase [mg/(g·h)]	总活性 Total
休闲 Fallow		6.4 d	2.6 bc	19.5 d	3.9 c	3.1
麦后播种 After wheat harvest	怀豆 Huai bean	7.6 ab	4.8 a	27.7 a	5.5 ab	4.8
	绿豆 Mung bean	8.0 ab	3.7 abc	25.5 ab	5.0 b	4.4
	毛叶苕子 Hairy vetch	6.7 cd	4.3 abc	24.5 ab	5.1 ab	4.0
	油菜 Rape	7.8 ab	4.5 ab	27.5 a	5.8 a	4.6
套种 Intercropped with wheat	怀豆 Huai bean	6.4 d	2.4 bc	20.5 cd	4.1 c	3.2
	绿豆 Mung bean	7.1 bcd	2.3 c	20.4 cd	3.7 c	3.3
	毛叶苕子 Hairy vetch	7.4 abc	4.3 abc	23.7 bc	5.3 ab	4.0
	油菜 Rape	8.3 a	3.4 abc	26.5 ab	5.8 a	4.5

注 (Note): 同列不同字母表示同一种种植方式不同绿肥处理间差异显著 Different letters mean significant differences among the green manure treatments under same cropping system at  $P < 0.05$ .

酶活性总体高于休闲处理。套种绿肥时, 种植油菜处理的土壤磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均显著高于长武怀豆和绿豆处理, 但与毛叶苕子处理间差异不显著。油菜和毛叶苕子套种时土壤酶活性总体高于休闲处理。长武怀豆麦后播种时土壤酶活性高于套种, 而其他绿肥麦后播种时土壤酶活性与套种时差异不大。总体酶活性高低顺序为麦后播种时怀豆 > 油菜 > 绿豆 > 毛叶苕子, 套种时油菜 > 毛叶苕子 > 绿豆 > 怀豆, 总体看来麦后播种时土壤总体酶活性高于套种。不论绿肥麦后播种还是套种, 土壤酶活性均高于休闲。

## 2.5 绿肥生物量与土壤性状的相关性

从表 6 可以看出, 绿肥生物量与土壤各种养分含量及土壤酶活性之间均有显著或极显著的正相关关系, 表明土壤肥力的提高主要取决于还田绿肥的生物量。

## 3 讨论

### 3.1 不同种植方式对土壤性质的影响

本研究发现, 麦后播种绿肥生物量要高于麦田套种生物量 (表 1), 说明种植方式明显影响绿肥生物

表 6 绿肥生物量与土壤养分和酶活性的相关性

Table 6 Relationships between green manure biomass and soil properties

指标 Index	<i>r</i>	指标 Index	<i>r</i>
全氮 Total N	0.5065*	TOC	0.9038**
速效钾 Avail. K	0.5883*	磷酸酶 Phosphatase	0.6792**
有效磷 Avail. P	0.8311**	脲酶 Urease	0.8778**
SMBC	0.7232**	蔗糖酶 Sucrase	0.9532**
DOC	0.724**	过氧化氢酶 Catalase	0.7491**

注 (Note): SMBC—微生物量碳 Soil microbial biomass carbon; DOC—水溶性有机碳 Water soluble organic carbon; TOC—总有机碳 Total organic carbon. \*, \*\*分别表示差异达到 5% 和 1% 的显著水平 Mean significant differences at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ .

量大小。其原因主要可能是一方面套种时撒播绿肥种子，有一部分种子 (特别是颗粒较大的绿肥种子) 很难与土壤有紧密接触，因此，出苗较少，尤其是小麦生长后期如果降水量不足会大大降低套种绿肥的密度，因此生物量较低；另一方面可能是因为麦后播种时绿肥在生长过程中与其竞争养分和光照的作物较少，有充足的养分和光照保证其生长，所以麦后播种时生物量要高于套种。

有研究发现，绿肥生物量与地力提高之间有一个显著的正相关关系，即绿肥生物量越高，能给土壤提供的新鲜有机物质越多，也就越有利于地力的提高<sup>[14]</sup>。本研究也发现，由于麦后播种绿肥生物量比麦间套种生物量高，所以麦后播种绿肥养分还田量都要高于套种 (表 2)。而且，一般翻压入土的生物量越大，培肥效果越好<sup>[15]</sup>，若绿肥翻压的生物量较小，则起不到改良土壤以及为后茬作物提供养分的作用<sup>[16]</sup>。本研究也发现，各土壤的性质和绿肥生物量之间存在显著或极显著的正相关关系 (表 6)，因为绿肥作物在生长过程中会产生一些分泌物和凋落物，增加了土壤的酶含量，从而活化了土壤中的一些有机物质，达到提高土壤肥力的效果。Shah 等<sup>[17]</sup>研究也认为，随着翻压绿肥生物量的提高，土壤养分也随之增加。本研究中，虽然麦后播种绿肥生物量要高于套种，但是这两种种植方式下的土壤养分、含碳量及各种酶之间并没有表现出明显差异，原因一方面可能是种植绿肥年限不够长；另一方面可能是套种绿肥种植时间比麦后播种绿肥早，套种绿肥更早、更多分泌有机物及形成凋落物。但是，总体来

说，麦后播种绿肥时土壤养分含量有高于套种绿肥的趋势。但是麦后播种绿肥和套种绿肥毕竟是两个不同的种植方式，对土壤养分的活化机理是否一致还有待于进一步研究。

### 3.2 不同绿肥品种对土壤性质的影响

绿肥的培肥效果因绿肥种类和种植地域的差异而不同。例如，李银平等<sup>[18]</sup>发现，在新疆连作 8 年的棉田种植并翻压 4 种不同绿肥后对土壤有机质含量有显著不同的效果：与不种绿肥相比，草木樨使土壤有机质含量提高 1.44 g/kg，大豆使有机质含量提高 0.17 g/kg；而油菜和油葵则使土壤有机质含量分别降低 1.58 和 0.17 g/kg。王晓军等<sup>[19]</sup>研究发现，在黑龙江绿肥和小麦套种 3 年并翻压还田后，毛叶苕子对土壤有机质以及速效氮、磷、钾的增加最明显且效果最好。本研究发现，2 年翻压绿肥后不管是麦后播种油菜还是麦间套种油菜，油菜还田后土壤有机质、速效磷及速效钾含量都要显著高于休闲，原因之一可能是盛花期油菜碳氮比为 20~25:1，更有利于植株被分解<sup>[20]</sup>；再加上油菜根系的分泌物可增强土壤微生物和土壤生化活性作用，并能溶解和利用土壤中的难溶性磷<sup>[16]</sup>，所以效果较佳。王晓军<sup>[21]</sup>则认为豆科绿肥氮还田量高于十字花科，原因应该与油菜自身不能固氮有关，本研究也有类似的结果。怀豆处理仅麦后播种土壤有机质、全氮、矿质态氮、速效磷及速效钾显著高于休闲，麦间套种与休闲之间差异不显著，可能是因为麦后播种怀豆生物量比较高造成的。

土壤水溶性有机碳和微生物量碳都表征土壤中微生物的活性，其中水溶性有机碳有些来自地表枯枝落叶，有些来自腐殖物质的分解，还可以通过微生物及植株根系分泌有机物而形成<sup>[22]</sup>；本研究发现，绿肥处理的土壤水溶性有机碳的含量均高于休闲处理 (表 4)，说明种植绿肥并翻压还田后能够增加土壤中水溶性有机碳含量。王伯诚等<sup>[23]</sup>也认为绿肥翻压还田后，随着植物体根茎的腐烂，产生许多可溶性有机化合物，使得土壤水溶性有机碳含量增加。土壤中的微生物量碳与土壤中有机质的含量成显著正相关<sup>[24-25]</sup>。本研究发现，除麦套怀豆处理外，其他绿肥处理均显著增加了土壤中微生物量碳含量 (表 4)，与土壤有机质含量的变化一致。麦后播种时油菜和怀豆对水溶性有机碳和微生物量碳含量的提升作用更明显；麦间套种时油菜的提升作用较其他绿肥效果更佳，原因可能与生物量有关。

土壤中的酶活性大小可以代表土壤中生物化学反应的强弱。武雪萍等<sup>[26]</sup>、刘国顺等<sup>[27]</sup>研究表明, 翻压绿肥能明显提高植烟土壤酶活性。本试验结果表明, 与休闲相比, 麦后播种油菜和怀豆、麦间套种油菜都能够显著提高土壤酶活性, 可能与其生物量较高有关。不管是麦后播种油菜还是套种油菜, 土壤酶活性都较高, 原因可能是因为油菜为直根系作物, 其根系在生长过程中对土壤形成穿刺效应, 根老化凋亡后, 土壤形成很多微孔隙, 改善了土壤的通气状况, 因而提高了土壤的有氧呼吸效率, 提高了酶活性<sup>[19]</sup>。

## 4 结论

在黄土高原地区, 可选择在麦收后的夏休闲期播种绿肥作物, 并于盛花期翻压还田, 可以起到改善土壤肥力的作用。绿肥品种以长武怀豆和十字花科油菜效果较好。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Blaser B C, Singer J W, Gibson L R. Winter cereal, seeding rate, and intercrop seeding rate effect on red clover yield and quality [J]. *Agronomy Journal*, 2007, 99(3): 723–729.
- [ 2 ] Agegnehu G, Ghizaw A, Sinebo W. Yield potential and land-use efficiency of wheat and faba bean mixed intercropping [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28(2): 257–263.
- [ 3 ] Pimentel D, Cerasale D, Stanley R C, *et al.* Annual vs. perennial grain production [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 161: 1–9.
- [ 4 ] 姚致远, 王峥, 李婧, 等. 轮作及绿肥不同利用方式对作物产量和土壤肥力的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2329–2336.  
Yao Z Y, Wang Z, Li J, *et al.* Effects of rotations and different green manure utilizations on crop yield and soil fertility [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(8): 2329–2336.
- [ 5 ] 李富翠, 赵护兵, 王朝辉, 等. 渭北旱地夏休闲秸秆还田和种植绿肥对土壤水分、养分和冬小麦产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1861–1871.  
Li F C, Zhao H B, Wang Z H, *et al.* Effects of straw mulching and planting green manure on soil water, nutrient and winter wheat yield on Weibei plateau, China [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(9): 1861–1871.
- [ 6 ] 张达斌. 种植豆科绿肥和施肥对渭北旱地冬小麦产量及土壤性质的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2012.  
Zhang D B. Effects of leguminous green manure and N fertilizer on winter wheat yield and soil properties in Weibei area [D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2012.
- [ 7 ] 陈玉香, 周道玮. 玉米-苜蓿间作的生态效应[J]. *生态环境*, 2003, 12(4): 467–468.  
Chen Y X, Zhou D W. The ecological effect of maize intercropping with alfalfa in the ecotone between agriculture and animal husbandry in northeast China [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 467–468.
- [ 8 ] Tejendra C, Andrew R. Barley-pea intercropping: effects on land productivity, carbon and nitrogen transformations [J]. *Field Crops Research*, 2014, 166: 18–25.
- [ 9 ] 张恩和, 黄高宝, 黄鹏. 不同供磷水平下粮豆间套种植对根系分布和根际效应的影响[J]. *草业学报*, 1999, 8(3): 35–38.  
Zhang E H, Huang G B, Huang P. The effects of phosphorus application levels on the root growth and rhizosphere with intercropping system of spring wheat and soybean [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 1999, 8(3): 35–38.
- [ 10 ] Betencourt E, Duputel M, Colomb B, *et al.* Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 181–190.
- [ 11 ] 杨瑞吉, 马海灵, 杨祁峰, 等. 种植密度与施氮量对麦茬复种饲料油菜土壤微生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 113–117.  
Yang R J, Ma H L, Yang Q F, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application rate on soil microbial activity under wheat/forage rape multiple cropping [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 113–117.
- [ 12 ] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1987.  
Guan S Y. *Soil enzyme and its study method* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1987.
- [ 13 ] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1232–1236.  
He W X, Tan X P, Wang X D, *et al.* Study on total enzyme activity index in soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1232–1236.
- [ 14 ] 李银平, 徐文修, 陈冰, 等. 绿肥种植模式对连作棉田土壤肥力及棉花产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2010, 19(9): 149–153.  
Li Y P, Xu W X, Chen B, *et al.* Effect of different planting patterns of green manures on soil fertility and cotton yield [J]. *Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(9): 149–153.
- [ 15 ] 李婧, 张达斌, 王峥, 等. 施肥和绿肥翻压方式对旱地冬小麦生长及土壤水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(3): 136–142.  
Li J, Zhang D B, Wang Z, *et al.* Effect of fertilizer and green manure incorporation methods on the growth and water use efficiency of winter wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(3): 136–142.
- [ 16 ] 罗贞宝. 绿肥对烟田土壤的改良作用及对烟叶品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2006.  
Luo Z B. Effects of green manure application on soil improvement of tobacco field and quality of flue-cured tobacco leaves [D]. Zhengzhou: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2006.
- [ 17 ] Shah Z A, Hmad S R, Latif A, *et al.* Rice wheat yields in relation to biomass of green manure legumes [J]. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2011, 27(1): 73–84.
- [ 18 ] 李银平, 徐文修, 候松山, 等. 春小麦复播绿肥对连作棉田土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 151–154.  
Li Y P, Xu W X, Hou S S, *et al.* The influence of spring wheat and green manure to the soil fertility of the continuous cropping cotton fields [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2009, 25(6): 151–154.



- [19] 王晓军. 黑龙江绿肥种植对土壤肥力及小麦产量的影响[D]. 黑龙江: 中国农业科学院硕士学位论文, 2011.  
Wang X J. The effects of green manure cropping on soil fertility and wheat yield in Heilongjiang Province [D]. Heilongjiang: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [20] 王丹英, 彭建, 徐春梅, 等. 油菜作绿肥还田的培肥效应及对水稻生长的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 26(1): 85–91.  
Wang D Y, Peng J, Xu C M, *et al.* Effects of rape straw manuring on soil fertility and rice growth [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 26(1): 85–91.
- [21] 王晓军, 于凤芝, 宿庆瑞, 等. 不同绿肥品种综合利用价值的比较[J]. 黑龙江农业科学, 2010, (6): 55–57.  
Wang X J, Yu F Z, Su Q R, *et al.* Comparison of comprehensive utilization value with different green manure varieties [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2010, (6): 55–57.
- [22] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 71–75.  
Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. Advances in soil water-soluble organic carbon research [J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 71–75.
- [23] 王伯诚, 赖小芳, 陈银龙, 等. 紫云英带籽翻耕的氮肥促腐效应[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(34): 16610–16612.  
Wang B C, Lai X F, Chen Y L, *et al.* Study on promoting decay effect of fertilizer-nitrogen of astragalus sinicus ploughed at maturity stage [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(34): 16610–16612.
- [24] Tabatabai M A. Effects of trace elements on urease activity in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1997, 9(1): 9–13.
- [25] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-Minzi R, *et al.* Biochemical properties of a Mediterranean soil as affected by long-term crop management systems [J]. Soil & Tillage Research, 2002, 67(1): 109–114.
- [26] 武雪萍, 刘增俊, 赵跃华, 等. 施用芝麻饼肥对植烟根际土壤酶活性和微生物碳、氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 541–546.  
Wu X P, Liu Z J, Zhao Y H, *et al.* Effects of sesame cake fertilizer on soil enzyme activities and microbial C and N at rhizosphere of tobacco [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(4): 541–546.
- [27] 刘国顺, 李正, 敬海霞, 等. 连年翻压绿肥对植烟土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1472–1478.  
Liu G S, Li Z, Jing H X, *et al.* Effects of consecutive turnover of green manures on soil microbial biomass and enzyme activity [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1472–1478.