

# 麦棉套作棉花根际非根际土壤微生物和土壤养分

王 瑛,孟亚利,陈兵林,周治国\*,束红梅,卞海云

(南京农业大学/农业部作物生长调控重点开放试验室,江苏南京 210095)

**摘要:**在麦棉套作栽培模式下,设置不隔根、纱网隔根和塑膜隔根 3 种麦棉套种方式,研究麦棉套作对棉花根际和非根际土壤微生物数量、活性和土壤养分(全氮、有效磷和速效钾)含量的影响,结果表明:麦棉套作有利于棉花根际与非根际土壤细菌的增殖,盛蕾期不隔根处理棉花根际土壤与非根际土壤细菌数量分别是塑膜隔根处理的 2.57 和 2.81 倍。但麦棉套作不利于土壤真菌和放线菌的增殖。细菌在土壤微生物区系中占 99.9%。所以,麦棉套作显著提高了棉花土壤微生物数量,同时也增强了微生物活性。麦棉共处期纱网隔根处理棉花土壤全氮、有效磷、速效钾含量显著高于不隔根处理和塑膜隔根处理,证明麦棉套作系统中小麦根系分泌物与脱落物的存在对棉花土壤养分含量的增加有明显的促进作用,即存在种间营养补偿效应。而共处期不隔根处理套作棉土壤养分含量总体上显著低于隔根处理的现象则反映出小麦根系对棉花土壤养分的竞争作用大于其对棉花土壤养分的促进作用。小麦收获后,小麦根系对棉花养分的竞争作用解除,不隔根处理棉花土壤养分含量显著高于塑膜隔根和纱网隔根处理。

**关键词:**麦棉套作;麦棉共处期;棉花;根际非根际土壤;土壤微生物数量;土壤养分

**文章编号:**1000-0933(2006)10-3485-06 **中图分类号:**Q143,Q938,S154 **文献标识码:**A

## Studies on the soil microorganism quality and soil nutrient content at the rhizosphere and non-rhizosphere region of cotton in wheat-cotton intercropping system

WANG Ying, MENG Ya-Li, CHEN Bing-Lin, ZHOU Zhi-Guo\*, SHU Hong-Mei, BIAN Hai-Yun (Key Laboratory of Crop Growth Regulation of the Ministry of Agriculture, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3485 ~ 3490.

**Abstract:** Under the condition of cotton-wheat intercropping system, with the application of three root separating ways, i. e. in the wheat-cotton intercropping system, the wheat roots mixed with cotton roots naturally (WCRM), the wheat roots was separated from cotton roots by nylon net (WCRN) and the wheat roots was separated from cotton roots by plastic film (WCRP). Effect of different composite root on soil microorganism population, soil bacterial activity and soil nutrient content in the cotton rhizosphere and non-rhizosphere was studied. The results showed that: in the coexist period of wheat and cotton, soil bacteria number in the cotton rhizosphere and non-rhizosphere in WCRM was the highest, followed gradually by in WCRN and in WCRP. But fungi and actinomycetes number in WCRM were the lowest. In a word, WCRM was in favor of increasing the microorganism population in the cotton rhizosphere and non-rhizosphere, and subsequently result in increasing of the vigor of the soil microorganism in WCRM, which leading to the increase of content on total nitrogen, available phosphorus and rapidly available potassium. As the nylon net and the plastic film can alleviate or interrupt the nutrient competition between wheat roots and cotton roots, the soil nutrient content

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30170545 和 30370831);农业部农业结构调整重大技术研究专项资助项目(2003-05-02B);江苏省自然科学基金资助项目(BK2005091)

**收稿日期:**2005-02-09;**修订日期:**2005-12-06

**作者简介:**王瑛(1979~),女,四川成都人,硕士生,主要从事作物生理研究。

\*通讯作者 Corresponding author. E-mail: giscott@njau.edu.cn

**Foundation item:** The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30170545, 30370831); The Major Technological Research Programme for Agricultural Structure Adjustment of Chinese Department of Agriculture (No. 2003-05-02B); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK2005091)

**Received date:** 2005-02-09; **Accepted date:** 2005-12-06

**Biography:** WANG Ying, Master, mainly engaged in crop physiology.

in the cotton rhizosphere of WCRM was the lowest, and in WCRN that was the highest. In budding stage, as wheat had been harvested, the soil nutrient content in cotton rhizosphere and nonrhizosphere in WCRM was improved, that was the content of total nitrogen, available phosphorus and rapidly available potassium were higher in WCRM than in the two others. As a whole, in WCRM, there not only existed disadvantages as nutrition competition between belowground tissues of wheat and cotton, but also existed advantages in improving soil microorganism activity and soil nutrient content at the cotton rhizosphere and nonrhizosphere as affect by the wheat root.

**Key words:** cotton-wheat intercropping; coexist period of wheat and cotton; cotton; rhizosphere and nonrhizosphere soil; soil microorganism number; soil microorganism activity; soil nutrient content

继承和发扬“精耕细作”的多熟种植制度,提高耕地复种指数,是我国当前稳定和增加粮食播种面积以及实现未来粮食安全的有效途径之一<sup>[1]</sup>。麦棉套作两熟是我国粮棉主产区的主要种植方式,可以充分利用光热和土地资源,提高土地产出率,协调粮经作物均衡生产,促进农业可持续发展<sup>[2]</sup>。关于麦棉套作系统种间关系的研究已有一些报道,但主要集中在套作棉地上部光合效率、棉铃发育及地下部根系生长的时空动态分布等方面<sup>[3~5]</sup>,而对地下部种间关系的根际微区营养及微生物研究还很缺乏。土壤微生物是维持土壤质量的重要组成部分,也是土壤物质循环的主要推动者。土壤微生物区系构成对土壤环境质量的变化很敏感,作物类型、施肥、灌溉、覆盖及种植方式等因素的变化都会对土壤微生物的数量与种类产生显著影响,进而影响土壤养分的转化与释放<sup>[7~9]</sup>。

近年来,利用根系分隔方法和同位素标记示踪技术对间作系统,特别是禾本科与豆科作物间作系统地下部种间营养关系、根际微生态及其对产量贡献机理的研究不断加强<sup>[10~14]</sup>,进一步证实间作系统具有产量优势的主要原因是存在地下部养分吸收利用的种间补偿效应,且根际效应可能是其机制之一,如间作小麦对大豆磷吸收的促进<sup>[11]</sup>、间作禾本科作物对花生铁营养的改善<sup>[12]</sup>、豆类与禾本科作物间作系统的氮素高效利用<sup>[13,14]</sup>等。但目前关于套作系统地下部种间营养关系的研究甚少。

本试验以黄淮地区广泛应用的改良 3 1 式麦棉套作两熟模式<sup>[2,3]</sup>为代表,采用地下根系分隔方法研究麦棉套作系统中棉花根际与非根际土壤微生物区系以及土壤有效养分含量的变化规律,探索麦棉套作系统的根际微生态机理,为在实践中调控套作棉生长提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试小麦品种为徐州 26,棉花品种为美棉 33B。麦棉套作方式为改良 3 1 式,即每个种植带 80cm,种植 3 行小麦套种 1 行棉花,其中小麦行距 15cm,预留棉花套种行宽 50cm<sup>[2]</sup>。2002 年 11 月 13 日播种小麦,2003 年 4 月 23 日套种棉花。2003 年 6 月 5 日收获小麦后,棉花自成为 80cm 等行距。麦棉管理均按高产栽培要求进行。供试土壤取自江苏省仪征市的高沙土,为 0~20cm 的表层土,有机质含量 1.52%,全氮 0.134%,速效磷 34.7mg kg<sup>-1</sup>,速效钾 47.86mg kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 试验设计** 试验于 2002~2003 年在南京农业大学卫岗试验站进行,采用池栽方法,池宽 400 cm,长 200cm,土层厚度 150cm。每池可种植 4 个种植带,种植面积 400cm ×200cm。试验设置不隔根(根系和肥水可以相互通过)、纱网隔根(用 120 目尼龙纱网隔离,根系不能通过,肥水可以相互通过)和塑膜隔根(用塑料薄膜隔离,根系和肥水都不能相互通过)3 种麦棉套作处理,隔根深度为 100cm,隔根位置为棉、麦中间。各处理重复 3 池,随机区组排列。

**1.2.2 试验方法** 在麦棉共处中期(T1:棉花苗期,5 月 17 日)、共处末期(T2:棉花初蕾期,6 月 1 日)和小麦收获后(T3:棉花盛蕾期,6 月 22 日),采用抖土法采集棉花耕层(地面以下 5cm 到 20cm)根际和非根际土壤(通常把围绕根 2mm 以内的土壤称为根际土,离根较远的土壤称为非根际土),每处理取 5 点,分类分别混匀后四分法取样。

**1.2.3 测定项目** 采用梯度稀释法制备土壤悬液<sup>[15]</sup>,采用涂抹平板计数法测定细菌、真菌、放线菌的数量<sup>[15]</sup>,培养基分别为牛肉膏蛋白胨培养基、马丁氏培养基、高氏一号培养基<sup>[15]</sup>。采用碱吸收滴定法测定土壤呼吸强度<sup>[15]</sup>。采用凯氏定氮法测定全氮含量<sup>[16]</sup>,钼锑抗法测定有效磷含量<sup>[16]</sup>,火焰光度计法测定速效钾含量<sup>[16]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 麦棉套作对棉花根际和非根际土壤微生物数量及其活性变化的影响

**2.1.1 细菌数量** 由表 1 看出,棉花根际和非根际土壤中,细菌数量占土壤微生物总数的 99 % 以上,居绝对优势。无论隔根处理还是不隔根处理,从麦棉共处期到麦收后的棉花盛蕾期,棉花根际和非根际土壤细菌数量持续增加。各生育时期均以不隔根处理的棉花根际和非根际土壤细菌数量为最高,纱网隔根处理居中,塑膜隔根处理最低,差异显著。处理间差异随生育期的递进而逐渐增大,在苗期,不隔根处理根际土壤与非根际土壤细菌数量分别是塑膜隔根处理的 1.45 倍和 1.21 倍,而在盛蕾期时分别增大到 2.57 倍和 2.81 倍。

由表 1 还可看出,在棉花苗期和初蕾期,棉花根际土壤的细菌数量均显著低于非根际,而到棉花盛蕾期时,根际土壤的细菌数量则显著高于非根际,根际效应明显。由于隔根与不隔根处理趋势一致,说明这种现象与小麦根系的存在与否没有关系。

**2.1.2 真菌数量** 从麦棉共处期到棉花盛蕾期,棉花根际和非根际土壤真菌数量均呈递增趋势,这与细菌数量随生育时期变化的趋势相似(表 1)。棉花根际土壤真菌数量的处理间差异在棉花苗期不显著,在初蕾期塑膜隔根处理显著高于纱网隔根处理和不隔根处理,后两者之间的差异不显著;至盛蕾期仍以塑膜隔根处理为最高,其次为纱网隔根处理,不隔根处理最小,差异达到显著水平。而棉花非根际土壤真菌数量,在各生育时期均明显表现为塑膜隔根处理最高,纱网隔根处理居中,不隔根处理最低,差异显著。另外,无论隔根处理还是不隔根处理,各生育期棉花根际土壤真菌数量总体上均低于非根际土壤,即不存在明显的根际效应。

**2.1.3 放线菌数量** 在棉花苗期,棉花根际与非根际土壤放线菌数量处理间差异较小(表 1);在初蕾期,根际与非根际土壤放线菌数量处理差异较大,均表现为塑膜隔根处理显著高于纱网隔根处理,纱网隔根处理又显著高于不隔根处理;到盛蕾期处理间差异趋势仍然同初蕾期,但纱网隔根处理与不隔根处理之间的差异很小,且蕾期各处理土壤放线菌数量均较初蕾期有所下降。与土壤真菌相似,各处理棉花根际土壤放线菌数量也低于非根际土壤。

**2.1.4 土壤呼吸强度** 土壤呼吸强度是衡量土壤微生物生命活动强弱和土壤生化强度的一个综合指标。由图 1 看出,从棉花苗期到棉花盛蕾期,棉花土壤呼吸强度增强,处理间差异表现为 WCRM > WCRN > WCRP,差异显著。该趋势与各处理土壤细菌数量的

表 1 不同套作处理对棉花根际和非根际土壤微生物数量的影响 ( $\times 10^5 \text{ cfu g}^{-1} \text{ dry soil}$ )

Table 1 Effect of different treatments of wheat-cotton intercropping on the microbes number in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of cotton

生育时期		处理	细菌 ( ×10 <sup>3</sup> )	真菌	放线菌	
Growth stages		Treatments	Bacteria	Fungi	Actinomycetes	
T1	RH	WCRM	20.93b	5.46a	8.73c	
		WCRN	23.45a	5.45a	12.18a	
		WCRP	18.27c	5.63a	11.35ab	
	NRH	WCRM	36.96a	3.05c	12.47a	
		WCRN	26.95c	4.18b	12.56a	
		WCRP	30.47b	10.97a	13.30a	
	T2	RH	WCRM	88.91a	4.00b	10.53c
			WCRN	39.49b	4.49b	22.30b
			WCRP	35.53c	7.81a	29.38a
NRH		WCRM	82.99a	7.76bc	14.75c	
		WCRN	76.45b	8.24b	23.77b	
		WCRP	43.24c	15.17a	37.12a	
T3	RH	WCRM	244.98a	6.53c	13.53b	
		WCRN	116.53b	16.80ab	14.43b	
		WCRP	95.27c	18.79a	25.21a	
	NRH	WCRM	167.76a	7.34c	13.09b	
		WCRN	72.25b	23.02b	13.65b	
		WCRP	59.56c	33.80a	35.68a	

T1:麦棉共处中期;T2:麦棉共处末期;T3:棉花盛蕾期。RH:根际土壤;NRH:非根际土壤;下同 T1, T2 and T3 the middle coexist stage, the terminal coexist stage, and the budding stage, respectively. RH and NRH stand for the rhizosphere soil and non-rhizosphere soil of cotton in the wheat-cotton intercropping system; WCRM, WCRN and WCRP stand for the wheat roots mixed with cotton roots naturally, the wheat roots was separated from the cotton roots by nylon net and the wheat roots was separated from the cotton roots by plastic film in the wheat-cotton intercropping system, respectively; the same as bellow;表中小写字母表示在 0.05 水平上的差异显著性 The small letters in table indicates significance at 0.05 level

变化趋势一致,说明土壤细菌数量的增加,促进了作物残体在土壤中的腐解转化,同时引起土壤一系列的生物变化,加快  $\text{CO}_2$  的释放,在一定程度上增强了土壤呼吸强度。当然小麦根系生物量对提高土壤呼吸强度的作用也不容忽视。

## 2.2 麦棉套作对棉花根际和非根际土壤养分含量变化的影响

### 2.2.1 土壤全氮含量

棉花根际土壤全氮含量在3个生育时期的处理间差异均表现为  $\text{WCRN} > \text{WCRP} > \text{WCRM}$ ,除初蕾期不隔根处理与塑膜隔根间的差异不显著外,其他差异均达到显著水平(图2)。非根际土壤全氮含量的处理间差异趋势与根际土壤正好相反,即  $\text{WCRM} > \text{WCRP} > \text{WCRN}$ 。总体上各处理土壤全氮含量在根际土壤与非根际土壤之间的差异不明显,在各生育期之间的差异也较小。

### 2.2.2 土壤有效磷含量

在棉花苗期和初蕾期,不隔根处理的棉花根际和非根际土壤有效磷含量均显著低于塑膜隔根处理,而纱网隔根处理的根际土壤有效磷含量有略高于不隔根处理和塑膜隔根处理的趋势,但未达到显著水平(图3)。在棉花盛蕾期,不隔根处理的棉花根际和非根际土壤有效磷含量显著高于塑膜隔根处理,纱网隔根处理介于二者之间。另外,根际土壤与非根际土壤之间有效磷含量的差异,在苗期不显著,在初蕾期为非根际显著高于根际,而盛蕾期时根际略高于非根际。

### 2.2.3 土壤速效钾含量

棉花根际和非根际土壤中速效钾含量随生育期的延后而降低。在麦棉共处中期和末期,不论根际还是非根际土壤,不隔根处理与塑膜隔根处理的土壤速效钾含量之间没有显著差异,但二者均显著低于纱网隔根处理(图4)。在盛蕾期不隔根处理根际和非根际土壤速效钾含量显著高于塑膜隔根和纱网隔根处理,后两者之间差异不显著。

## 3 讨论

土壤微生物的生长活动与根系分泌物、脱落物等物质有密切关系,根系分泌物提供了根际微生物生长的主要碳源和能源<sup>[17,18]</sup>。本试验中不隔根处理棉花根际与非根际土壤细菌数量显著高于塑膜隔根处理,说明麦棉自然套作中小麦根系横向伸入棉花土壤,其根系分泌物、脱落物及其腐解物释放的营养物质显著促进了棉花土壤细菌的增殖。但这些营养物质成分似乎不利于真菌和放线菌增殖,使不隔根处理棉花根际与非根际土壤真菌和放线菌数量显著低于塑膜隔根处理,这可能与套作引起根系分泌物组成与数量的改变有关<sup>[19]</sup>。因此,对套作小麦与棉花根系分泌物成分变化及其与微生物区系变化的关系尚需深入研究。纱网隔根处理各类微生物数量均介于不隔根处理与塑膜隔根处理之间的

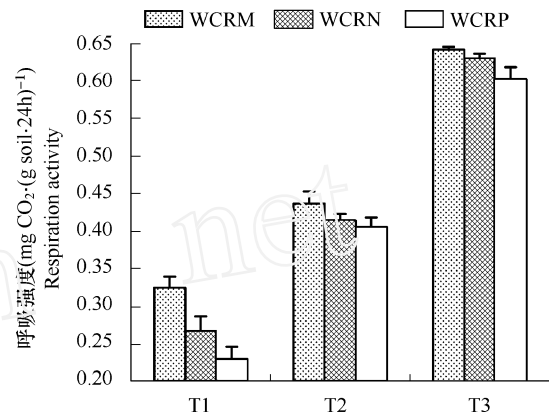


图1 不同麦棉套作处理对套种行土壤呼吸强度的影响

Fig. 1 Effect of different treatments of wheat-cotton intercropping on the respiration activity in the intercropping line

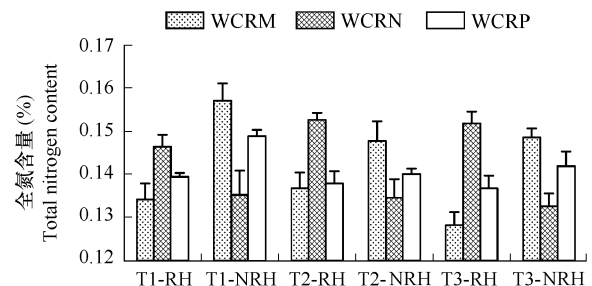


图2 不同麦棉套作处理对棉花根际和非根际土壤全氮含量的影响

Fig. 2 Effect of different treatments of wheat-cotton intercropping on the total nitrogen content in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of cotton

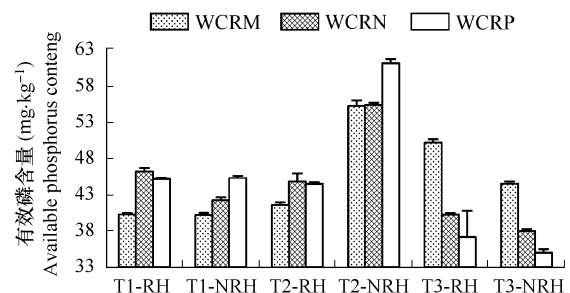


图3 不同麦棉套作处理对棉花根际和非根际土壤有效磷含量的影响

Fig. 3 Effect of different treatments of wheat-cotton intercropping on the available phosphorus content in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of cotton

现象,反映出小麦根系分泌物和脱落物中的部分营养物质可通过扩散作用穿越纱网到达棉花土壤。左元梅等<sup>[10]</sup>采用<sup>14</sup>C示踪技术研究也证实玉米根系的分泌物可穿越尼龙网而到达间作花生的根际。由于土壤细菌数量在土壤微生物区系构成中占极大比重(99.9%),所以,总体来说麦棉套作可以显著提高棉花土壤微生物数量,同时也增强了土壤微生物活性(不隔根处理棉花土壤呼吸强度显著提高)。

麦棉套作土壤微生物数量的增加和土壤呼吸强度的增高,将有利于棉花土壤养分的释放与有效化,但实际上本试验3种土壤养分含量变化的综合结果表现为,麦棉共处期间不隔根处理棉花土壤全氮、有效磷、速效钾含量总体上均低于2种隔根处理。这是因为麦棉共

处期间,不隔根套作处理的麦棉根系相互交错,种植时间较早的小麦具有明显的养分竞争优势,其根系对棉花土壤养分的竞争作用大于其根际效应对棉花土壤养分含量的促进作用。而在纱网隔根套作下,小麦根系进入棉花土壤受阻,小麦对棉花土壤养分的竞争作用大大减小,但小麦根系分泌物和腐解物等仍然可以发挥其对棉花土壤养分的促进作用,从而出现种间关系对土壤养分的促进作用大于竞争作用的结果,故其棉花土壤养分含量高于不隔根处理。塑膜隔根处理的棉花既没有受到小麦根系争夺养分的影响,也没有从小麦根际效应获得益处,因而其养分含量高于不隔根处理而低于纱网隔根处理。在李隆等<sup>[11]</sup>采用种间根系分隔方法对小麦大豆间作影响土壤磷吸收的研究中,也出现纱网隔根处理养分含量最高的现象。

在小麦收获后的棉花盛蕾期,不隔根处理土壤3种养分含量显著高于塑膜隔根和纱网隔根处理,表明小麦根系对养分的竞争作用解除,同时小麦根系分泌物也随之消失,但小麦根系残留物腐解释放养分,并且棉花根系营养吸收空间扩大,因而其土壤全氮、有效磷、速效钾含量显著高于隔根处理。

多种间作系统被研究证实,地下部种间营养补偿效应是间作系统具有产量优势的重要原因<sup>[10~14]</sup>。本试验结果显示,麦棉套作系统除存在种间营养竞争外,也存在种间根系的营养互补,但不同于间作的是套作的两种作物由于种植时间差异大,共处期间处于优势地位的作物对营养的竞争作用非常强烈,往往掩盖了其对劣势作物的营养补偿作用。至于小麦根系分泌物等物质对棉花土壤养分影响的机制还有待于进一步研究,小麦根系的分泌物和脱落物既可能直接转移营养元素<sup>[13,14]</sup>,也可能通过酸化作用、还原作用或螯合作用促进土壤养分释放而间接起作用<sup>[11,12]</sup>,亦或二者兼有。

#### 4 结论

**4.1** 麦棉套作有利于促进棉花根际与非根际土壤细菌的增殖,但不利于土壤真菌和放线菌的增殖。细菌是土壤微生物区系的主要成员,所以,总体来说麦棉套作显著提高了棉花土壤微生物数量,同时也增强了微生物活性。套作棉在盛蕾期根际土壤细菌数量显著高于非根际,而在生长前期没有明显的根际效应。真菌与放线菌各生育期均未表现出明显的根际效应,原因尚待明确。

**4.2** 麦棉套作系统中小麦根系分泌物、脱落物的存在对棉花根区土壤全氮、有效磷、速效钾含量的增加有显著促进作用,即存在种间营养补偿效应。麦棉共处期纱网隔根处理棉花土壤养分含量最高的现象有力地证明了这一点。而共处期不隔根处理套作棉土壤养分含量总体上显著低于隔根处理的原因是小麦根系对棉花土壤养分的竞争作用大于其对棉花土壤养分含量的促进作用所致。小麦收获后,小麦根系对棉花养分的竞争作用解除,不隔根处理棉花土壤养分含量显著高于塑膜隔根和纱网隔根处理。

#### References:

- [1] Wang H G. Research on food safety in China. Beijing: China Agriculture Press, 2005. 215.

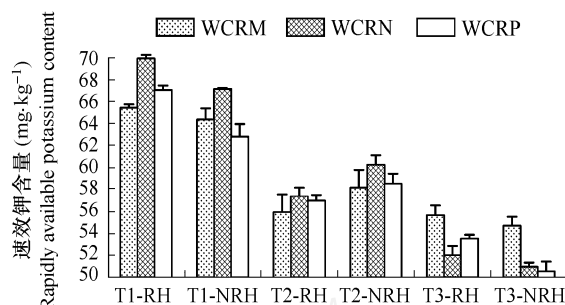


图4 不同麦棉套作处理对棉花根际和非根际土壤速效钾含量的影响

Fig. 4 Effect of different treatments of wheat-cotton intercropping on the rapidly available potassium content in the rhizosphere and non-rhizosphere soil of cotton

- [ 2 ] Shi P, Chen C R, Zhou Z G, *et al.* Theory and practice of high yielded cotton-wheat double cropping system. Beijing: Atomic Energy Press, 1996.
- [ 3 ] Zhou Z G, Meng Y L, Chen B L. Effect of Shading in Wheat-Cotton Double Cropping Symbiotic Period on Photosynthetic Performance of Leaves during Cotton Seedling Stage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(6): 825 ~ 831.
- [ 4 ] Zhou Z G, Meng Y L, Shi P, *et al.* Effects of planting patterns on cotton boll development in directly sowed cotton with early-mid maturity in wheat field. *Acta Gossypii Sinica*, 1998, 10(6): 329 ~ 333.
- [ 5 ] Wang L G, Meng Y L, Zhou Z G, *et al.* Temporal and spatial dynamic distribution of cotton wheat composite root system under condition of cotton-wheat double cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(7): 888 ~ 896.
- [ 6 ] Meng Y L, Wang L G, Zhou Z G. 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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 904 ~ 910.
- [ 7 ] Yang Q H, Han J F, He D X. Effects of liquid film on the quantity of microorganisms and activity of enzymes in a cotton field. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1312 ~ 1317.
- [ 8 ] Xu R F, Wang X L. Relation of Microbial Population Dynamics and Nutrient in Soil of Continuous Cropping with Peanut. *Journal of Peanut Science*, 2003, 32(3): 19 ~ 24.
- [ 9 ] Li X Y, Zhao B Q, Li X H, *et al.* Effects of Different Fertilization Systems on Soil Microbe and Its Relation to Soil Fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1591 ~ 1599.
- [ 10 ] Zuo Y M, Chen Q, Zhang F S. The Mechanisms of Root Exudates of Maize Improvement of Iron Nutrition of Peanut in Peanut/ Maize Intercropping System by  $^{14}\text{C}$  Tracer Technique. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2004, 18(1): 43 ~ 46.
- [ 11 ] Li L, Li X L, Zhang F S. Facilitation of wheat to phosphorus uptake by soybean in the wheat-soybean intercropping. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 629 ~ 633.
- [ 12 ] Zuo Y M, Liu Y X, Zhang F S. Effects of improved iron nutrition of peanut intercropped with maize on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen-fixing of peanut nodule. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2584 ~ 2590.
- [ 13 ] Xiao Y B, Li L, Zhang F S. The Interspecific Nitrogen Facilitation and the Subsequent Nitrogen Transfer between the Intercropped Wheat and Fababean. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(5): 965 ~ 973.
- [ 14 ] Chu G X, Shen Q R, Li Y X, *et al.* Researches on Bi-directional N transfer between the intercropping system of groundnut with rice cultivated in aerobic soil using  $^{15}\text{N}$  foliar labeling method. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 278 ~ 284.
- [ 15 ] Xu G H, Zheng H Y. Handbook of Methods for Edaphon Analyzing. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [ 16 ] Lao J S. Handbook of Methods for the Soil Chemistry Analyzing. Beijing: Agriculture Press, 1988. 241 ~ 298.
- [ 17 ] Ikryl Z, Vancura V. Root exudates of plants 4. Wheat root exudation as dependent on growth, concentration gradient of the exudates and the presence of bacteria. *Plant and Soil*, 1980, 57: 69 ~ 83.
- [ 18 ] Shen J B, Zhang F S. Ecological Effect of Root Exudates. Review of China Agricultural Science and Technology, 1999(4): 21 ~ 27.
- [ 19 ] Zuo Y M, Zhang F S, Li X L, *et al.* Studies on the improvement in iron nutrition of peanut by intercropping with maize on a calcareous soil. *Plant Soil*, 2000, 220(12): 13 ~ 25.

## 参考文献:

- [ 1 ] 王宏广. 中国粮食安全研究, 北京: 中国农业出版社, 2005. 215.
- [ 2 ] 施培, 陈翠容, 周治国, 等. 麦棉套作高产理论与实践. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [ 3 ] 周治国, 孟亚利, 陈兵林, 等. 麦棉两熟共生期对棉苗叶片光合性能的影响. *中国农业科学*, 2004, 37(6): 825 ~ 831.
- [ 4 ] 周治国, 孟亚利, 施培, 等. 种植方式对麦棉套种早熟直播棉棉铃发育的影响. *棉花学报*, 1998, 10(6): 329 ~ 333.
- [ 5 ] 王立国, 孟亚利, 周治国, 等. 麦棉两熟双高产条件下麦棉复合根系生长的时空动态分布. *作物学报*, 2005, 31(7): 888 ~ 896.
- [ 6 ] 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. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 904 ~ 910.
- [ 7 ] 杨青华, 韩锦峰, 贺德先. 液体地膜覆盖对棉田土壤微生物和酶活性的影响. *生态学报*, 2005, 25(6): 1312 ~ 1317.
- [ 8 ] 徐瑞富, 王小龙. 花生连作田土壤微生物群落动态与土壤养分关系研究. *花生学报*, 2003, 32(3): 19 ~ 24.
- [ 9 ] 李秀英, 赵秉强, 李黎花, 等. 不同施肥制度对土壤微生物的影响及其与土壤肥力的关系. *中国农业科学*, 2005, 38(8): 1591 ~ 1599.
- [ 10 ] 左元梅, 陈清, 张福锁. 利用  $^{14}\text{C}$  示踪研究玉米/花生间作玉米根系分泌物对花生铁营养影响的机制. *核农学报*, 2004, 18(1): 43 ~ 46.
- [ 11 ] 李隆, 李晓林, 张福锁. 小麦-大豆间作中小麦对大豆磷吸收的促进作用. *生态学报*, 2000, 20(4): 629 ~ 633.
- [ 12 ] 左元梅, 刘永秀, 张福锁. 玉米/花生混作改善花生铁营养对花生根瘤碳氮代谢及固氮的影响. *生态学报*, 2004, 24(11): 2584 ~ 2590.
- [ 13 ] 肖焱波, 李隆, 张福锁. 小麦/蚕豆间作体系中的种间相互作用及氮转移研究. *中国农业科学*, 2005, 38(5): 965 ~ 973.
- [ 14 ] 褚贵新, 沈其荣, 李奕林, 等. 用  $^{15}\text{N}$  叶片标记法研究旱作水稻与花生间作系统中氮素的双向转移. *生态学报*, 2004, 24(2): 278 ~ 284.
- [ 15 ] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986.
- [ 16 ] 劳家桢. 土壤农化分析手册. 北京: 北京农业出版社, 1988. 241 ~ 298.
- [ 18 ] 申建波, 张福锁. 根分泌物的生态效应. *中国农业科技导报*, 1999, (4): 21 ~ 27.