

# 不同轮作模式对砂田土壤微生物区系 及理化性状的影响\*

吴宏亮<sup>1,2</sup> 康建宏<sup>2</sup> 陈阜<sup>1\*\*</sup> 许强<sup>2</sup> 张海林<sup>1</sup> 赵亚慧<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学农学与生物技术学院 农业部农作制度重点实验室 北京 100193; 2. 宁夏大学农学院 银川 750021)

**摘要** 砂田是干旱半干旱地区具有综合效能的旱作覆盖技术,有明显改良和调节农田小环境的功效,近年来随着砂田产业化的快速发展,西瓜连作现象非常普遍,连作障碍明显。针对砂田西瓜连作障碍明显的现状,基于定位试验,研究了西瓜连作(对照,CK)和西瓜→花豆、西瓜→辣椒、西瓜→南瓜3种轮作方式对砂田土壤微生物群落和理化性状的影响,结果表明:与连作相比,3种轮作模式均可改善土壤微生物区系结构,增加土壤微生物多样性指数,增加细菌、放线菌数量及细菌数量与真菌数量比值(B/F),减少真菌数量;其中以与辣椒轮作效果最为明显,多样性指数(McIntosh指数,0.247)较CK(0.146)显著增加,放线菌数量比例(31.98%)较CK(14.22%)显著增加,但真菌数量及占总菌数的比例(0.06%)相对CK(0.43%)明显降低。轮作能改变土壤微生态环境,提高砂田土壤微生物多样性,缓解西瓜的连作障碍,西瓜与辣椒轮作是有效预防和克服连作障碍的较佳种植制度。

**关键词** 砂田 轮作模式 微生物区系 理化性状 连作障碍

**中图分类号:** S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2013)06-0674-07

## Effect of different rotation patterns on soil microbial population and physiochemical properties under gravel-sand mulched field conditions

WU Hong-Liang<sup>1,2</sup>, KANG Jian-Hong<sup>2</sup>, CHEN Fu<sup>1</sup>, XU Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Hai-Lin<sup>1</sup>, ZHAO Ya-Hui<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University; Key Laboratory of Farming Systems, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China; 2. College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract** Gravel-sand mulching is a comprehensive technology in dry land farming that significantly improves microclimatic conditions in arid and semi-arid regions of Northwest China. With the development of watermelon industry and regularization of produce in recent years, continuous watermelon cropping has become a common farming system. The obstacles of continuous cropping of watermelon have been more severe in gravel-sand mulched fields. This study investigated and resolved the obstacles of continuous cropping of watermelon under gravel-sand mulched field conditions. The effects of crop rotation on soil microbial population and physiochemical properties were evaluated based on long-term experiment of continuous cropping under gravel-sand mulched field conditions. The four treatments arrayed in the experiment included watermelon → watermelon (CK), watermelon → kidney bean, watermelon → pepper and watermelon → pumpkin. Results suggested that compared with the control, the three rotation treatments significantly decreased the number and proportion of fungi, while significantly increased the number of bacteria and actinomyce, number ratio of bacteria to fungi (B/F). Soil microbe diversity index also significantly increased under the three rotation systems. The effect of the watermelon → pepper treatment was good, under which the diversity index (McIntosh index) was 0.247, (vs CK of 0.146), proportion of actinomyce was 31.98% (vs CK of 14.22%), proportion of fungi was 0.06% (vs CK of 0.43%). Different crops had different water and nutrient requirements which resulted in different soil microbial populations. It was concluded that crop rotation changed soil microenvironment in gravel-sand mulched fields, increased diversity index and limited adverse effects of continuous cropping on watermelon. An efficient rotation system for resolving the obstacles in continuous cropping of watermelon

\* 国家科技支撑计划项目(2006BAD15B05, 2007BAD54B02)资助

\*\* 通讯作者: 陈阜(1964—), 男, 教授, 主要从事宏观农业和农作制度研究。E-mail: chenfu@cau.edu.cn

吴宏亮(1976—), 男, 博士, 讲师, 主要从事农作制度及农业生态研究。E-mail: nxuwu@163.com

收稿日期: 2012-11-06 接受日期: 2013-01-14

was watermelon and pepper rotation system.

**Key words** Gravel-sand mulched field, Rotation system, Microbial population, Physiochemical property, Continuous cropping obstacles

(Received Nov. 6, 2012; accepted Jan. 14, 2013)

砂田耕作法是我国西北地区劳动人民为了生存, 与干旱、半干旱地区的气候、地理、土壤等复杂的自然条件抗争, 经过长期生产实践不断总结创新而形成的一种世界独有的中国西北地区独特的保护性耕作方法, 具有明显的增渗、减蒸、保温、抗蚀作用。主要分布在甘肃白银、兰州周边地区和宁夏中卫的环香山地区。据统计, 2010 年砂田面积约为 13.33 万  $\text{hm}^{2[1-2]}$ 。实践证明, 采用砂田耕作法, 可在年降水量 200~300 mm 的干旱条件下, 把本来不可利用的水土光热资源转化为可被高效利用的特殊资源, 夺取瓜果粮菜的高产丰收<sup>[3]</sup>。在砂田上种植西瓜不仅品质好, 而且产量和经济效益均高于其他作物。长期以来人们过度追求产量和经济效益, 导致西瓜连作现象普遍, 植株生长不良、死苗、病虫害严重、产量下降等问题逐年显现, 连作障碍突出。研究表明, 引起连作障碍的主要原因之一是连作土壤中微生物多样性下降, 细菌及放线菌数量减少, 土传真菌病害大量繁殖所致<sup>[4]</sup>。土壤微生物和土壤养分作为农田生态系统的重要组成部分, 对土壤功能、生态系统的稳定和自然界元素循环等具有重要的作用<sup>[5]</sup>, 保持微生物的多样性对于土壤质量和安全及农业生产都具有重要意义。目前在生产中已经发现, 作物轮作能减轻连作障碍, 有利于作物生长和提高产量, 并对土壤微生物和酶活性具有重要影响<sup>[6]</sup>。西瓜连作对砂田土壤质量及西瓜产量与品质均有一定的影响, 微生物量碳、氮与土壤养分之间存在一定关联, 西瓜的产量和品质逐年降低<sup>[7]</sup>; 对不同压砂年限荒地土壤微生物区系与土壤理化性状研究后发现, 砂田土壤微生物总数减少, 砂田土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效钾随着种植年限的延长呈下降趋势, 微生物量也减少<sup>[8]</sup>。连作西瓜主要土传病害的发生与根域内微生态失调有关, 土壤中致病真菌类微生物大量繁殖和微生物区系的变化, 是连作障碍的主要原因之一, 如西瓜枯萎病是由尖孢镰刀菌引起的世界性土传病害, 重茬地发病率达 30%~80%, 生产上防治主要依赖化学防治<sup>[9]</sup>。轮作可能比单一栽培耕作更有利于维持土壤微生物的多样性及活性<sup>[10]</sup>。关于砂田的研究目前多集中于土壤的水热变化、作物产量、品质等方面, 关于不同轮作方式对砂田土壤微生物区系及理化性状影响方面的研究较少。

本文对砂田不同轮作模式对土壤微生物区系及理化性状的影响进行了研究, 旨在通过制定合理的轮作模式改善砂田土壤微生态环境, 均衡利用土壤养分, 从而调节土壤微生物区系, 为砂田的可持续发展提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

定点试验位于宁夏中卫市香山乡红圈子村 (105°09'E, 37°02'N), 海拔 1 700 m。地处腾格里沙漠的边缘。年平均降水量为 247.4 mm, 且降水分布不均衡, 集中于 5~9 月; 年均蒸发量 2 100~2 400 mm, 是全国最干旱的地区之一; 年均气温 6.8 °C, 年平均太阳总辐射量 567.09  $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 昼夜温差 12~16 °C, 无霜期 140~170 d。

### 1.2 试验处理

试验地选择西瓜连作 8 年的砂田, 田间试验设置西瓜→花豆、西瓜→辣椒、西瓜→南瓜 3 种轮作模式, 以西瓜连作为对照(CK), 每小区面积为 6 m×10 m=60  $\text{m}^2$ 。随机区组设计, 3 次重复。种植前统一施底肥, 施肥标准为 40  $\text{kg}\cdot667\text{m}^{-2}$  生物有机肥(宁夏中卫市丰盛生物有机复混肥厂生产, 有机质 $\geq 30\%$ , N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  均 $\geq 4\%$ , 有效活性菌含量 0.3 亿个 $\cdot\text{g}^{-1}$ , 腐殖酸、氨基酸、硫、钙、锌、硅、铁、锰、镁和硼等元素 $\geq 30\%$ )。试验于 2011 年 5 月上旬开始种植, 西瓜(品种为“金城 5 号”)、南瓜(品种为“金苹果”)于 5 月 1 日播种, 播种前 1 周在室内进行催芽浸种, 播前用铁锹扒开砂石层, 再用小铁铲疏松土壤并挖 2~3 cm 播种穴, 每穴播 2 粒已经催芽的种子, 然后依次覆盖 2 cm 左右厚的湿润土壤和 5 cm 左右的细砂, 南瓜株行距 200 cm×110 cm、西瓜株行距 50 cm×60 cm, 播种后立即覆盖地膜; 辣椒(品种为“吉星”)于 4 月中旬在温室育苗, 5 月 20 日移栽, 株行距 50 cm×60 cm; 花豆(当地农家品种, 无具体品种名)于 5 月 8 日穴播种植, 每穴点种 3 粒, 株行距为 50 cm×60 cm。所有作物田间管理同周边砂田, 即在作物关键时期补水 2 次, 总量控制在 10  $\text{m}^3\cdot666.7\text{m}^{-2}$  (均按穴补水), 在降水或者补水后及时耙砂并向种植穴内逐渐回填砂石达到蓄水保墒的效果; 在作物全生育期作物行间进行必要的耙砂(除草), 以便于充分接纳雨水和防止水分损耗。

砂田作物收获后[几种作物成熟时期与西瓜基本一致(8月中旬),除南瓜成熟期略长,为充分接纳秋季降水,故将南瓜提前收获],采用土钻法,在每个试验小区内种植行间距 20 cm,取砂层下 0~20 cm 层混合土样 5 个,样品自然风干后供化学性质测定,同时取新鲜土壤于 0~4 °C 保存并于 48 h 内测定微生物量,同时用烘干法测定土壤含水量。

### 1.3 测定指标与方法

采用稀释平板计数法统计微生物数量。细菌用牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌用马丁-孟加拉红培养基,放线菌用改良高氏一号培养基。将涂好平板的培养皿放入 28 °C 的恒温培养箱中,细菌培养 2~3 d,真菌培养 5~7 d,放线菌培养 7~10 d,3 次重复<sup>[11]</sup>。

测定方法:土壤含水量采用烘干法,全氮采用凯氏定氮法,碱解氮用碱解扩散法,全磷用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 钼锑抗比色法,速效磷用 NaHCO<sub>3</sub>-钼锑抗比色法,全钾用 NaOH 熔融-火焰光度法,速效钾用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法,全盐采用电导法,有机质用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 容量法-外加热法,pH 采用电位法<sup>[12]</sup>。

选取目前应用最广泛的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、McIntosh 指数和 Shannon 均匀度指数 4 种群落多样性指数作为研究群落物种数及其个体数和分布均匀程度的综合指标<sup>[13-15]</sup>。

Simpson 多样性指数:

$$D = 1 - \sum P_i^2 = 1 - \sum n_i(n_i - 1) / N(N - 1) \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

McIntosh 多样性指数:

$$D_{mc} = (N - \sqrt{\sum n_i}) / (N - \sqrt{N}) \quad (3)$$

Shannon 均匀度指数:

$$J_{sw} = (-\sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (4)$$

式中,  $n_i$  为第  $i$  个物种的个体数,  $N$  为群落中所有物种的个体数,  $P_i$  为第  $i$  种物种个体数占群体总个体数的比例,  $S$  为物种总数,多样性指数采用 Biodap 软件进行分析。

采用 DPS 7.05 及 Microsoft Office Excel 2003 对试验数据进行方差分析,采用 Duncans 新复极差法进行多重比较、相关分析,采用 Canoco 4.5 进行主成分分析作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 轮作模式对土壤微生物区系的影响

对不同种植方式下土壤微生物区系的变化分析(表 1)可以看出,与连作相比,砂田土壤微生物在轮作模式下的土壤总菌数、细菌、真菌、放线菌及 B/F(细菌/真菌)都有显著变化,总菌数、细菌数量大小顺序为西瓜→南瓜>西瓜→花豆>CK>西瓜→辣椒,真菌数量顺序为 CK>西瓜→南瓜>西瓜→花豆>西瓜→辣椒,放线菌数量顺序为西瓜→花豆>西瓜→辣椒>西瓜→南瓜>CK, B/F 顺序为西瓜→南瓜>西瓜→花豆>西瓜→辣椒>CK;其中西瓜→花豆的总菌数、细菌、放线菌及 B/F 分别比 CK 增加 1.80 倍、1.73 倍、2.21 倍和 12.00 倍,而真菌数下降幅度为 80.00%;西瓜→辣椒的放线菌数与 CK 相比增加显著,真菌数显著小于 CK,总菌数、细菌总数小于 CK,而 B/F 大于 CK,但差异不显著;西瓜→南瓜总菌数、细菌、放线菌及 B/F 分别比 CK 增加 2.51 倍、2.89 倍、0.20 倍和 14.38 倍,而真菌数下降 73.27%。以上几种轮作方式土壤中真菌数量较连作都有显著降低,其中以西瓜→辣椒真菌数降低最为明显。

对不同种植模式下砂田土壤微生物种群结构分析(表 1)表明,土壤微生物总数均以细菌最多

表 1 不同轮作模式下砂田土壤微生物区系和种群组成结构的变化

Table 1 Changes of soil microbial population and community structure in gravel-sand mulched field under different rotation patterns

轮作类型 Rotation pattern	总菌数 Total number [10 <sup>6</sup> (CFU)·g <sup>-1</sup> ]	细菌 Bacteria		真菌 Fungi		放线菌 Actinomyce		细菌/真菌 Bacteria/fungi (10 <sup>3</sup> )
		数量 Number [10 <sup>6</sup> (CFU)·g <sup>-1</sup> ]	比例 Proportion (%)	数量 Number [10 <sup>3</sup> (CFU)·g <sup>-1</sup> ]	比例 Proportion (%)	数量 Number [10 <sup>5</sup> (CFU)·g <sup>-1</sup> ]	比例 Proportion (%)	
西瓜→花豆 Watermelon→kidney bean	3.50±0.81a	2.92±0.89a	83.65	1.07±0.00b	0.03	5.71±1.24a	16.32	2.73±0.83a
西瓜→辣椒 Watermelon→pepper	0.89±0.16b	0.61±0.12b	67.96	0.53±0.37b	0.06	2.85±0.62b	31.98	1.37±0.51ab
西瓜→南瓜 Watermelon→pumpkin	4.39±1.55a	4.17±1.66a	95.09	1.43±0.62b	0.03	2.14±1.07b	4.88	3.23±1.88a
CK	1.25±0.41b	1.07±0.47b	85.35	5.35±2.14a	0.43	1.78±0.62c	14.22	0.21±0.06b

同列不同字母表示差异显著性( $P < 0.05$ ),表 2 同。Different letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same as Table 2.

(67.96%~95.09%), 放线菌次之(4.88%~31.98%), 真菌所占比例最小(0.03%~0.43%)。细菌所占总菌数的比例大小依次为西瓜→南瓜(95.09%)>CK(85.35%)>西瓜→花豆(83.65%)>西瓜→辣椒(67.96%); 放线菌所占的比例与细菌所占比例大小顺序相反, 其中西瓜→辣椒模式放线菌占总菌数比例最大, 达到 31.98%, 西瓜→南瓜模式放线菌占总菌数比例最小, 仅为 4.88%; 3 种轮作模式下的真菌数所占比例(0.03%~0.06%)均小于 CK(0.43%)。

西瓜连作时, 真菌的绝对数量 $[5.35 \times 10^3(\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1})]$ 和相对数量(0.43%)均大于其他 3 种轮作模式, 而 B/F $(0.21 \times 10^3)$ 均小于其他 3 种模式 $(1.37 \times 10^3 \sim 3.23 \times 10^3)$ , 与西瓜连作相比, 花豆、南瓜和辣椒参与轮作后, 可以明显降低真菌数量和比例。西瓜连作时根域病原菌数量上升, 根域微生态系统质量下降, 导致根域内生态失调, 增大发病的几率, 而通过这 3 种轮作均可有效降低土传病害发生概率。

## 2.2 轮作模式对砂田土壤微生物区系多样性指数的影响

根据土壤微生物数量进一步探讨了不同种植模式对土壤微生物群落多样性的影响, 结果表明(表 2): 4 个多样性指数变化趋势表现一致, 大小顺序均为西瓜→辣椒>西瓜→花豆>CK>西瓜→南瓜, 种植辣椒和花豆后, 砂田土壤微生物群落多样性和均匀性

都比连作西瓜高, 而种植南瓜后土壤微生物群落多样性和均匀性都比连作西瓜低; 西瓜→花豆的 4 个指数均略高于 CK, 但未达到显著差异; 西瓜→辣椒的 4 个指数全部高于 CK, 其中 McIntosh 指数与 CK 差异显著, 其他指数与 CK 差异不显著; 西瓜→南瓜的 4 个指数中 Shannon 均匀度指数和 Shannon-Wiener 指数显著小于 CK, 其他 2 个指数与 CK 差异不显著。不同轮作模式与 CK 之间在土壤微生物群落多样性指数上的差异表明, 轮作对砂田土壤微生物群落功能结构方面有一定的影响, 特别是辣椒和花豆加入轮作体系可以提高砂田土壤微生物群落的多样性和均匀性。

## 2.3 轮作模式对砂田土壤理化性状的影响

对不同种植模式砂田土壤理化性状的分析(表 3)可以看出, 3 种轮作方式的土壤含水量都明显低于 CK, 仅为 CK 的 83.51%、81.99%和 91.20%; 西瓜→南瓜的土壤全氮和碱解氮含量显著高于 CK, 而其他 2 种轮作方式的全氮和碱解氮均较 CK 低; 3 种轮作模式中除西瓜→辣椒土壤全磷含量与 CK 差异不显著外, 其余 2 种模式全磷含量均显著高于 CK; 西瓜→南瓜模式土壤全钾含量显著低于 CK, 而西瓜→花豆、西瓜→辣椒全钾含量则显著高于 CK。3 种轮作模式下土壤速效磷含量、速效钾含量均显著高于 CK; 土壤有机碳含量西瓜→辣椒、西瓜→南瓜显著

表 2 不同轮作模式下土壤微生物群落区系多样性指数

Table 2 Changes of soil microbe community diversity indexes in gravel-sand mulched field under different rotation patterns

轮作类型 Rotation pattern	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	McIntosh 指数 McIntosh index	Shannon 指数 Shannon index
西瓜→花豆 Watermelon→kidney bean	0.281a	0.652a	0.153ab	0.412a
西瓜→辣椒 Watermelon→pepper	0.433a	0.906a	0.247a	0.572a
西瓜→南瓜 Watermelon→pumpkin	0.111b	0.312b	0.059b	0.197b
CK	0.267ab	0.645a	0.146b	0.407a

表 3 不同轮作模式下砂田土壤理化性状

Table 3 Soil physicochemical properties in gravel-sand mulched field under different rotation patterns

轮作类型 Rotation pattern	西瓜→花豆 Watermelon→kidney bean	西瓜→辣椒 Watermelon→pepper	西瓜→南瓜 Watermelon→pumpkin	CK
土壤含水量 Water content (%)	12.15±0.17c	11.93±0.33c	13.27±0.38b	14.55±0.25a
全氮 Total nitrogen ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.31±0.04d	0.33±0.04c	0.38±0.03a	0.35±0.03b
全磷 Total phosphorus ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.61±0.04a	0.59±0.02ab	0.61±0.03a	0.53±0.04b
全钾 Total potassium ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	13.99±0.03a	11.98±0.04b	10.03±0.05d	10.67±0.11c
碱解氮 Available nitrogen ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	12.43±0.05c	13.33±1.07c	15.96±0.09a	14.93±0.17b
速效磷 Available phosphorus ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1.42±0.04ab	1.37±0.02b	1.51±0.02a	1.19±0.10c
速效钾 Available potassium ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	156.67±6.33a	103.34±3.08c	124.34±5.98b	75.33±4.34d
有机碳 Organic carbon ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	3.38±0.06c	3.82±0.07b	3.99±0.06a	3.46±0.10c
全盐 Total salt ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.45±0.03b	0.43±0.02b	0.38±0.03c	0.59±0.06a
pH	9.03±0.07b	8.74±0.08c	9.05±0.18b	9.27±0.10a

同行不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) Different letters in the same row indicate significant difference at 0.05 level.

高于 CK, 而西瓜→花豆小于 CK, 但差异不显著; 3 种轮作模式下土壤全盐含量均显著小于 CK; 不同种植方式土壤 pH 也有显著差异, 3 种轮作模式的 pH 高于 CK, 而西瓜→花豆小于 CK, 但差异不显著; 均小于 CK, 其中轮作辣椒的 pH 与连作相差最大, 达 0.53 个单位。

#### 2.4 轮作砂田土壤微生物区系、理化性状的相关分析及主成分分析

对不同种植模式 0~20 cm 砂田土壤微生物区系、理化性状进行相关分析(表 4)表明: 总菌数、细菌数与速效磷、速效钾呈显著正相关; 真菌数与土壤含水量、有机碳、pH 呈显著或极显著正相关, 而与全磷、速效磷、速效钾呈显著或极显著负相关; 放线菌与全钾、速效钾呈极显著正相关, 而与土壤含水量、碱解氮呈显著或极显著负相关。由此可见土壤微生物与土壤大部分理化性状关系密切, 对土壤养分的运转有重要作用, 同时轮作作物对水分吸收的差异, 也影响到土壤微生物的生长和繁殖。全氮在土壤含量比较稳定, 受土壤微生物的影响很小, 真菌与全磷、速效磷、速效钾、有机碳的转化关系密切, 细菌数仅与速效磷、速效钾的转化关系密切, 放线菌数与全钾、碱解氮、速效钾的转化关系密切; 土壤含水量高时, 促进了真菌同时抑制了放线菌的生长和繁殖, pH 高时促进了真菌的生长和繁殖。对砂田土壤微生物群落和理化性状的相关分析表明, 作物对土壤中水分、养分的吸收差异与微生物区系有密切关系。

表 4 不同轮作模式下土壤微生物区系与土壤理化性质的相关系数

Table 4 Correlation analysis between soil microbial population and physicochemical properties

项目 Item	总菌数 Total	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomyce
土壤含水量 Water content	-0.03	0.03	0.80**	-0.63*
全氮 Total nitrogen	0.17	0.23	0.06	-0.51
全磷 Total phosphorus	0.32	0.27	-0.77**	0.52
全钾 Total potassium	-0.002	-0.09	-0.40	0.85**
碱解氮 Available nitrogen	0.21	0.29	0.35	-0.75**
速效磷 Available phosphorus	0.64*	0.62*	-0.76**	0.29
速效钾 Available potassium	0.64*	0.57*	-0.63*	0.76**
有机碳 Organic carbon	-0.50	-0.48	0.68*	-0.19
全盐 Total salt	0.20	0.25	-0.43	-0.49
pH	0.19	0.21	0.68*	-0.22

\*表示  $P < 0.05$  水平显著相关, \*\*表示  $P < 0.01$  水平显著相关。\* indicates significant correlation at 0.05 level, \*\* indicates significant correlation at 0.01 level.

进一步对不同种植模式下 0~20 cm 砂田土壤微生物区系、理化性状进行主成分分析表明, 第 1 主成分方差贡献率最大, 为 53.9%, 加上第 2 主成分的方差贡献率 40%, 其累积方差贡献率达 93.9% (>85%), 说明前 2 个主成分能反映土壤微生物区系和理化性状的变异信息, 即在不同种植模式下, 作物对水分、养分的需求差异导致土壤理化性状的变化和土壤微生物主要组成结构的变化。利用第 1、2 主成分将 4 种植模式划分为 4 个功能(图 1)类群, 4 个处理分别属于不同类型区, 由于各点之间的距离可以代表他们之间的关系, 可以推断与 CK 相似度高低顺序依次为西瓜→南瓜、西瓜→花豆、西瓜→辣椒, 而其中西瓜→南瓜与西瓜→花豆之间又存在较高的相似度, 在选择轮作模式时, 应选择与 CK 相似度较低的作物进行轮作。

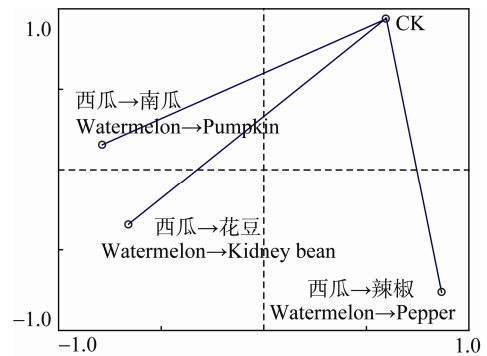


图 1 不同轮作模式的主成分分析

Fig. 1 Principal analysis on different rotation patterns

### 3 讨论与结论

土传病害是引起连作障碍的最主要因子, 其发病机理非常复杂, 至今仍未完全清楚。连作障碍与土壤微生物的种类和数量关系密切, 土壤中致病真菌类微生物种类和数量随着连作年限的增加而增加, 引起微生物区系的变化, 是连作障碍的主要原因之一, 真菌容易引起一些土传病害, 一般认为真菌型土壤是地力衰竭的标志, 真菌数量增加, 意味着病害加重。连作土壤上由于同一类根系分泌物的持续释放, 形成了特定的土壤环境和根际条件, 导致土壤微生物种类与数量变化, 即细菌、放线菌数量下降, 有害真菌数量升高, 微生物区系从“细菌型”土壤向“真菌型”土壤转化。作物连作会使得某些特定的微生物群落得到富集, 特别是植物病原真菌, 影响到土壤中微生物种群的平衡, 加剧植物根部病害的发生, 土壤中病原菌的数量不断增加, 导致土壤微生态环境质量逐年下降, 多样性严重丧失, 影响作物正常的生长发育<sup>[16-19]</sup>。本研究中轮作使土壤中

真菌数量显著降低,其中以西瓜→辣椒对于真菌数降低最为明显,所占总菌数的比例(0.06%)相对连作(0.43%)也有明显降低;放线菌数及B/F均显著增加。轮作与连作相比,更有利于土壤微生态环境的改善,有利于缓解连作障碍。

轮作对作物根系生长和土壤养分吸收的差异,影响到微生物的生长和繁殖,土壤中细菌、真菌及放线菌均有变化。轮作作物能提供给土壤微生物更丰富的营养物质,增加土壤微生物的活性,提高了土壤微生物的群落结构多样性;此外,参与轮作的作物对水分、养分吸收利用存在的差异,改变了土壤微环境,进而引起微生物区系的变化,降低了土传病害发生的概率<sup>[20-22]</sup>。本研究中轮作土壤微生物多样性指数和均匀度指数都与连作土壤有不同程度的差异,种植花豆、辣椒的土壤微生物多样性指数和均匀度指数均高于西瓜连作土壤,种植南瓜的土壤均低于西瓜连作土壤。可能是轮作辣椒(茄科)、花豆(豆科)与西瓜(葫芦科)分属不同的科属,一定程度上为根际土壤中微生物繁殖提供了丰富的能源和碳源,从而影响到土壤微生物种类和数量,进而增加了土壤微生物多样性;而种植南瓜(葫芦科)后,可能由于同科作物轮作,细菌的专一性导致细菌所占的比重较大(95.09%),而放线菌(4.88%)和真菌(0.03%)的比重减少,从而降低了土壤微生物多样性。加之作物对水分、养分吸收存在一定的差异,引起微生物区系的变化,作物对速效磷、速效钾吸收少时,有利于细菌的生长和繁殖;土壤含水量、有机质含量及pH低,土壤全磷、速效磷、速效钾含量高能够一定程度上对真菌的生长和繁殖起到抑制作用,从而减少真菌的绝对数量和比例;土壤含水量低,作物对碱解氮吸收多而对全钾、速效钾吸收少有利于放线菌的生长和繁殖,这与放线菌适宜在含水量低、有机物丰富、呈中性或微碱性的土壤中繁殖的特性相一致。

轮作改变了砂田土壤微生物区系结构,提高了砂田土壤微生物多样性,改变了土壤微生态环境,降低了真菌数量和比例,有利于改善连作障碍。轮作对作物根系生长和对土壤养分吸收的差异,影响微生物的生长和繁殖,土壤中细菌、真菌及放线菌均有变化,真菌数量显著降低,其中以西瓜→辣椒轮作使真菌数降低最为明显,所占总菌数的比例相对连作也有明显降低;放线菌数及B/F均显著增加。轮作可以降低真菌数量(比例),增加放线菌的数量(比例)以及多样性指数,缓解连作病害的发生,改善土壤微生态环境,是一种简单有效的减缓连作障碍的生物学方法。轮作的优势一般维持1~2年<sup>[23-24]</sup>,

本试验只针对轮作1茬作物进行了分析,轮作的效果及持续时间还需进一步研究验证。

## 参考文献

- [1] 许强, 吴宏亮, 康建宏, 等. 旱区砂田肥力演变特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 37-41  
Xu Q, Wu H L, Kang J H, et al. Study on evolution characteristics of sandy-field in arid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 37-41
- [2] 许强, 强力, 吴宏亮, 等. 砂田水热及减尘效应研究[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 180-182  
Xu Q, Qiang L, Wu H L, et al. Study on sandy-field ecosystem effect[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2009, 30(2): 180-182
- [3] 戈敢. 中国压砂田的发展与意义[J]. 农业科学研究, 2009, 30(4): 52-54  
Ge G. The development and importance of pebble mulch in China[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2009, 30(4): 52-54
- [4] 邹莉, 袁晓颖, 李玲, 等. 连作对大豆根部土壤微生物的影响研究[J]. 微生物学杂志, 2005, 25(2): 27-30  
Zou L, Yuan X Y, Li L, et al. Effects continuous cropping on soil microbes on soybean roots[J]. Journal of Microbiology, 2005, 25(2): 27-30
- [5] 郑良永, 胡剑非, 林昌华, 等. 作物连作障碍的产生及防治[J]. 热带农业科学, 2005, 25(2): 58-62  
Zheng L Y, Hu J F, Lin C H, et al. The production of succession cropping obstacles and its prevention and cure steps[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2005, 25(2): 58-62
- [6] 吴凤芝, 王学征. 设施黄瓜连作和轮作中土壤微生物群落多样性的变化及其与产量品质的关系[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2274-2280  
Wu F Z, Wang X Z. Effect of monocropping and rotation on soil microbial community diversity and cucumber yield, quality under protected cultivation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(10): 2274-2280
- [7] 薛亮, 马忠明, 杜少平. 连作对砂田土壤质量及西瓜产量与品质的影响[J]. 甘肃农业科技, 2011(6): 5-8  
Xue L, Ma Z M, Du S P. Effects of watermelon replanting on yield and quality and soil quality of sandy land[J]. Gansu Agr. Sci. and Techn, 2011(6): 5-8
- [8] 胡景田, 马琨, 王占军, 等. 荒地不同压砂年限对土壤微生物区系、酶活性与土壤理化性状的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 53-58  
Hu J T, Ma K, Wang Z J, et al. Effects of gravel mulch on soil microbial population, enzyme activity and physicochemical properties in wasteland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(3): 53-58
- [9] 李双喜, 沈其荣, 郑宪清, 等. 施用微生物有机肥对连作条件下西瓜的生物效应及土壤生物性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(2): 169-174  
Li S X, Shen Q R, Zheng X Q, et al. Effect of organic microbe fertilizer application on watermelon growth and soil microorganisms under continuous mono-cropping[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(2): 169-174

- [10] 钟文辉, 蔡祖聪. 土壤管理措施及环境因素对土壤微生物多样性影响研究进展[J]. 生物多样性, 2004, 12(4): 456-465  
Zhong W H, Cai Z C. Effect of soil management practices and environmental factors on soil microbial diversity: A review[J]. Chinese Biodiversity, 2004, 12(4): 456-465
- [11] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 4-17  
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Method for measuring soil microbial biomass & their application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 4-17
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005: 268-282  
Bao S D. Soil analysis in agricultural chemistry[M]. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 268-282
- [13] 马克平. 生物群落多样性的测度方法. I.  $\alpha$  多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168  
Ma K P. Measurements of biology community diversity. I.  $\alpha$  diversity index (volume one)[J]. Chinese Biodiversity, 1994, 2(3): 162-168
- [14] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法: I  $\alpha$  多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239  
Ma K P, Liu Y M. Measurements of biology community diversity. I.  $\alpha$  diversity index (volume two)[J]. Chinese Biodiversity, 1994, 2(4): 231-239
- [15] Peilou E C. 数学生态学引论[M]. 卢泽愚译. 2 版. 北京: 科学出版社, 1978: 233-250  
Peilou E C. Mathematical ecology [M]. Lu Z Y trans. 2<sup>nd</sup> ed. Beijing: Science Press, 1978: 233-250
- [16] 吴凤芝, 孟立君, 王学征. 设施蔬菜轮作和连作土壤酶活性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 554-558, 564  
Wu F Z, Meng L J, Wang X Z. Soil enzyme activities in vegetable rotation and continuous cropping system of under shed protection[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(4): 554-558, 564
- [17] Guan G, Tu S X, Yang J C, et al. A field study on effects of nitrogen fertilization modes on nutrient uptake, crop yield and soil biological properties in rice-wheat rotation system[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(8): 1254-1261
- [18] 朱丽霞, 张家恩, 刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述[J]. 生态环境, 2003, 12(1): 102-105  
Zhu L X, Zhang J E, Liu W G. Review of studies on interactions between root exudates and rhizospheric microorganisms[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(1): 102-105
- [19] 邵丽, 谷洁, 张社奇, 等. 生物复混肥对土壤微生物群落功能多样性和微生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 746-751  
Shao L, Gu J, Zhang S Q, et al. Effects of bio-compound fertilizer on soil microbial community functional diversity and microbial biomass[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(6): 746-751
- [20] 庄岩, 吴凤芝, 杨阳, 等. 轮套作对黄瓜土壤微生物多样性及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 204-209  
Zhuang Y, Wu F Z, Yang Y, et al. Effect of rotation and interplanting on cucumber yield and soil microbial diversity[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 204-209
- [21] 焦晓丹, 吴凤芝. 土壤微生物多样性研究方法的进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 789-792  
Jiao X D, Wu F Z. Progress of the methods for studying soil microbial diversity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(6): 789-792
- [22] Larkin R P, Hopkins D L, Martin F N. Effect of successive watermelon plantings on *Fusarium oxysporum* and other microorganisms in soils suppressive and conducive to fusarium wilt of watermelon[J]. Phytopathology, 1993, 83(10): 1097-1105
- [23] 吴艳飞, 高丽红, 李红岭, 等. 连作温室夏季不同利用模式对黄瓜产量及土壤环境影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2551-2556  
Wu Y F, Gao L H, Li H L, et al. Effects of different aestival utilization patterns on yield and soil environment in cucumber[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(12): 2551-2556
- [24] Sumner D R, Minton N A, Breneman T B, et al. Root diseases and nematodes in bahiagrass-vegetable rotations[J]. Plant Disease, 1999, 83(1): 55-59