

# 连作西瓜的根际土壤酶活性和微生物多样性

孙正国

(南通农业职业技术学院, 江苏 南通 226007)

**摘 要:**以山东大鹏西瓜基地 0, 3, 9, 15 a 的西瓜根和根际土壤为研究对象, 采用野外调查和实验室分析方法分析连作对西瓜根际土壤酶活性和微生物多样性的影响。结果表明: 随着连作年限的增加, 土壤有机质和氮磷钾含量递减, 连作第 15 年有机质及有效氮磷钾含量最低。在同一生长期, 连作年限越长, 西瓜根系活跃吸收面积和总吸收面积最低, 根际土壤酶活性呈现先递增后下降的趋势, 并且根际土壤酶活力幼苗期 < 抽蔓期 < 结果期。在连作前期土壤中可培养微生物代谢活力递增, 连作后期微生物代谢活力递减, 且连作越久土壤中微生物群落多样性降低, 均匀度先增加后降低。相关性分析表明, 土壤中过氧化氢酶 ( $p < 0.05$ )、磷酸酶 ( $p < 0.05$ )、蔗糖酶 ( $p < 0.01$ )、速效磷 ( $p < 0.05$ )、速效钾 ( $p < 0.05$ ) 与真菌具有正相关性; 脲酶与细菌正相关 ( $p < 0.01$ ), 与碱解氮负相关 ( $p < 0.01$ ); 过氧化氢酶 ( $p < 0.05$ )、碱解氮 ( $p < 0.01$ ) 与放线菌具有显著正相关。综上所述, 连作 0~9 a, 土壤微生物代谢活力和酶活性增强, 养分流失较小; 连作 9 a 后, 土壤养分流失严重, 土壤酶活性和微生物代谢活力显著降低, 产生连作障碍, 说明减少连作年限可使西瓜优质丰产并且可持续发展, 反之影响西瓜正常生长生产, 损害经济效益。

**关键词:** 连作; 西瓜; 土壤养分; 土壤酶活; 根际微生物

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0046-06

## Soil Enzyme Activity and Microbial Diversity in Rhizosphere of Continuous Watermelon Cropping

SUN Zhengguo

(Nantong Agricultural College, Nantong, Jiangsu 226007, China)

**Abstract:** In order to improve the cultivation quality and provide reference for the high yield and excellent quantity and sustainable development of watermelon, the roots and rhizosphere soils with watermelon growths of 0, 3, 9 and 15 years which were marked as CK, CP<sub>3</sub>, CP<sub>9</sub> and CP<sub>15</sub> were collected in Dapeng watermelon base in Shandong Province. Root activity, soil nutrients, soil enzyme activity and rhizosphere microorganisms were measured, and correlation analysis between them was carried out. It turned out that soil organic matter and the contents of nitrogen, phosphorus and potassium were decreasing and nutrients were losing with the duration of continuous cropping, the lowest was found in fifteen year of continuous cropping. At the same growth period, active absorption area and total absorption area of watermelon roots reduced respectively in long term continuous cropping. Rhizosphere soil enzyme activity showed a trend with the increase at first and decline later, and the activity was high in the fruiting period. Soil culturable microbial metabolic activity increased at the early stage of the continuous cropping, microbial metabolic activity reduced at the late stage, and the longer continuous cropping was, the less soil microbial community diversity was, evenness increased at first and reduced later. Correlation analysis showed that the soil catalase ( $p < 0.05$ ), phosphatase ( $p < 0.05$ ), sucrase ( $p < 0.01$ ) and available phosphorus ( $p < 0.05$ ), and available potassium ( $p < 0.05$ ) had the positive correlation with the fungus. Urease had a positive correlation with the bacteria ( $p < 0.01$ ), was negatively related to the alkali solution nitrogen ( $p < 0.01$ ); catalase ( $p < 0.05$ ), alkali solution nitrogen ( $p < 0.01$ ) and actinomycetes had significant positive correlation. To sum up, a few years before continuous cropping, microbial metabolisms and enzyme activity had increased, continuous cropping

obstacles did not occur. After 9 years, soil nutrient loss was serious, microbial metabolisms and enzyme activity significantly reduced, continuous cropping obstacles occurred. Reducing the time of continuous cropping could improve high yield and excellent quantity and sustainable development of watermelon, conversely affected the growth of watermelon, and lowered the economic benefits.

**Keywords:** continuous cropping; watermelon; soil nutrients; soil enzyme activity; rhizosphere microorganisms

西瓜(*Citrullus lanatus*)是深受广大消费者喜爱的水果,也是我国重要的经济作物。一方面,受社会经济和人们栽培习惯以及农村土地联产承包责任制的影响,致使轮作难以实施;另一方面,在经济利益的驱动下,受耕地的限制级生产栽培结构的约束,大棚西瓜连作栽培面积不断扩大,栽培种类单一,造成的各种障碍已成为生产上亟待解决的一大难题<sup>[1-2]</sup>。连作障碍的形成及加剧的原因是复杂多样的,不是由单一因素引起,而是相互关联又相互影响的,是植物—土壤系统内多种因子综合作用的结果<sup>[3-4]</sup>。目前国内关于辣椒<sup>[5-6]</sup>、番茄<sup>[7-9]</sup>、黄瓜<sup>[10-11]</sup>等大棚蔬菜连作障碍的产生及调控方面的研究较多,而西瓜作为一种忌连作但又生产需求大的作物,尤其在大棚种植条件下,其连作障碍的发生严重影响了西瓜生理生长及产出。有少量关于连作对西瓜生长影响的研究报道显示,多年连作会引起西瓜种植地土壤质量下降,影响土壤微生物结构、数量和种类以及土壤酶活等土壤生态环境<sup>[12-15]</sup>,但西瓜对不同连作年限响应的时空变化,尤其是根系活力的变化、对土壤微生物群落特征描述以及解决实际生产问题的报道较少。

为了更系统地找出连作障碍造成西瓜减产的缘由以及更好地解决这一现状,本文在前人的研究基础上更加深入地研究西瓜不同生长时期内不同连作年限西瓜根系活力、根际土壤微生物群落结构以及土壤酶活性与养分等变化,并分析土壤养分、土壤酶活力以及土壤微生物群落之间的相关性。以期揭示短时连作与长时连作的利弊,探明连作对西瓜根生理生长、根际生态环境以及西瓜连作障碍形成机制,进一步为西瓜优质丰产及可持续发展提供可靠的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及样地设置

试验所选西瓜品种为京欣2号(2001年通过北京市农作物品种审定委员会审定,2002年通过全国农作物品种审定委员会审定,京审瓜2001002,国审菜2002047)。试验样地选在享有“西瓜之乡”美誉的山东省济宁市泗水县大鹏西瓜基地,地理位置为东经117°32'3",北纬36°31'6"。分别选取管理模式相似的未连作、3 a连作、9 a连作以及15 a连作的西瓜种植

大棚为试验样地。

### 1.2 试验方法

1.2.1 根际土壤养分特性及酶活的测定 2013年每月中旬采集4个西瓜种植大棚西瓜根际土壤(每个大棚随机选取6个重复采样点),样品袋保存,实验室内用1 mm网筛去除土壤杂质,再分别用20,80目网筛筛选土壤以备后续试验。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化外加热法,土壤全氮用凯氏定氮法,土壤全磷用NaOH熔融—钼锑抗比色法,有效磷采用NaOH-H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>浸提—钼锑抗比色法测定,碱解氮采用NaOH-H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>法测定,速效钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定<sup>[16-20]</sup>。

脲酶活性测定:将采集的新鲜土样去除杂质后,采用苯酚一次氯酸钠比色法<sup>[21-25]</sup>测定脲酶含量,其活性以24 h后1 g土壤中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的毫克数表示。

过氧化氢酶活性测定:采用高锰酸钾容量法<sup>[21-25]</sup>测定,其活性以1 g土壤的0.1 mol/L 1/5 KMnO<sub>4</sub>毫升数表示。

磷酸酶活性测定:采用磷酸苯二钠比色法<sup>[21-25]</sup>测定,其活性以1 g土壤的酚毫克数表示。

蔗糖酶活性测定:采用3,5—二硝基水杨酸比色法<sup>[21-25]</sup>测定,其活性以1 g土壤中还原糖含量表示。

1.2.2 根系活力测定 分别于西瓜生育的幼苗期(育苗3周后)、抽蔓期(开花一周后)和结果期(成熟挂果)根系上随机剪取主根段、次生根及须根上3点少量根,共6个重复,液氮保存。实验室内参考改进的甲基蓝比色光电比色法<sup>[26-27]</sup>测定西瓜根系活力。计算公式如下:

$$W = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:W——根系活跃吸收面积(%);S<sub>1</sub>——根系活跃吸收面积(m<sup>2</sup>);S<sub>2</sub>——根系总的吸收面积(m<sup>2</sup>)。

1.2.3 根际微生物群落特征 微生物数目:土壤中微生物培养采用涂布平板法,先用研钵轻磨土样,于超净工作台内称量1 g土壤,融入5 ml灭菌的0.1 mol/L生理盐水中,在恒温培养箱中37℃环境下,175 r/min震荡培养20 min,然后对土壤悬浮液进行梯度稀释,吸取稀释的土壤悬浮液200 μl均匀涂布到LB固体培养基平板上(每组3个重复),37℃

恒温培养 2~3 d 后计算菌落数目,每克土壤微生物数计算公式<sup>[28]</sup>如下:

$$N=10ns \quad (2)$$

式中:  $N$ ——微生物数目(g);  $n$ ——菌落平均数;  $s$ ——稀释倍数。

群落功能及多样性:土壤微生物群落功能通过 BIOLOG 法<sup>[29-30]</sup>测定微生物代谢能力,取 10 g 烘干土壤,加入 90 ml 无菌的 0.145 mol/L NaCl 溶液,摇床震荡 30 min,样品稀释 1 000 倍,用 BIOLOG 排枪取 100  $\mu$ l 接种于 ECO 板上,初次读数后,于 25℃ 恒温培养,每隔 12 h 于波长 590 nm 的 BIOLOG 仪器上读数,共培养 240 h<sup>[30]</sup>。微生物总体群落功能活性用平均颜色变化率 AWCD 值来表征,计算公式如下:

$$AWCD=\sum_{i=1}^n(C_i-R)/n \quad (3)$$

$$P_i=(C_i-R)/\sum(C_i-R) \quad (4)$$

式中:  $C_i$ ——每个有培养基孔的光密度值;  $R$ ——对照组孔的光密度值;  $n$ ——培养基数据(BIOLOG ECO Plate,  $n=31$ );  $p_i$ ——第  $i$  个有培养基的孔与对照组孔的光度值差和整个平板光密度总差的比值。

微生物群落功能多样性采用 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )和均匀度指数( $E$ )来描述,计算公式如下:

$$H'=-\sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (5)$$

$$P_i=N_i/N \quad (6)$$

$$E=\frac{H'}{\ln S} \quad (7)$$

式中:  $H'$ ——实际观察的物种多样性指数;  $P_i$ ——表示第  $i$  类物种数目占总数目的百分比;  $N_i$ ,  $N$ ——种  $i$  的个体数和所有物种个体数;  $S$ ——群落中的总物种数。

### 1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 16.0 数据分析软件进行数据处理,运用最小显著差数法(LSD)进行显著性分析,用 OriginPro 8.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 根际土壤养分比较

根际土壤中有机质和氮磷钾含量能直观反映土壤营养生态环境的优劣,试验检测了连作 0, 3, 9, 15 a 西瓜根际土壤营养状况。如表 1 所示,连作 0~3 a 内根际土壤有机质、全氮和全磷含量差异不显著( $p>0.05$ ),连作 3 a 以上,土壤养分变化显著,营养减少;而随着连作年限的增加,不同连作年份的西瓜根际土壤中速效磷、速效钾和碱解氮差异极显著( $p<0.05$ ),呈现递减趋势,连作时间越长,土壤养分流失严重,营养状况下降。

表 1 根际土壤养分

试验组	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
CK	58.78±2.12a	8.29±0.43a	3.79±0.13a	561.3±10.73a	246.9±8.72a	145.9±3.31a
CP <sub>3</sub>	57.26±1.98ab	8.02±0.58ab	3.74±0.17a	492.2±9.35b	201.3±7.66b	139.3±4.02b
CP <sub>9</sub>	43.22±2.03c	7.13±0.24c	2.82±0.21b	401.8±9.51c	182.7±8.04c	103.1±2.97c
CP <sub>15</sub>	34.91±1.72d	5.44±0.37d	1.99±0.18c	338.7±8.71d	161.1±6.32d	84.39±3.39d

注:CK, CP<sub>3</sub>, CP<sub>9</sub>, CP<sub>15</sub> 分别表示对照组、连作 3 a、连作 9 a 和连作 15 a,不同小写字母表示在 0.05 水平上显著差异。

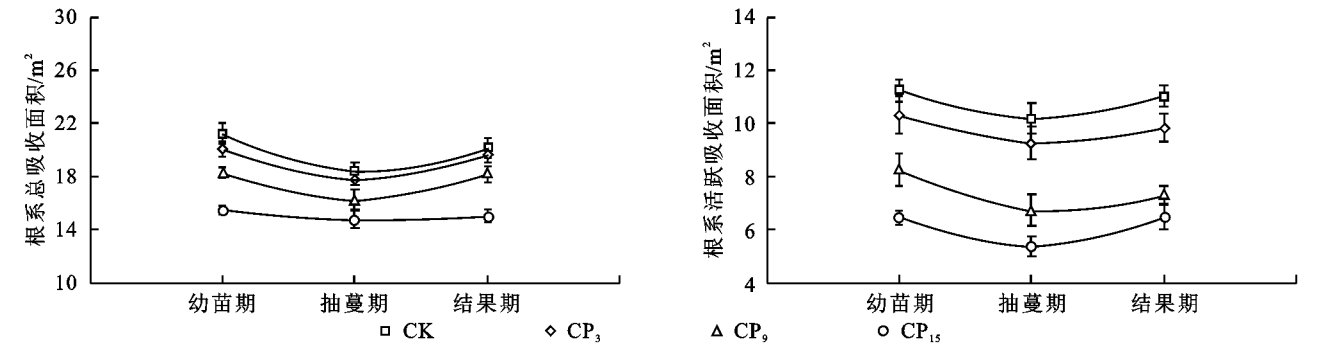
### 2.2 西瓜根系活力测定

为了研究连作对西瓜生理生长的影响,分别检测了西瓜 3 个不同生长发育时期根系活力状况。如图 1 所示,连作时间越长,根系总吸收面积降低,而根系活跃吸收面积降低更为显著,说明西瓜的根系活力为 CK>CP<sub>3</sub>>CP<sub>9</sub>>CP<sub>15</sub>,长期连作显著减弱了西瓜根系活力,其对营养元素的吸收效率降低,从而影响西瓜生长生产。无论短时连作还是长期连作,西瓜根系活力具有先减弱后增强的趋势,在抽蔓期根系活力最低,因结果期需要大量的养分,根系活力的增强,从而对养分的吸收效率增大。

### 2.3 根际土壤酶活性

过氧化氢酶能催化分解土壤中累积的过氧化物,减轻过氧化物对作物的毒害作用,它还与土壤有机质

含量密切相关,脲酶能直接参与土壤中有机氮的转化,磷酸酶能促进土壤中有机磷化合物或无机磷酸盐转化为作物能利用的无机磷,蔗糖酶活性强弱反映土壤肥力水平,对增加土壤中营养物质有重要作用。由图 2 可知,在西瓜生长发育过程中,西瓜对土壤中养分需求增强,土壤中与营养转化有关的过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶及蔗糖酶含量递增,而长期的连作降低了土壤酶活,在连作 0~9 a,土壤中酶活性逐渐增强,而 9~15 a 及 15 a 以上,土壤中酶活性显著降低,总体都呈现先上升后降低的趋势。说明土壤中酶活性与西瓜自身生长发育营养需求具有相关性,短期的连作能在一定程度上增强土壤酶活性,改变土壤理化营养结构,而随着连作年限的增加,这种趋势逐渐减缓甚至减弱,土壤酶活也显著降低。



注:CK,CP<sub>3</sub>,CP<sub>9</sub>,CP<sub>15</sub>分别表示对照组、连作 3 a、连作 9 a 和连作 15 a,下图同。

图 1 根系总吸收面积和活跃吸收面积

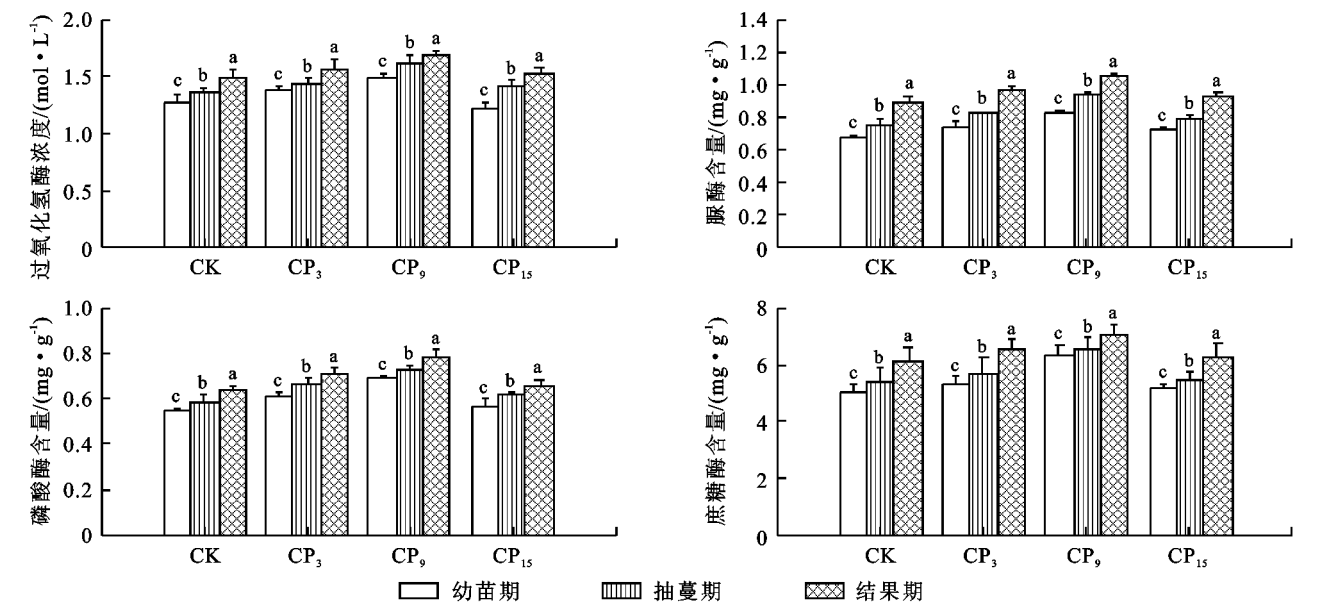


图 2 西瓜根际土壤酶活性

2.4 根际微生物群落特征

碳源平均颜色变化率 AWCD 值表示微生物利用单一碳源的能力,可作为微生物群落整体代谢活性的一个重要指标。如图 3 所示,不同连作年限的土壤可培养微生物群落在前 72 h,碳源利用缓慢,代谢活性上升平缓,72~192 h 内微生物代谢活力呈指数增长,192 h 后增长较为缓慢。而随着连作年限增加,土壤中微生物代谢活力呈现先上升后降低的趋势,CP<sub>9</sub> 代谢活力最大,CP<sub>3</sub> 代谢活力大于 CK,连作 9~15 a 土壤微生物代谢活力降低。如图 4 所示,分析不同连作年限土壤微生物群落多样性发现,随着连作年限增加,土壤微生物群落多样性逐渐降低,长期的连作使西瓜根际土壤微生物群落结构稳定性降低,均匀度有所增加,土壤微生物种类单一化,不利于养分的循环转化以及土壤微生态环境的稳定。

2.5 土壤养分、酶活性与微生物相关性

根际土壤酶来源于植物根系及其残体、土壤动物及其遗骸和各种微生物的分泌活动,其中微生物的分泌活动是酶的主要来源之一,因此土壤酶活性与根际土壤微生物群落特性密切相关。由土壤养分、土壤酶

活性与土壤中主要微生物类群(真菌、细菌和放线菌)相关性分析可知(表 2),土壤中过氧化氢酶、磷酸酶、速效磷和速效钾与土壤真菌呈显著正相关,相关系数分别为 0.723 7,0.832 1,0.740 7,0.719 8;蔗糖酶与土壤中真菌呈极显著正相关,相关系数为 0.991 6;土壤中脲酶与土壤细菌呈显著正相关,相关系数为 0.863 2;而碱解氮与土壤细菌呈显著负相关,相关系数为-0.930 1;土壤中过氧化氢酶与土壤放线菌呈显著正相关,相关系数为 0.710 2;碱解氮与放线菌呈极显著正相关,相关系数为 0.990 3。

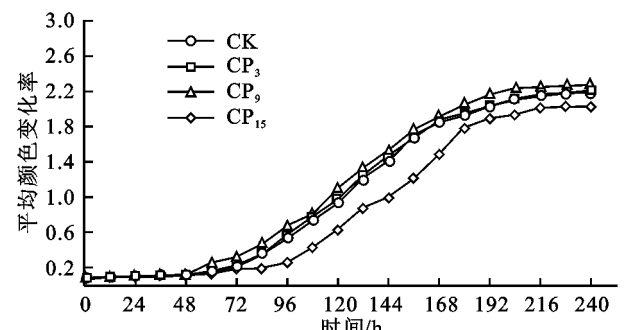


图 3 根际土壤可培养微生物代谢活性

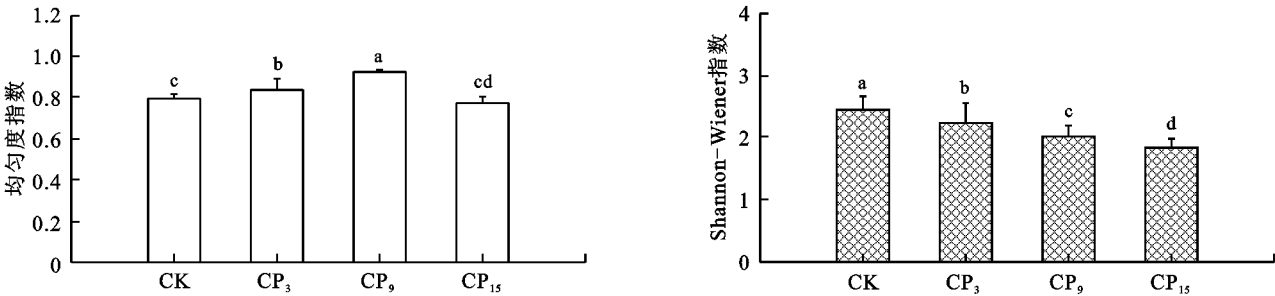


图 4 土壤微生物均匀度指数和 Shannon-Wiener 指数

表 2 土壤养分、酶活性与微生物相关性

微生物	过氧化氢酶	脲酶	磷酸酶	蔗糖酶	有机质	速效钾	碱解氮	速效磷
真菌	0.7237 *	0.0874	0.8321 *	0.9916 **	0.5932	0.7407 *	0.5701	0.7198 *
细菌	0.4329	0.8632 *	0.1492	−0.5602	0.3431	0.4922	−0.9301 *	0.6043
放线菌	0.7102 *	0.3201	0.4573	−0.4981	0.2895	0.3873	0.9903 **	0.5983

注：\* 表示在 0.05 水平上显著差异，\*\* 表示在 0.01 水平上极显著差异。

3 讨论与结论

土壤是陆生作物生产生活的基质,它为作物提供所必须的养分和水分,也是生态系统中物质和能量交换的重要场所,土壤养分的质量直接影响作物的生长<sup>[31-33]</sup>。本研究分别测定不同连作年限的西瓜根际土壤养分,发现在连作前几年西瓜根际土壤养分变化不明显,随着连作年限的延长,西瓜根系土壤有机质和氮磷钾等营养元素失衡,这与赵萌等<sup>[34]</sup>的研究结果类似。而后土壤养分逐渐向表层聚集,造成表土层板结,改变土质结构,理化性质恶化,加速消耗某些营养元素,使养分流失,进而影响西瓜根系对土壤中营养元素的吸收减少,影响西瓜正常的生长发育。

根系活力对西瓜的生长、产量形成以及土壤中养分利用率具有重要的意义<sup>[35]</sup>,根的生长情况和活力水平直接影响作物地上部分的营养状况及生长生产。本研究深入研究了不同连作年限内西瓜幼苗期、抽蔓期和成熟期根系活力(图 1)。不同时期内西瓜根系活力呈现先降低后增高的趋势,这与成熟期挂果需要大量营养有关;在同一生长期,随着连作年限的增加,西瓜根系活力显著降低,根系活力的降低导致植物对养分和水分的吸收,从而影响西瓜优质丰产。

土壤酶活性是反映生物化学过程的重要指标,土壤中的过氧化氢酶等在一定程度上消除过氧化物类的累积<sup>[36-38]</sup>,本研究选取过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶和蔗糖酶为参考指标,0~9 a 短期连作,4 种酶活性都有所增强;连作 9~15 a 土壤中酶活性开始逐渐降低,说明连作 15 a 发生连作障碍,土壤酶活性呈现先上升后下降的趋势,这与赵萌等<sup>[34]</sup>研究相似。本研究也深入比较分析西瓜不同生长发育时期土壤酶活性,发现随着西瓜的生长土壤酶活性逐渐增高,结果期达到最大,

说明土壤酶活性与作物营养生长息息相关。

微生物群落在土壤微生态中发挥着重要的作用,在物质转化中具有特定的功能<sup>[4,39-40]</sup>。本研究中短期连作(0~9 a)促使土壤中微生物代谢活性增强,而在 9~15 a 的连作后期,土壤中营养状况恶化,养分肥力流失严重,土壤中微生物代谢活性逐渐减弱。另一方面,长期连作也显著减弱了土壤中微生物群落结构,使群落多样性降低,微生物数量减少,微生物种类也偏单一化。这也验证了连作前期显著增强土壤酶活性,连作后期障碍显著减弱土壤酶活性的趋势。通过研究不同连作年限对西瓜根系活力、根际微生物及土壤酶活性的影响表明,随着连作年限增加西瓜根系活力逐渐降低,影响根系对土壤中营养元素的吸收,另一方面长期连作导致土壤中有毒物质增多,土壤理化性质改变,土壤酶活性发生改变,从而减弱了土壤中土壤微生物群落的多样性,这与赵萌<sup>[34]</sup>、马云华<sup>[40]</sup>、李春格<sup>[41]</sup>等的研究相似。土壤中微生物的生长发育经常受到来自各方面因素的干扰,如土壤的理化性状,土壤的肥力水平等<sup>[41]</sup>,本文对土壤微生物、养分及土壤酶活性 3 者相关性分析表明,土壤养分、土壤中酶活性与土壤中微生物存在显著相关性,这表明西瓜的优质高产需要土壤养分、根系良好生长、土壤酶活性以及土壤微生物 3 者协调互作,这也为西瓜优质栽培提供一定的科学依据,短时连作能很好地提高土壤微生物及土壤酶活性,改变土壤养分构成,促成根系对土壤营养的吸收,使西瓜生长发育良好,形成可持续发展。反之,一味的连作会减弱并危害土壤一些特性,影响西瓜正常生理生长。虽然本文研究了与连作西瓜息息相关的地下部分生理生态变化,但更应该关注与生产实际相关的地上部分的生理生长过程,这是本研究未来所要研究的方向。

总之,作物的生长生产受到多方面的限制,大量种植易适应且具有较高经济效益的农作物采用连作,有利于充分利用地理、气候等自然资源<sup>[42]</sup>。然而长期的连作往往会造成多种生产上的弊害,例如加重有专一性病原微生物以及寄生性、伴生性害虫的滋生繁殖,也在一定程度上影响土壤理化性质,改变土质结构,加速消耗某些营养元素,致使养分流失。连作还使土壤中不断积累某些有毒的根系分泌物引起连作作物自身“中毒”等。所以为克服连作引起的弊害,建议应将连作年限控制在9 a以下为宜,也可实行(水旱轮作)或在复种轮作中轮换不耐连作的作物,扩大耐连作的作物在轮作中的比重或适当延长其在轮作周期中的连作年数,增施复合化肥,改善土壤特性结构等。这样更能有效地保护和改善连作种植区土壤的微生态环境,更利于农作物的可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 吴凤芝,刘德,王东凯,等. 大鹏番茄不同连作年限对根系活力及其品质的影响[J]. 东北农业大学学报:自然科学版,1997,28(1):33-38.
- [2] 喻景权,杜晓舜. 蔬菜设施栽培可持续发展中的连作障碍问题[J]. 沈阳农业大学学报:自然科学版,2000,31(1):124-126.
- [3] 张晓玲,潘振刚,周晓峰,等. 自毒作用与连作障碍[J]. 土壤通报,2007,38(4):781-784.
- [4] 樊军,郝明德. 长期轮作与施肥对土壤主要微生物类群的影响[J]. 水土保持研究,2003,10(1):88-90.
- [5] 孙继民,邹学校,罗尊长,等. 辣椒连作研究进展[J]. 辣椒杂志,2011,2(1):1-7.
- [6] 袁龙刚,张军林. 辣椒连作障碍的主要原因及其对策[J]. 园林园艺,2006,6(2):32-33.
- [7] 孙艳艳,蔣桂英,刘建国,等. 加工番茄连作对农田土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. 生态学报,2010,30(13):3599-3607.
- [8] 张淑香,高子勤,刘海玲. 连作障碍与根际微生态研究Ⅲ:土壤酚酸物质及其生物学效应[J]. 应用生态学报,2000,13(5):741-744.
- [9] 李威,程智慧,孟焕文,等. 轮作不同蔬菜对大鹏番茄连作基质中微生物与酶及后茬番茄的影响[J]. 园艺学报,2012,39(1):73-80.
- [10] 胡元森,刘亚峰,吴坤,等. 黄瓜连作土壤微生物区系变化研究[J]. 土壤通报,2006,37(1):126-129.
- [11] 王涛,乔卫花,李玉奇,等. 轮作和微生物菌肥对黄瓜连作土壤理化性状及生物活性的影响[J]. 土壤通报,2011,42(3):578-583.
- [12] 吴凤芝,赵凤艳,刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析防治措施[J]. 东北农业大学学报:自然科学版,2000,31(3):241-247.
- [13] 李跃林,彭少麟,李志辉. 桉树人工林地土壤酶活性与微量元素含量的关系[J]. 应用生态学报,2003,14(3):345-348.
- [14] 邱并生. 西瓜连作障碍及其预防[J]. 微生物学通报,2010,37(6):941-943.
- [15] 张子龙,王全文. 植物连作障碍的形成机制及其调控技术研究进展[J]. 生物学杂志,2010,27(5):69-72.
- [16] 鲍士丹. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [17] 陈先茂,彭春瑞,关贤交,等. 红壤旱地不同轮作模式的效益及其对土壤质量的影响[J]. 江西农业学报,2009,21(6):75-77.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [19] Sun D, Walsh D. Review of studies on environmental impacts of recreation and tourism in Australia [J]. Journal of Environmental Management,1998,53(4):323-338.
- [20] Hoh J A. Grazing pressure and soil carbon microbial biomass and enzyme activities in semiarid Northeastern Australia[J]. Applied Soil Ecology,1997,5(2):143-149.
- [21] 曹慧,孙辉,杨浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指标研究[J]. 应用与环境生物学报,2003,9(1):105-109.
- [22] Zhang Y M, Wu N, Zhou G Y, et al. Changes in enzyme activities of spruce (*Picea balfouriana*) forest soil as related to burning in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Applied Soil Ecology,2005,30(3):215-225.
- [23] Selman P C, Hart S C, Boyle S I, et al. Red alder (*Alnus rubra*) alter community-level soil microbial function in conifer forests of the Pacific Northwest, USA[J]. Soil Biology and Biochemistry,2005,37(10):1860-1868.
- [24] 邵玉琴,赵吉. 不同固沙区结皮中微生物生物量和数量的比较研究[J]. 中国沙漠,2004,24(1):68-71.
- [25] 王冬梅,王春枝,韩晓日,等. 长期施肥对棕壤主要酶活性的影响[J]. 土壤通报,2006,37(2):263-268.
- [26] 张志良. 植物生理学试验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [27] 吴凤芝,栾非时,王东凯,等. 大鹏黄瓜连作对根系活力及其根际土壤酶活性影响的研究[J]. 东北农业大学学报:自然科学版,1996,27(3):255-258.
- [28] 高婷,张源沛. 宁夏荒漠草原土壤微生物季节变化的初步研究[J]. 宁夏工程技术,2006,5(3):297-299.
- [29] 杨元根, Paterson E, Campbell C. Biolog 方法在区分城市土壤与农村土壤微生物特性上的应用[J]. 土壤学报,2002,39(4):582-589.
- [30] 张小磊,何宽,安春华,等. 不同土地利用方式对城市土壤活性有机碳的影响:以开封市为例[J]. 生态环境,2006,15(6):1220-1222.
- [31] 陈帅,王效科,逯非. 城市与郊区森林土壤微生物群落特征差异研究[J]. 土壤通报,2012,43(3):614-620.

高,柠条林地次之,白榆林地最少。其中草地各土层平均含水量比柠条林地高0.3%,比白榆林地高3.8%。

(2) 左云县矿区春季不同植被条件下土层基本呈难效水状态,各植被吸收土壤水分受到抑制,若发生连续干旱,该区各植被正常的生长发育易受到不利影响。

(3) 左云县矿区春季不同植被条件下各土层在200—400 cm深度范围都存在土壤干层,有轻度干层、中度干层和重度干层发育。

(4) 左云县矿区春季各不同植被条件下土壤干层减缓了土壤水分的垂直移动性,切断了深层水分与上层的联系。水循环主要是地表水循环,地下水循环基本不存在,形成了土壤—植物—地表径流—大气的水分循环模式,属于异常水分循环类型。

#### 参考文献:

- [1] 马义娟,苏志珠.晋西北地区环境特征与土地荒漠化类型研究[J].水土保持研究,2002,9(3):124-126.
- [2] 林小梅.闽东柳杉人工林林分密度控制图的研究[J].福建林业科技,2002,29(3):75-77.
- [3] 李玉山,黄明斌,杨新民.黄土区渭北旱塬苹果基地对区域水循环的影响[J].地理学报,2001,56(1):7-13.
- [4] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- [5] 赵景波,孙桂贞,岳应利,等.关中平原人工林地的干层及其成因[J].地理研究,2007,26(4):763-772.
- [6] 李瑜琴.西安地区不同降水年份人工林地土壤水分变化研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(1):143-147.
- [7] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- [8] 赵景波,祁子云,魏君平,等.青海湖北土壤水分分布与

土壤干层恢复[J].地理科学进展,2012,31(7):853-858.

- [9] 张建军,张岩,张波.晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J].林业科学,2009,45(11):63-69.
- [10] 孙贵贞,赵景波.咸阳长武人工植被春季土壤含水量研究[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2008,36(2):97-101.
- [11] 牛俊杰,赵景波,王尚义.论山西褐土区农田土壤干燥化问题[J].地理研究,2008,27(3):519-526.
- [12] 周萍,刘国彬,文安邦,等.黄土丘陵区不同林龄乔灌木地土壤水分及持水性能研究[J].水土保持研究,2010,17(1):188-193.
- [13] 李广文,孙虎,肖军.不同景观植被类型下土壤含水量对比研究:以西安南郊为例[J].安徽农业科学,2006,34(1):110-111.
- [14] 赵景波,牛俊杰,杜娟,等.咸阳市三原县新庄不同植被土层含水量研究[J].地理科学,2008,28(2):247-252.
- [15] 陈海滨,刘淑明,党坤良,等.黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(Ⅱ):土壤水分有效性及其亏缺状况的分析[J].西北林学院学报,2004,19(1):5-8.
- [16] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2002.
- [17] 王力,邵明安,张青峰.陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征[J].应用生态学报,2004,15(3):436-442.
- [18] 杨维西.试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J].林业科学,1996,32(1):78-85.
- [19] 王力,邵明安,侯庆春.土壤干层量化指标初探[J].水土保持学报,2000,14(4):87-90.
- [20] 王力,邵明安,侯庆春.延安试区土壤干层现状分析[J].水土保持通报,2000,20(3):35-37.
- [21] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤干层的分布特征[J].自然资源学报,2003,18(1):30-36.

(上接第51页)

- [32] 陈慧,郝慧荣,熊君,等.地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2007,18(12):2755-2759.
- [33] 何跃军,钟章成,刘济明,等.石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J].应用生态学报,2005,16(6):1077-1081.
- [34] 赵萌,李敏,王森焱,等.西瓜连作对土壤主要微生物类群和土壤酶活性的影响[J].微生物学通报,2008,35(8):1251-1254.
- [35] 郭士伟,夏士健,朱虹霞,等.水稻根系活力测定方法及超级稻两优九生育后期根系活力研究[J].土壤,2012,44(2):308-311.
- [36] Yao H Y, Jiao X D, Wu F Z. Effects of continuous cucumber cropping and alternative rotations under pro-

tected cultivation on soil microbial community diversity[J]. Plant and Soil, 2006, 284(1):195-203.

- [37] 彭令发,郝明德,来璐.黄土旱塬长期连作条件下土壤氮素变化及管理[J].水土保持研究,2003,10(1):43-45.
- [38] 樊军,郝明德,王永功.旱地长期轮作施肥对土壤肥力影响的定位研究[J].水土保持研究,2003,10(1):31-36.
- [39] 黄益宗,冯宗炜,张福珠.化感物质对土壤硝化反应影响的研究[J].土壤与环境,1999,8(3):203-207.
- [40] 马云华,魏琨,王秀峰.日光温室连作黄瓜根区微生物区系及酶活性的变化[J].应用生态学报,2004,15(6):1005-1008.
- [41] 李春格,李晓鸣,王敬国.大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响[J].生态学报,2006,26(4):1144-1150.
- [42] 危锋,郝明德.长期氮磷化肥配施对不同种植体系土壤水分的影响[J].水土保持研究,2011,18(6):67-70.