

# 塔里木河上游典型绿洲连作棉田土壤酶活性 与其理化性质的相关性分析

贡璐<sup>1,2</sup>, 冉启洋<sup>1,2</sup>, 韩丽<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:**以新疆塔里木河上游阿拉尔垦区连作棉田为典型样区,采集了 0—20 cm 表层的不同年限连作棉田的土样,分析了 5 种土壤酶活性和 7 种土壤理化性质,并结合通径分析讨论了各因子之间的关系。结果表明,不同耕作年限棉田土壤酶活性和理化性质差异性显著。通径分析显示全氮是影响该地区土壤酶活性的直接主导因子,pH 值对土壤酶活性存在极显著负效应。土壤有机质、速效磷、速效钾以及土壤水分间接作用于土壤酶活性。土壤容重可能不是影响该地区土壤酶活性的主要因素。

**关键词:**土壤酶;连作棉田;绿洲;塔里木河上游;通径分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)04-0036-07

中图分类号: S154.2

## Enzymatic Activities and Related Physicochemical Properties in Soils of Continuous Cropping Cotton Fields Within a Typical Oasis in Upper Reaches of Tarim River

GONG Lu<sup>1,2\*</sup>, RAN Qi-yang<sup>1,2</sup>, HAN Li<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

**Abstract:** Soil samples were collected at depth of 0—20 cm from a number of continuous cropping cotton fields across the Aler reclamation area of the upper reaches of the Tarim River. Five soil enzymatic activities and seven soil physicochemical properties were analyzed and their relationships were investigated using path analysis. The results showed that the enzymatic and physicochemical properties differed significantly between the continuous cropping cotton fields of various ages. Path analysis showed that soil enzymatic activities were mainly affected by total nitrogen in the soil and were significantly negatively correlated with soil pH value. The other factors such as soil organic matter, available P, available K and soil moisture indirectly influenced the enzymatic activities. Soil bulk density was found irrelevant with enzymatic activities.

**Keywords:** soil enzyme; continuous cropping cotton field; oasis; upper reaches of the Tarim River; path analysis

土壤代谢的基础是土壤酶催化反应,它参与土壤中一切复杂的生物化学过程,在土壤乃至整个陆地生态系统中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。作为土壤的重要组成部分,土壤酶与土壤理化性质之间具有较好的关联性,可以反映土壤生物化学过程的方向和强度,对土壤理化性质和肥力状况有着重要的影响<sup>[2-4]</sup>。国内外众多学者从不同角度对土壤酶活性及理化因子之间的关系进行了深入研究<sup>[5-8]</sup>。他们以森林、果园、草地、农田等不同生态系统为对象,涉及平原、山区、丘陵等地貌单元<sup>[9-18]</sup>,而对于干旱区的绿洲农业系统的研究较少报道<sup>[19]</sup>。

农业土壤是在各种自然和人为因素影响下形成和发展的复杂且特殊的有机体,尤其垦殖多年的农业土壤,在内因外因综合作用下,易发生及其复杂的变化。开展农田生态系统中土壤酶与理化因子相互关系的研究,有助于更好地揭示土壤性状间的因果关系,为农业土壤的保育和人工调控提供科学依据。阿拉尔垦区位于新疆塔里木河上游,绿洲作为典型干旱区隐域性地理单元,是当地人民生产生活的重要载体。农田是该区最主要的土地利用方式。由棉花带来的“显性”经济效益的日益凸显,大面积棉花长期连作成为该地区最主要的种植方式<sup>[10]</sup>。在这种不合理

收稿日期:2012-03-05

修回日期:2012-03-21

资助项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金“阿克苏绿洲土壤酶学指标对土壤质量的指示研究”(2011211B04);国家自然科学基金项目“绿洲土壤酶学指标对土壤质量的指示研究”(31160127)

作者简介:贡璐(1978—),女(汉族),江苏省丹阳市人,博士(后),副教授,研究方向为干旱区资源与环境。E-mail:gonglu721@163.com。

的土地利用方式下,棉花对土壤养分的长期选择性吸收,导致土壤养分失衡,土壤质量不断退化,土壤贫瘠化、沙化、盐碱化的现状愈发严重。

本研究以新疆塔里木河上游阿拉尔垦区为例,在分析不同连作棉田土壤酶活性及理化性质分异规律的基础上,运用通径分析的方法研究了棉田土壤酶活性与理化性质的相关性,以期进一步理解土壤酶与其他因子之间的复杂关系,为该地区农业土地规划和生态环境保护提供依据。

## 1 研究区概况

阿拉尔垦区位于新疆维吾尔自治区塔里木河上游,阿克苏地区中南部,地处天山中段南麓,塔里木盆地北缘。位于东经  $80^{\circ}30'$ — $81^{\circ}58'$ ,北纬  $40^{\circ}22'$ — $40^{\circ}57'$ 。海拔平均 1 000 m 左右,属大陆性暖温带、极端干旱沙漠性气候。降水稀少,蒸发强烈,温差大,日照时间长,光热资源丰富。年平均气温在  $10.6^{\circ}\text{C}$ — $11.5^{\circ}\text{C}$ 。日照时数在 3 000 h 左右,多年平均降水量为 17.4~42.8 mm,蒸发量 1 125~1 600 mm。该地区属于典型的荒漠—绿洲型生态系统,土壤形成比较简单,除风沙土外,主要为水成型土壤,土壤母质以棕漠土为主,是我国重要的棉花生产基地。自 20 世纪 50 年代以来,随着人类活动的不断加剧和水资源的无序开发利用,导致绿洲生态系统严重受损,农业生产受到极大威胁,成为我国西部干旱区水资源利用与生态环境问题最为突出的地区之一<sup>[20]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与取样

以研究区内所属农一师十二团的 3, 8, 12, 20, 30 a 连作棉田为研究对象,采样时间为 2008 年 8 月,每种类型选择 5 个样地,每块样地面积约  $0.15\text{ hm}^2$ ,采集表层土样(0—20 cm),设置 3 次重复,将 3 次重复的土样去除植物根系和石块,充分混匀并用四分法取 1 kg,混匀、风干、研磨、过筛以供测定。以上样地海拔均在 998~1 003 m,地理位置相近,土壤性质均一,灌溉施肥方式相同。样区耕作方式为传统耕作,灌溉与施肥由当地兵团统筹管理。灌溉方式为滴灌,前次灌溉时间为 2008 年 7 月上旬;棉田施肥主要包括尿素、磷酸二胺、硫酸钾及复合肥等。

### 2.2 土壤酶活性及土壤理化性质的测定

研究区盐碱胁迫严重,土壤养分含量低<sup>[13]</sup>。因此,根据当地实际土壤状况,选择与盐碱胁迫相关的过氧化氢酶,与 N、P 物质循环有关的脲酶、磷酸酶以及土壤有机碳相关的多酚氧化酶、转化酶作为土壤

酶指标,同时选择相关的土壤理化指标。

土壤酶活性测定指标包括过氧化氢酶( $y_1$ )、多酚氧化酶( $y_2$ )以及水解酶类的碱性磷酸酶( $y_3$ )、脲酶( $y_4$ )、转化酶( $y_5$ )。过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,活性单位为 ml/g;多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法,活性单位为 mg/g;脲酶采用苯酚钠比色法,活性单位为 mg/g;转化酶活性采用硫代硫酸钠滴定法,活性单位为 ml/g;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,活性单位为 mg/g。土壤理化性质测定指标包括土壤含水量( $x_1$ )、容重( $x_2$ )、pH 值( $x_3$ )、有机质( $x_4$ )、全氮( $x_5$ )、速效磷( $x_6$ )、速效钾( $x_7$ )<sup>[4]</sup>,具体实验方法见文献[10]。

### 2.3 数据处理

采用 SAS 8.0 开展数据统计分析:在数据正态分布检验、数据转换的基础上,计算均值( $n=5$ )和标准差(SD),结合单因素方差分析中的 LSD 法进行不同连作年限棉田土壤质量评价指标的差异显著性多重比较,差异显著性水平为  $\alpha=0.05$ ;建立土壤酶活性与理化因子的多元线性回归方程并完成显著性检验;利用通径分析方法计算理化因子对土壤酶活性的直接、间接通径系数和决定系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同连作年限棉田土壤酶活性与理化性质

连作棉田土壤酶活性随耕作年限呈现逐渐升高后稳定或降低的趋势。过氧化氢酶、脲酶、转化酶、磷酸酶活性的最小值均出现在 3 a 棉田,分别为  $(4.33 \pm 0.676)$ ,  $(0.26 \pm 0.006)$ ,  $(1.67 \pm 0.057)$ ,  $(0.11 \pm 0.010)$  mg/g,多酚氧化酶活性出现在 30 a 棉田,低至  $(0.56 \pm 0.132)$  mg/g;过氧化氢酶活性的最大值出现在 8 a 棉田,高达  $(12.75 \pm 0.492)$  ml/g,多酚氧化酶、脲酶、转化酶、磷酸酶基本出现在 12 a 棉田,分别为  $(1.18 \pm 0.038)$ ,  $(0.47 \pm 0.015)$ ,  $(4.18 \pm 0.130)$ ,  $(0.21 \pm 0.011)$  mg/g。不同连作年限棉田中土壤酶活性存在不同程度的差异性:8, 12, 20, 30 a 这 4 个年限棉田过氧化氢酶无显著性差异,但均与 3 a 棉田差异显著;多酚氧化酶、转化酶和磷酸酶在各年限间差异性显著,由 3 a 棉田升至 12 a 达到极值,之后逐渐减低;脲酶活性耕作至 12 a 后趋于稳定,后 3 个年限无显著性差异。

不同连作年限棉田土壤理化性质的分异规律有所差异:各年限棉田土壤水分存在显著性差异,随着连作年限增加呈先升高后降低的趋势,其中 12 a 棉田土壤水分最高,为  $(26.91 \pm 2.212)\%$ ;与土壤水分变化相反,容重随着棉田连作年限的增加表现为先降

低后增加的趋势,变化幅度相对较小,8 a 棉田达到最低值( $1.27 \pm 0.028$ )  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;土壤 pH 值达 8.0 以上,偏碱性,随土壤耕作年限的增加逐渐降低;土壤有机质和全氮变化趋势完全一致,随年限先增后减,差异

性较为显著,在 12 a 分别达到( $8.53 \pm 1.226$ )  $\text{g}/\text{kg}$ , ( $0.41 \pm 0.02$ )  $\text{g}/\text{kg}$  的峰值;土壤速效磷、速效钾则相对变化较小,除 3 a 棉田外,其他不同耕作年限间不存在显著性差异(表 1)。

表 1 不同连作年限棉田土壤酶活性与土壤理化性质

连作年限	3 a	8 a	12 a	20 a	30 a
过氧化氢酶/ $(\text{ml} \cdot \text{g}^{-1})$	$4.33 \pm 0.68^b$	$12.75 \pm 0.49^a$	$12.73 \pm 0.34^a$	$12.59 \pm 0.74^a$	$12.61 \pm 0.72^a$
多酚氧化酶/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$0.69 \pm 0.02^c$	$0.97 \pm 0.09^b$	$1.18 \pm 0.04^a$	$1.14 \pm 0.09^a$	$0.56 \pm 0.13^d$
脲酶/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$0.26 \pm 0.01^c$	$0.39 \pm 0.02^b$	$0.47 \pm 0.02^a$	$0.47 \pm 0.02^a$	$0.45 \pm 0.03^a$
转化酶/ $(\text{ml} \cdot \text{g}^{-1})$	$1.67 \pm 0.06^d$	$3.64 \pm 0.39^b$	$4.18 \pm 0.13^a$	$3.94 \pm 0.18^a$	$3.22 \pm 0.16^c$
磷酸酶/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$0.11 \pm 0.01^d$	$0.21 \pm 0.01^a$	$0.21 \pm 0.01^a$	$0.19 \pm 0.01^b$	$0.15 \pm 0.01^c$
土壤水分/%	$20.81 \pm 1.79^{cd}$	$23.60 \pm 2.53^{bc}$	$26.91 \pm 2.21^a$	$25.74 \pm 2.66^{ab}$	$20.62 \pm 1.98^d$
容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$1.38 \pm 0.06^a$	$1.27 \pm 0.03^c$	$1.27 \pm 0.02^c$	$1.31 \pm 0.02^{bc}$	$1.33 \pm 0.03^b$
pH 值	$8.39 \pm 0.13^a$	$8.15 \pm 0.17^{bc}$	$8.20 \pm 0.08^b$	$8.04 \pm 0.12^c$	$8.06 \pm 0.05^{bc}$
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$2.24 \pm 0.58^c$	$7.73 \pm 0.92^a$	$8.53 \pm 1.23^a$	$3.92 \pm 0.71^b$	$2.79 \pm 0.35^c$
全氮/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$0.25 \pm 0.03^d$	$0.40 \pm 0.02^a$	$0.41 \pm 0.02^a$	$0.33 \pm 0.02^b$	$0.29 \pm 0.03^c$
速效磷/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$21.18 \pm 2.52^b$	$27.40 \pm 1.57^a$	$26.72 \pm 2.87^a$	$28.26 \pm 2.27^a$	$27.66 \pm 1.74^a$
速效钾/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$138.72 \pm 4.98^b$	$153.30 \pm 8.74^a$	$154.42 \pm 5.33^a$	$148.56 \pm 5.34^a$	$152.70 \pm 4.37^a$

注:表中同一指标数据后±数值表示标准差,不同字母表示在  $\alpha=0.05$  水平差异显著; $n=5$ 。

### 3.2 土壤酶活性与理化性质之间的通径分析

3.2.1 土壤酶活性和土壤理化性质典型相关分析  
将土壤 5 种酶活性〔过氧化氢酶( $y_1$ )、多酚氧化酶( $y_2$ )、磷酸酶( $y_3$ )、脲酶( $y_4$ )、转化酶( $y_5$ )〕与 7 种土壤理化因子〔土壤含水量( $x_1$ )、土壤容重( $x_2$ )、pH 值( $x_3$ )、土壤有机质( $x_4$ )、全氮( $x_5$ )、速效磷( $x_6$ )和速效钾( $x_7$ )〕进行典型相关分析(表 2)。土壤酶活性与理

化性质之间相关关系表现为:容重和 pH 值对土壤酶活性表现为负效应,土壤水分、有机质、全氮、速效磷和速效钾对土壤活性表现为正效应,且均存在显著相关关系( $p < 0.01$ )。用典型相关分析得出的土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系较为单一,结论简单。为了能更加深入和清晰地掌握土壤中各理化性质对土壤酶活性的影响,进行如下通径分析。

表 2 土壤酶活性与土壤理化性质的相关系数

项目	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$
$x_1$	1	$-0.543^{**}$	$-0.571^{**}$	$0.588^{**}$	$0.599^{**}$	$0.736^{**}$	$0.610^{**}$	$0.674^{**}$	$0.817^{**}$	$0.759^{**}$	$0.809^{**}$	$0.792^{**}$
$x_2$		1	$0.511^{**}$	$-0.725^{**}$	$-0.831^{**}$	$-0.475^{**}$	$-0.517^{**}$	$-0.666^{**}$	$-0.596^{**}$	$-0.550^{**}$	$-0.668^{**}$	$-0.744^{**}$
$x_3$			1	$-0.288$	$-0.354$	$-0.803^{**}$	$-0.572^{**}$	$-0.782^{**}$	$-0.501^{**}$	$-0.843^{**}$	$-0.766^{**}$	$-0.654^{**}$
$x_4$				1	$0.900^{**}$	$0.404^*$	$0.530^{**}$	$0.603^{**}$	$0.680^{**}$	$0.478^{**}$	$0.636^{**}$	$0.807^{**}$
$x_5$					1	$0.455^*$	$0.511^{**}$	$0.680^{**}$	$0.741^{**}$	$0.544^{**}$	$0.711^{**}$	$0.841^{**}$
$x_6$						1	$0.703^{**}$	$0.775^{**}$	$0.636^{**}$	$0.900^{**}$	$0.878^{**}$	$0.717^{**}$
$x_7$							1	$0.773^{**}$	$0.514^{**}$	$0.754^{**}$	$0.801^{**}$	$0.729^{**}$
$y_1$								1	$0.632^{**}$	$0.911^{**}$	$0.919^{**}$	$0.871^{**}$
$y_2$									1	$0.688^{**}$	$0.807^{**}$	$0.831^{**}$
$y_3$										1	$0.947^{**}$	$0.798^{**}$
$y_4$											1	$0.908^{**}$
$y_5$												1

注: \* 表示 0.05 水平显著, \*\* 表示 0.01 水平显著;相关系数为 Pearson 相关系数; $n=5$ 。

3.2.2 直接和间接通径系数 将土壤酶活性与土壤理化性质的测定结果做标准化处理,并进行逐步多元回归分析,得到标准多元回归方程(表 3)。

过氧化氢酶( $y_1$ )、多酚氧化酶( $y_2$ )、脲酶( $y_3$ )、

转化酶活性( $y_4$ )和磷酸酶( $y_5$ )活性与土壤理化性质的多元线性回归方程均达显著性水平( $p < 0.01$ ),自变量  $x_1 - x_7$  可以分别解释 86.3%, 78.6%, 90.6%, 94.3% 和 92.1% 的  $y_1 - y_5$  变化,误差分别为 13.7%,

21.4%, 9.4%, 5.7%, 7.9%。回归方程中的系数即为直接途径系数,它乘以各因子之间的相关系数(表

2)就得到间接途径系数(见表 4)。各土壤理化性质途径分析的决定系数见表 5。

表 3 土壤酶关于土壤理化性质的多元线性回归分析

回归方程	F 值	p 值	R <sup>2</sup>
$y_1 = 2.8E(-7) - 0.006x_1 + 0.134x_2 - 0.498x_3 - 0.101x_4 + 0.540x_5 - 0.000x_6 + 0.342x_7$	19.82	<0.01	0.863
$y_2 = -8E(-7) + 0.549x_1 + 0.207x_2 - 0.097x_3 - 0.046x_4 + 0.615x_5 + 0.064x_6 - 0.104x_7$	11.56	<0.01	0.786
$y_3 = -3.4E(-7) + 0.156x_1 + 0.154x_2 - 0.400x_3 + 0.125x_4 + 0.309x_5 + 0.303x_6 + 0.207x_7$	30.41	<0.01	0.906
$y_4 = -7.5E(-7) + 0.166x_1 + 0.102x_2 - 0.217x_3 - 0.126x_4 + 0.473x_5 + 0.288x_6 + 0.250x_7$	52.29	<0.01	0.943
$y_5 = -1E(-6) + 0.222x_1 + 0.127x_2 - 0.309x_3 + 0.171x_4 + 0.480x_5 - 0.049x_6 + 0.180x_7$	36.83	<0.01	0.921

表 4 土壤酶活性与土壤理化性质的途径系数

因变量	自变量	途径系数							总和
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	
过氧化氢酶	$x_1$	<u>-0.006 1</u>	-0.072 6	0.284 4	-0.063 3	0.323 4	-0.000 1	0.208 7	0.680 5
	$x_2$	0.003 3	<u>0.133 6</u>	-0.254 7	0.078 0	-0.448 8	-0.000 1	-0.177 1	-0.802 7
	$x_3$	0.003 5	0.068 3	<u>-0.498 1</u>	0.031 0	-0.191 1	0.000 1	-0.195 7	-0.283 9
	$x_4$	-0.003 6	-0.096 8	0.143 5	<u>-0.107 7</u>	0.486 4	-0.000 1	0.181 4	0.710 8
	$x_5$	-0.003 7	-0.111 0	0.176 3	-0.097 0	<u>0.540 1</u>	-0.000 1	0.175 0	0.139 6
	$x_6$	-0.004 5	-0.063 4	0.400 1	-0.043 5	0.245 8	<u>-0.000 2</u>	0.240 7	0.775 2
	$x_7$	-0.003 7	-0.069 1	0.284 8	-0.057 1	0.276 1	-0.000 1	<u>0.342 3</u>	0.430 9
多酚氧化酶	$x_1$	<u>0.549 2</u>	-0.112 1	0.055 4	-0.026 8	0.368 1	0.046 9	-0.063 6	0.268 0
	$x_2$	-0.298 3	<u>0.206 5</u>	-0.049 6	0.033 0	-0.510 9	0.046 9	0.053 9	-0.724 9
	$x_3$	-0.313 5	0.105 6	<u>-0.097 1</u>	0.013 1	-0.217 6	-0.051 2	0.059 6	-0.404 1
	$x_4$	0.322 8	-0.149 6	0.028 0	<u>-0.045 6</u>	0.553 7	0.025 7	-0.055 2	0.725 4
	$x_5$	0.328 8	-0.171 5	0.034 4	-0.041 0	<u>0.614 9</u>	0.029 0	-0.053 3	0.126 3
	$x_6$	0.404 4	-0.098 0	0.078 0	-0.018 4	0.279 8	<u>0.063 8</u>	-0.073 3	0.572 5
	$x_7$	0.334 9	-0.106 8	0.055 5	-0.024 1	0.314 4	0.044 8	<u>-0.104 2</u>	0.618 6
脲酶	$x_1$	<u>0.155 7</u>	-0.083 8	0.227 7	-0.074 9	0.185 1	0.223 3	0.126 4	0.603 7
	$x_2$	-0.084 5	<u>0.154 4</u>	-0.203 9	0.092 3	-0.256 9	0.223 3	-0.107 2	-0.337 0
	$x_3$	-0.088 9	0.078 9	<u>-0.398 8</u>	0.036 7	-0.109 4	-0.243 5	-0.118 5	-0.444 7
	$x_4$	0.091 5	-0.111 8	0.114 9	<u>-0.127 4</u>	0.278 4	0.122 4	0.109 8	0.605 1
	$x_5$	0.093 2	-0.128 2	0.141 1	-0.114 7	<u>0.309 2</u>	0.138 0	0.105 9	0.235 3
	$x_6$	0.114 6	-0.073 3	0.320 3	-0.051 4	0.140 7	<u>0.303 2</u>	0.145 7	0.596 7
	$x_7$	0.094 9	-0.079 9	0.228 0	-0.067 5	0.158 1	0.213 2	<u>0.207 2</u>	0.546 9
转化酶	$x_1$	<u>0.166 1</u>	-0.055 2	0.124 2	-0.073 8	0.283 3	0.212 2	0.152 5	0.643 3
	$x_2$	-0.090 2	<u>0.101 7</u>	-0.111 3	0.091 0	-0.393 2	0.212 2	-0.129 4	-0.420 8
	$x_3$	-0.094 9	0.052 0	<u>-0.217 6</u>	0.036 2	-0.167 5	-0.231 5	-0.143 0	-0.548 6
	$x_4$	0.097 7	-0.073 7	0.062 7	<u>-0.125 6</u>	0.426 1	0.116 3	0.132 6	0.761 7
	$x_5$	0.099 5	-0.084 5	0.077 0	-0.113 1	<u>0.473 2</u>	0.131 2	0.127 9	0.237 9
	$x_6$	0.122 3	-0.048 3	0.174 8	-0.050 7	0.215 4	<u>0.288 2</u>	0.175 9	0.589 4
	$x_7$	0.101 3	-0.052 6	0.124 4	-0.066 6	0.241 9	0.202 7	<u>0.250 2</u>	0.551 2
磷酸酶	$x_1$	<u>0.222 2</u>	-0.069 1	0.176 4	0.100 6	0.287 3	-0.035 8	0.110 0	0.569 4
	$x_2$	-0.120 7	<u>0.127 2</u>	-0.158 0	-0.124 0	-0.398 7	-0.035 8	-0.093 3	-0.930 4
	$x_3$	-0.126 9	0.065 0	<u>-0.308 9</u>	-0.049 3	-0.169 8	0.039 0	-0.103 1	-0.345 1
	$x_4$	0.130 6	-0.092 1	0.089 0	<u>0.171 1</u>	0.432 1	-0.019 6	0.095 6	0.635 6
	$x_5$	0.133 0	-0.105 6	0.109 3	0.154 1	<u>0.479 9</u>	-0.022 1	0.092 2	0.360 9
	$x_6$	0.163 6	-0.060 4	0.248 1	0.069 1	0.218 4	<u>-0.048 6</u>	0.126 9	0.765 7
	$x_7$	0.135 5	-0.065 8	0.176 6	0.090 7	0.245 3	-0.034 2	<u>0.180 4</u>	0.548 2

注:下划横线的数据为直接途径系数,其他为间接途径系数。

直接途径系数反映各主要土壤理化因子对土壤酶活性直接影响作用的大小,而间接途径系数反映了某一理化因子通过作用于其他因子对土壤酶活性产生的间接影响程度,这种影响力更具客观性,因而也更具真实表现力<sup>[21-23]</sup>。土壤全氮、pH 值对土壤过氧化氢酶活性的直接途径系数较大,分别为 0.540, -0.498,两者对过氧化氢活性分别有较强的直接正效应和直接负效应,但通过影响其他土壤因子而得到的间接途径系数较小;土壤水分、容重、有机质、速效磷、速效钾等理化因子对过氧化氢酶活性的直接途径

系数较小,但通过影响土壤全氮而得到较大的间接途径系数。说明土壤全氮和 pH 值是影响研究区过氧化氢酶活性的主要因子。

土壤水分和全氮含量对多酚氧化酶活性的直接影响较其他土壤因子显著,直接途径系数分别为 0.615,0.549,表观上对多酚氧化酶活性的影响有强烈的正效应。土壤容重、有机质、pH 值、速效磷、速效钾等理化因子均对多酚氧化酶活性的直接影响较小,它主要通过影响土壤全氮而影响多酚氧化酶活性,与多酚氧化酶活性之间亦存在较大的相关性。

表 5 各土壤理化性质途径分析的决定系数

因变量	自变量	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$
过氧化氢酶	$x_1$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$x_2$		0.02	-0.03	0.01	-0.06	0.00	-0.02
	$x_3$			0.25	-0.02	0.10	0.00	0.10
	$x_4$				0.01	-0.05	0.00	-0.02
	$x_5$					0.29	0.00	0.09
	$x_6$						0.00	0.00
	$x_7$							0.12
多酚氧化酶	$x_1$	0.30	-0.06	0.03	-0.01	0.20	0.03	-0.03
	$x_2$		0.04	-0.01	0.01	-0.11	-0.01	0.01
	$x_3$			0.01	0.00	0.02	0.00	-0.01
	$x_4$				0.00	-0.03	0.00	0.00
	$x_5$					0.38	0.02	-0.03
	$x_6$						0.00	0.00
	$x_7$							0.01
脲酶	$x_1$	0.02	-0.01	0.04	-0.01	0.03	0.03	0.02
	$x_2$		0.02	-0.03	0.01	-0.04	-0.02	-0.02
	$x_3$			0.16	-0.01	0.04	0.10	0.05
	$x_4$				0.02	-0.04	-0.02	-0.01
	$x_5$					0.10	0.04	0.03
	$x_6$						0.09	0.04
	$x_7$							0.04
转化酶	$x_1$	0.03	-0.01	0.02	-0.01	0.05	0.04	0.03
	$x_2$		0.01	-0.01	0.01	-0.04	-0.01	-0.01
	$x_3$			0.05	-0.01	0.04	0.05	0.03
	$x_4$				0.02	-0.05	-0.01	-0.02
	$x_5$					0.22	0.06	0.06
	$x_6$						0.08	0.05
	$x_7$							0.06
磷酸酶	$x_1$	0.05	-0.02	0.04	0.02	0.06	-0.01	0.02
	$x_2$		0.02	-0.02	-0.02	-0.05	0.00	-0.01
	$x_3$			0.10	0.02	0.05	-0.01	0.03
	$x_4$				0.03	0.07	0.00	0.02
	$x_5$					0.23	-0.01	0.04
	$x_6$						0.00	-0.01
	$x_7$							0.03

研究表明,土壤水分和全氮对多酚氧化酶活性存在显著地积极影响。土壤理化因子对脲酶活性的直

接作用系数大小顺序为:pH 值>全氮>速效磷>速效钾>含水量>容重>有机质。土壤 pH 值对脲酶

活性的直接途径系数最大,表现为对脲酶活性有强烈的负效应。

土壤全氮与脲酶活性存在较大的直接正效应,且通过影响其他因子得到的间接途径系数也较大。土壤水分、有机质、速效磷、速效钾等理化因子对脲酶活性直接途径系数较小,但通过其他因子作用于脲酶活性的影响较大。说明土壤全氮和 pH 值是影响该地区脲酶活性的主导因子。

土壤全氮对转化酶活性直接作用最大,为0.473,但通过其他理化因子对转化酶活性的间接影响较小。土壤有机质、速效磷、速效钾均对转化酶活性直接影响较小,但同时存在较大的间接作用。土壤 pH 值和土壤容重与转化酶之间存在较小的直接关系,但通过影响其他理化因子而一定程度上制约转化酶活性。从途径分析数据得出,土壤全氮是影响该研究区转化酶活性的直接因子。

土壤容重对磷酸酶活性存在较低的直接正效应0.127,但存在极大的间接负效应-0.930,表现为极显著的负效应。速效磷对磷酸酶活性的直接作用较小,它主要通过影响土壤全氮、pH 值而较大程度上决定磷酸酶活性。全氮对磷酸酶活性直接途径系数较大,间接系数较小。分析得出,影响该研究区磷酸酶活性的主要因子是土壤容重、速效磷和全氮。

从决定系数计算结果(表5)可以得到,任意两种土壤理化因子对土壤酶的共同作用均比较小,对土壤酶活性的影响因子相对单一。土壤全氮和 pH 值对过氧化氢酶活性决定系数值分别为0.29,0.25,相对较大且为正值,表明对土壤中过氧化氢酶活性起决定作用的理化因子是土壤全氮和 pH 值;土壤含水量和全氮则能更大程度上决定土壤多酚氧化酶活性,决定系数值0.30,0.28,是影响多酚氧化酶活性的主导因子;相对于其他理化性质,土壤全氮和 pH 值对脲酶活性决定系数相对较高,是影响脲酶活性的主导因子;土壤全氮对转化酶活性的直接途径系数较大,因而其对转化酶活性的决定系数值(0.22)相对其他理化因子较大,对转化酶活性起着决定性作用;磷酸酶活性亦主要由土壤全氮决定,同时 pH 值对磷酸酶活性的决定系数相对较大。

通过决定系数分析发现,土壤全氮含量是影响研究区土壤酶活性变化的主导因素,pH 值对该地区土壤酶活性亦有较大影响,而土壤水分则对多酚氧化酶活性专一性影响较强。其他因子间的决定程度相对较小,变化不明显。

## 4 结论

研究区耕作初始,施肥、灌溉和农作物的生长使

土壤酶活性、土壤有机质含量和养分不断增加,土壤质量转好。伴随着长时间周而复始单一的种植模式,棉花对土壤养分的长期选择性吸收,导致土壤养分失衡,土壤酶活性不同程度降低。8—12 a 期间,土壤酶活性、养分含量达最佳值,是棉田土壤最适宜的耕作期。这与许多学者<sup>[24-27]</sup>研究结果相似,10 a 左右将是比较合适的垦殖年限,其后需要进行耕作和种植方式的调整(如轮作、倒茬等)来缓解土壤质量的退化,使土壤质量向良性发展。因此,为了解决长期连作导致研究区土壤退化的问题,可通过适当的休耕、绿肥与棉田轮作、有机无机肥配合施用等措施改善土壤性质。

土壤理化性质之间相互依赖,相互作用,共同影响着土壤酶活性。途径分析结果和决定系数反映了不同理化因子对各种酶活性的影响有一定规律性和差异性。

(1) 土壤全氮是影响该地区酶活性的主导因子。氮素不仅是土壤酶的组成部分,而且累积在土壤有机质中的氮还决定了酶进入土壤中的数量。戴伟等<sup>[25]</sup>研究发现,土壤全氮含量对土壤过氧化氢酶活性及其动力学特征影响最大,侯彦会等<sup>[9]</sup>也阐明全氮对脲酶活性具有显著的直接效应,土壤速效氮、速效磷和速效钾主要通过全氮对脲酶活性产生间接影响。廖铁军与黄云<sup>[28]</sup>对脲酶活性与土壤营养因子的相关性研究也表明,全氮对脲酶的直接作用最高。

(2) pH 值是制约该地区土壤酶活性的主导因子,相关研究<sup>[9,13]</sup>认为,pH 值不是影响土壤酶活性的主要因素,但本研究对象为干旱区的绿洲农田,其盐碱化程度高,pH 值相对较高,各样地 pH 值均大于8.0,对土壤酶活性存在较大的直接负效应,亦通过土壤有机质、养分等理化性质间接制约土壤酶活性。

(3) 土壤水分直接参与土壤中复杂的生物化学过程,是影响凋落物分解速率的主要因素<sup>[29]</sup>。多酚氧化酶主要酶促土壤中多元酚氧化为醌,并结合蛋白质的降解产物——氨基酸或肽凝集成腐殖质。这一过程包括枯落物的分解、蛋白质的降解等复杂的生物化学反应,都离不开水的参与,尤其在缺水的干旱区绿洲农田。因此,水分是影响研究区多酚氧化酶活性的主要因子。

(4) 土壤容重与磷酸酶活性之间表现为显著的负相关关系,这是由于磷酸酶活性的绝大部分能为黏粒吸附,黏粒吸附作用可使磷酸酶活性减弱。因此土壤容重是制约该地区磷酸酶活性的主要因子。

与简单相关或多元回归分析方法不同,应用途径分析能更全面考察各个自变量和因变量之间的直接与间接相关关系,可以从本质上对土壤酶活性与理化

性质之间的关系进行更全面地解释,使二者间的影响过程更加明晰,为科学地指导干旱区绿洲棉田的管理、施肥、灌溉提供了可靠依据。本研究仅选取了对土壤性质影响较大的几种酶活性和理化因子进行研究,其他影响酶活性变化的因素和酶活性的研究尚待深入。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张玉兰,陈利军,张丽莉. 土壤质量的酶学指标研究[J]. 土壤通报,2005,36(4):598-604.
- [2] 高雪峰,韩国栋,张功,等. 荒漠草原不同放牧强度下土壤酶活性及养分含量的动态研究[J]. 草业科学,2007,24(2):10-13.
- [3] 漆良华,张旭东,彭镇华,等. 湘西北退化侵蚀地植被恢复区土壤养分、微生物与酶活性的典范相关分析[J]. 林业科学,2008,44(9):1-6.
- [4] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京:农业出版社,1986:1-328.
- [5] 吴海燕,金荣德,范作伟,等. 东北黑土区不同耕作方式土壤养分与酶活性的时空变化[J]. 水土保持学报,2009,23(6):154-157.
- [6] 万忠梅,宋长春. 三江平原不同类型湿地土壤酶活性及其与营养环境的关系[J]. 水土保持学报,2008,22(5):158-161.
- [7] 吴楠,张元明. 古尔班通古特沙漠生物土壤结皮影响下的土壤酶分布特征[J]. 中国沙漠,2010,30(5):1128-1135.
- [8] 吕桂芬,吴永胜,李浩荒,等. 荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J]. 中国沙漠,2010,30(1):104-109.
- [9] 侯彦会,周学辉,焦婷,等. 甘肃永昌县放牧草地土壤脲酶活性与土壤肥力的关系初探[J]. 草业学报,2009,18(4):111-116.
- [10] 王丹,王兵,戴伟,等. 杉木人工林土壤系统有机碳相关变量的通径分析[J]. 土壤通报,2011,42(4):823-827.
- [11] 漆良华,张旭东,彭镇华. 湘西北小流域植被恢复区土壤酶活性及养分相关性[J]. 东北林业大学学报,2011,39(3):83-88.
- [12] 赵静,韩甜甜,谢兴斌. 酸化梨园土壤酶活性与土壤理化性质之间的关系[J]. 水土保持学报,2011,25(4):115-120.
- [13] 贡璐,张海峰,吕光辉. 塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J]. 生态学报,2011,31(14):4136-4143.
- [14] 孙权,陈茹,宋乃平,等. 宁南黄土丘陵区马铃薯连作土壤养分、酶活性和微生物区系的演变[J]. 水土保持学报,2010,24(6):208-212.
- [15] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002,34(3):387-401.
- [16] Aparicio V, Costa J L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas[J]. Soil and Tillage Research, 2007,96(1/2):155-165.
- [17] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós M C, et al. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005,37(5):877-887.
- [18] Salazar S, Sanchez L E, Alvarez J, et al. Correlation among soil enzyme activities under different forest system management practices[J]. Ecological Engineering, 2011,7(8):1123-1131.
- [19] 范君华,龚明福,刘明,等. 南疆干旱区连作棉田土壤养分及生物活性的初步研究[J]. 棉花学报,2009,21(2):127-132.
- [20] 闫正龙,王晓国,高凡,等. 塔里木河干流上游地区土壤盐渍化时空变化监测分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(10):105-110.
- [21] 和文祥,朱铭莪. 陕西土壤脲酶活性与土壤肥力关系分析[J]. 土壤学报,1997,34(4):392-398.
- [22] 安韶山,黄懿梅,刘梦云. 宁南山区土壤酶活性特征及其与肥力因子的关系[J]. 中国生态农业学报,2007,15(5):55-58.
- [23] 王标,虞木奎,孙海菁,等. 盐胁迫对不同种源麻栎叶片光合特征的影响[J]. 应用生态学报,2009,20(8):1817-1824.
- [24] 徐万里,唐光木,盛建东,等. 垦殖对新疆绿洲农田土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报,2010,30(7):1773-1779.
- [25] 戴伟,白红英. 土壤过氧化氢酶活性及其动力学特征与土壤性质的关系[J]. 北京林业大学学报,1995,17(1):37-41.
- [26] 刘瑜,梁永超,褚贵新,等. 长期棉花连作对北疆棉区土壤生物活性与酶学性状的影响[J]. 生态环境学报,2010,19(7):1586-1592.
- [27] 刘建国,卞新民,李彦斌,等. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(5):1027-1032.
- [28] 廖铁军,黄云. 紫色土脲酶活性与土壤营养的研究[J]. 西南农业大学学报,1995,17(1):72-75.
- [29] 李博,赵斌,彭容豪,等. 陆地生态系统生态学原理[M]. 北京:高等教育出版社,2005:129-150.