

# 塔里木河上游连作棉田土壤脲酶动力学特征与 环境因子的相关分析

杨翠萍<sup>1</sup>, 马勇刚<sup>2,3</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区科技发展研究院, 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆大学 资源与环境科学学院,  
乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 研究土壤酶学特征的变化对于探讨人类活动对土壤生态系统的影响具有重要的意义。以阿拉尔垦区 4 个不同连作年限棉田为研究对象, 分析了各连作年限棉田不同土层深度土壤脲酶活性、动力学以及土壤理化因子特征, 研究了土壤酶动力学特征及其与理化因子的对应关系。结果表明: 阿拉尔垦区不同连作年限棉田脲酶活性随土层深度逐渐减弱, 随着连作年限增加, 0—20 cm 土层土壤脲酶活性呈先降低后升高趋势, 20—50 cm 和 50—80 cm 为先升高后降低再升高的变化规律; 4 个不同年限棉田土壤脲酶活性依次为: 20 a 棉田 > 15 a 棉田 > 10 a 棉田 > 5 a 棉田; 各连作年限棉田脲酶酶促反应总趋势为随底物浓度增高反应初速度逐渐增大。5 a, 10 a, 15 a, 20 a 棉田  $V_{\max}$ ,  $V_{\max}/K_m$  值表现出明显的随年限增加而呈先升高后降低的变化趋势, 而  $K_m$  值则显现出随连作年限增大脲酶与底物结合度越低的规律; 相关性分析结果表明,  $V_{\max}$  与速效磷、土壤含水量正相关, 与电导率负相关,  $K_m$  与各土壤理化因子相关性不大,  $V_{\max}/K_m$  与速效磷、土壤含水量、pH 值均呈正相关关系。总之, 土壤酶动力学特征受速效磷、土壤含水量、pH 值和电导率的影响较大。

**关键词:** 阿拉尔垦区; 连作棉田; 脲酶活性; 脲酶动力学

中图分类号: S154

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0131-06

## Kinetic Characteristics of Urease in Alar Reclamation Region of the Upper Reaches of Tarim River

YANG Cuiping<sup>1</sup>, MA Yonggang<sup>2,3</sup>

(1. Xinjiang Scientific and Technological Development Strategy Institute,  
Urumqi 830011, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University,  
Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The study of changes in soil enzyme characteristics is important for exploring the effects of human activities on soil ecosystems. In this paper, we studied the soil urease activity, kinetics and soil physical and chemical factors in different soil layers of cotton fields in continuous cropping years in four different cropping years. The relationship between soil enzyme kinetics and its physicochemical factors was studied. The results showed that the urease activity of cotton field decreased gradually with the depth of soil in different continuous cropping years; with the increase of continuous cropping time, the urease activity of 0—20 cm soil layer decreased first and then increased, and the changes in the layers of 20—50 cm and 50—80 cm increased first and then increased; the soil urease activity of cotton field in four different years was decreased in the order: 20 years > 15 years > 10 years > 5 years, the general trend of enzymatic reaction of urease in cotton field increased with the increase of substrate concentration; the  $V_{\max}$  and  $V_{\max}/K_m$  values in the cotton field of 5 years, 10 years, 15 years, and 20 years showed the tendency of first increasing and then decreasing with the increase of the annual life, while the  $K_m$  value showed the decrease of urease and substrate binding with the increase of the continuous cropping period; the correlation analysis showed that  $V_{\max}$  was positively correlated with available phosphorus and soil water content, negatively correlated with electric conductivity,  $K_m$  had little correlation with soil physical and chemical factors, and  $V_{\max}/K_m$  had a positive correlation with available

收稿日期: 2017-04-03

修回日期: 2017-05-10

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2015211B028); 自治区青年科技创新人才培养工程(2014721037)

第一作者: 杨翠萍(1965—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 高级经济师, 主要从事新疆科技咨询和战略规划研究。E-mail: 342707899@qq.com

通信作者: 马勇刚(1981—), 男, 河南郟城人, 副研究员, 主要从事干旱区生态环境研究。E-mail: thank5151@163.com

phosphorus, soil water content and pH value. Soil enzyme kinetics characteristics are affected by available phosphorus, soil water content, pH value and electric conductivity.

**Keywords:** Alar reclamation area; continuous cropping cotton field; urease activity; urease kinetics

土壤是陆地生态系统的关键组分,在地球化学循环和能量转化过程中发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。土壤酶是土壤中最活跃的有机组成,其活性是土壤肥力的关键指标,土壤酶动力学反映了土壤酶含量高低及与底物间紧密程度<sup>[2-3]</sup>。土壤脲酶是一种参与尿素分解的生物活性驱动因子,其活性大小与土壤理化环境的改变关系密切<sup>[4-5]</sup>。以往对土壤脲酶着重于开展与土壤生产力、肥力和健康状况的关系的研究。目前对土壤脲酶的研究较多侧重于动力学特征的研究,但针对环境因子对脲酶活性及动力学特征的综合报道还较少<sup>[6-9]</sup>。通过对不同连作棉田土壤脲酶动力学特征及与环境因子相关性的研究,可判别人为扰动、胁迫环境下土壤生态系统的变化,也能够为改善土壤生态环境和提高土壤肥力提供一定理论依据,这对土壤质量的评估和预测有着重要意义。

阿拉尔垦区位于塔里木河上游地区,地处典型生态脆弱带和环境危机带,对外界的干扰,尤其对以人类活动为主导的区域水土资源的开发反响比较强烈<sup>[10]</sup>。该垦区20世纪50年代开发,经过60a的建设,已成为国家级优质商品棉基地和新疆特色农副产品转化增值的示范基地,在区域经济快速发展的同时,大规模的农业生产活动、不合理的灌溉垦殖方式加剧了棉田土壤质量退化<sup>[11-12]</sup>。开展棉田土壤酶活性以及动力学特征研究对土壤资源可持续利用具有重要意义。本文以阿拉尔垦区为典型研究区,分析不同连作年限棉田土壤脲酶活性和动力学特征,深入揭示土壤脲酶的催化作用机理,并探讨各动力学参数与多种土壤理化因子间的相关性,旨在为该区域土壤生态系统的保护和农业可持续发展做出贡献。

## 1 研究区概况

阿拉尔垦区地处新疆天山中段南麓,塔里木河上游,塔克拉玛干沙漠北缘。跨40°22′—40°57′N,80°30′—81°58′E,东邻沙雅县,西依阿瓦提县,南、北靠阿克苏市,东北接新和县。东西宽约281 km,南北长180 km,平均海拔1 100 m,地势由西北向东南倾斜,沿河岸及冲沟两侧略有抬升。该地区气候类型属暖温带极端大陆性干旱荒漠气候,雨量稀少,地表蒸发强烈,年均温度为11.6℃,年均降水量为17.4~42.8 mm,年均蒸发量为1 125~1 600 mm。春季浮尘、沙尘暴等灾害性天气较常见。粉砂壤土为主要土壤类

型,母质以棕漠土为主。该地区是全国重要的细绒棉和最大的长绒棉生产基地。

## 2 材料与方法

### 2.1 野外采样

野外土样采集于2015年7月,采样点集中在研究区所属农一师十二团。为研究垦区不同连作年限棉田土壤酶学特征,在研究区选择并采集4个类型土壤样品:5 a,10 a,15 a和20 a棉田(土壤样品以空间代替时间序列法采集)。样区的耕作方式为传统耕作,灌溉(滴灌)与施肥由当地兵团统筹管理。每种类型分别选取5个典型样方,各样方按S型布设5个样点后采集表土层(0—20 cm)、心土层(20—50 cm)、底土层(50—80 cm)土壤样品,去除植物根系和石块,将土样充分混匀并用四分法各取500 g。同时记录各样点的经度、纬度、海拔等数据,并对各样点周围环境及土壤剖面拍照留档。采样前研究区20 d内无降水,农田15 d内无灌溉。将带回实验室后的土壤平铺在白纸上,经自然风干,磨细、去杂、过80目(0.178 mm)筛,装入样品袋做好标记,用于实验室分析。

### 2.2 试验方法

2.2.1 土壤脲酶活性的测定 脲酶活性采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定。称取5 g土于50 ml三角瓶中加入1 ml甲苯。15 min后加入10 ml的10%的尿素和20 ml的pH值为6.7的柠檬酸盐缓冲溶液混合均匀,在37℃恒温箱培养24 h。吸取3 ml滤液加入50 ml容量瓶后加4 ml苯酚钠和3 ml次氯酸钠溶液摇匀。20 min显色后定容。并在1 h内于分光光度计578 nm波长处比色。

标准曲线绘制:以氮工作液浓、吸光值度分别为横、纵坐标绘制。土壤脲酶活性以土壤中NH<sub>3</sub>-N的毫克数表示:NH<sub>3</sub>-N=(a样品-a无土-a无基质)·V·n/m。式中:a样品、a无土和a无基质为样品、无土对照和无基质对照吸光值在标准曲线上所对应的NH<sub>3</sub>-N毫克数;V为显色液的体积;n为分取倍(浸出液体积/吸取滤液体积);m表示土重。

2.2.2 土壤脲酶动力学试验 称取5 g土于50 ml三角瓶中,随后加入1 ml甲苯。15 min后加入10 ml不同浓度的尿素溶液(0.005,0.01,0.05,0.1 mol/L)和20 ml的pH值为6.7的柠檬酸盐缓冲溶液,将溶液摇荡混合均匀后在37℃恒温箱培养,培养

于 6, 18, 21, 24 h 时取滤液 3 ml, 用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定脲酶活性。

2.2.3 土壤理化因子测定 土壤理化因子选择了速效钾、速效磷、全氮、土壤含水量、有机碳、pH 值、电导率 7 种指标。测定均采用常规方法:速效钾采用乙酸铵浸提-原子吸收法;速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;全氮采用酸消化法处理土样,然后用流动分析仪测定含量;土壤含水量采用烘干法;有机碳含量测定采用重铬酸钾稀释热法;pH 值测定采用电位法;电导率采用电导法。

### 2.3 数据处理与分析

2.3.1 基本统计处理 所得数据使用 Excel 2007 进行基本统计处理,计算数据平均值( $n=5$ )、标准差(SD)等。利用 SPSS 17.0 软件中的方差分析(LSD 方法)检验不同土层、不同连作年限及种植模式的土壤酶活性、土壤理化性质差异性( $\alpha=0.05$ )。

土壤酶动力学参数用 Michaelis-Menten 方程(初速度方程)计算,见式(1),该方程由试验获得并反映初速度  $V_0$  随底物浓度  $S$  的变动关系。一定底物浓度下,酶促反应速度与时间关系曲线中以零点为起点所作与曲线的线性部分相切直线的斜率为反应初速度。

$$V_0 = \frac{V_{\max} S}{S + K_m} \quad (1)$$

将 Michaelis-Menten 方程变为倒数,线性化后获得 Lineweaver-Burk 方程,见式(2)。如  $1/V_0$  对

$1/S$  作图求得米氏常数  $K_m$  和最大反应速度  $V_{\max}$ 。其中  $1/V_{\max}$  为直线截距, $K_m/V_{\max}$  为斜率。

$$\frac{1}{V_0} = \frac{1}{V_{\max}} + \frac{K_m}{V_{\max}} \cdot \frac{1}{S} \quad (2)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 不同连作年限棉田土壤脲酶活性特征

阿拉尔垦区不同连作年限棉田土壤脲酶活性特征见表 1。不同连作年限棉田脲酶活性随土层深度逐渐减弱。土壤脲酶活性在同一土层各连作年限间也有一定差异性。随着连作年限增加,土壤脲酶活性在 0—20 cm 土层呈先降低后升高趋势,其活性在各连作棉田由高到低依次为:20 a > 15 a > 5 a > 10 a, 20 a 最高为 0.265 g/kg, 10 a 最低为 0.154 g/kg;土壤脲酶活性在 20—50 cm 土层为先升高后降低再升高的规律,其活性在各连作棉田由高到低依次为:20 a > 10 a > 15 a > 5 a, 20 a 最高为 0.234 g/kg, 15 a 最低为 0.176 g/kg;土壤脲酶活性在 50—80 cm 土层为升高的趋势,其活性在各连作棉田由高到低依次为:20 a > 15 a > 10 a > 5 a, 20 a 最高为 0.197 g/kg, 5 a 最低为 0.038 g/kg。

变异系数反映各样点间数据的离散程度,一般认为  $CV \leq 10\%$  为弱变异性; $10\% < CV < 100\%$  为中等变异性; $CV \geq 100\%$  为强变异性。由此得出本文中各土层不同连作年限下土壤脲酶活性均表现出中等变异性。

表 1 不同连作年限棉田土壤脲酶活性特征分析( $n=5$ )

变量	土层/ cm	最小值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	最大值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	平均值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	中值/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	标准差 SD	变异 系数 CV
5 a 棉田	0—20	0.146	0.181	0.166	0.168	0.016	0.10
	20—50	0.083	0.181	0.139	0.149	0.036	0.26
	50—80	0.011	0.080	0.038	0.036	0.028	0.74
10 a 棉田	0—20	0.064	0.206	0.154	0.155	0.056	0.36
	20—50	0.146	0.272	0.198	0.159	0.062	0.31
	50—80	0.011	0.162	0.091	0.086	0.055	0.60
15 a 棉田	0—20	0.127	0.281	0.216	0.253	0.068	0.32
	20—50	0.086	0.350	0.176	0.118	0.110	0.63
	50—80	0.008	0.281	0.121	0.074	0.118	0.98
20 a 棉田	0—20	0.209	0.322	0.265	0.266	0.053	0.20
	20—50	0.058	0.398	0.234	0.262	0.128	0.55
	50—80	0.039	0.363	0.197	0.234	0.141	0.72

### 3.2 不同连作年限棉田土壤脲酶动力学特征

不同耕作方式土壤脲酶酶促反应底物浓度对反应初速度的影响见图 1, 5 a 棉田与打瓜/红枣套作模式下脲酶酶促反应底物浓度对初速度的影响较小,在浓度为 10 mmol/L 时已趋于稳定,其余模式的酶促反应速度受底物浓度影响相对较为显著。表 2 为不同耕作方

式土壤脲酶动力学参数,土壤酶动力学参数主要包括  $V_{\max}$ ,  $K_m$ ,  $V_{\max}/K_m$  值。本文中 5 a, 10 a, 15 a, 20 a 棉田  $V_{\max}$ ,  $V_{\max}/K_m$  值表现出明显的随年限增加而呈先升高后降低的变化趋势,各连作年限棉田脲酶  $V_{\max}$  和  $V_{\max}/K_m$  值的大小变化分别是 15 a 棉田 > 20 a 棉田 > 10 a 棉田 > 5 a 棉田和 10 a 棉田 > 15 a 棉田 >

20 a 棉田 > 5 a 棉田。而不同连作年限棉田土壤脲酶  $K_m$  值则显现出随连作年限增大的规律,说明连作年限越长脲酶与底物结合度越低。

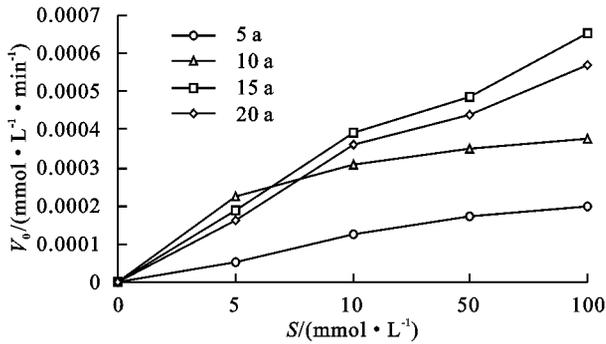


图 1 脲酶酶促反应初速度与底物浓度的关系曲线

### 3.3 不同连作年限棉田土壤脲酶动力学特征与理化因子相关性

3.3.1 土壤理化因子特征分析 不同连作年限棉田土壤理化因子呈现出一定的差异性。如表 3 所示,在 0—20 cm 土层中,速效钾在 15 a 棉田 ( $226.318 \pm 41.657$ ) 显著高于 20 a 棉田 ( $145.039 \pm 49.101$ );速效

磷在 15 a 棉田 ( $33.493 \pm 27.210$ ) 显著高于 5 a 棉田 ( $15.954 \pm 5.558$ );土壤含水量在 20 a 棉田 ( $28.602 \pm 7.128$ ) 显著高于 5 a 棉田 ( $18.378 \pm 6.051$ );有机碳在 15 a 棉田有机碳最高为 ( $8.323 \pm 1.794$ ),显著高于 5 a 棉田 ( $4.953 \pm 0.713$ );全氮、pH 值与电导率值在各年限间不存在显著性差异。在 20—50 cm 土层中,速效钾在 15 a 棉田 ( $225.243 \pm 57.143$ ) 显著高于 20 a 棉田 ( $137.001 \pm 62.315$ );pH 值在 5 a 棉田 ( $8.316 \pm 0.171$ ) 显著高于 15 a 棉田 ( $8.052 \pm 0.064$ );速效钾、全氮、土壤含水量、有机碳和电导率在各连作棉田不存在显著差异。在 50—80 cm 土层中,速效钾在 15 a 棉田 ( $238.267 \pm 67.485$ ) 显著高于 20 a 棉田 ( $127.239 \pm 63.124$ );全氮在速效钾在 15 a 棉田 ( $0.687 \pm 0.189$ ) 显著高于 20 a 棉田 ( $0.399 \pm 0.361$ );pH 值在 5 a 棉田 ( $8.392 \pm 0.301$ ) 显著高于 10 a 棉田 ( $8.152 \pm 0.089$ );电导率在 5 a 棉田 ( $1589.200 \pm 951.318$ ) 显著高于 20 a 棉田 ( $613.300 \pm 526.021$ );速效磷、土壤含水率和有机碳在各连作棉田不存在显著差异。

表 2 土壤脲酶动力学参数

动力学参数	5 a 棉田	10 a 棉田	15 a 棉田	20 a 棉田
$V_{\max}/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	$8.594 \times 10^{-5}$	$3.6719 \times 10^{-4}$	$4.9150 \times 10^{-4}$	$4.5592 \times 10^{-4}$
$K_m/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$	1.921	3.297	7.135	8.598
$V_{\max}/K_m$	$4.474 \times 10^{-5}$	$1.1137 \times 10^{-4}$	$6.889 \times 10^{-5}$	$5.303 \times 10^{-5}$

表 3 不同连作年限棉田土壤理化因子特征分析 ( $n=5$ )

变量	土层/cm	速效钾	速效磷	全氮	土壤含水量	有机碳	pH 值	电导率
5 a 棉田	0—20	$171.309 \pm 30.450\text{ab}$	$15.954 \pm 5.558\text{b}$	$0.647 \pm 0.289\text{a}$	$18.378 \pm 6.051\text{b}$	$4.953 \pm 0.713\text{b}$	$8.234 \pm 0.136\text{a}$	$1200.000 \pm 534.833\text{a}$
	20—50	$161.951 \pm 29.032\text{ab}$	$16.613 \pm 5.793\text{a}$	$0.837 \pm 0.227\text{a}$	$19.158 \pm 5.804\text{a}$	$4.471 \pm 1.499\text{a}$	$8.316 \pm 0.171\text{a}$	$909.400 \pm 599.512\text{a}$
	50—80	$174.857 \pm 33.953\text{ab}$	$3.460 \pm 1.095\text{a}$	$0.544 \pm 0.213\text{ab}$	$26.806 \pm 6.244\text{a}$	$3.027 \pm 1.273\text{a}$	$8.392 \pm 0.301\text{a}$	$1589.200 \pm 951.318\text{a}$
10 a 棉田	0—20	$214.288 \pm 72.925\text{ab}$	$21.756 \pm 11.159\text{ab}$	$0.537 \pm 0.315\text{a}$	$23.932 \pm 2.559\text{ab}$	$8.048 \pm 3.250\text{a}$	$8.176 \pm 0.090\text{a}$	$859.200 \pm 559.559\text{a}$
	20—50	$221.425 \pm 72.051\text{a}$	$26.826 \pm 8.422\text{a}$	$0.792 \pm 0.386\text{a}$	$23.756 \pm 6.222\text{a}$	$5.297 \pm 3.554\text{a}$	$8.150 \pm 0.106\text{ab}$	$804.800 \pm 458.465\text{a}$
	50—80	$214.698 \pm 78.786\text{ab}$	$12.166 \pm 9.436\text{a}$	$0.613 \pm 0.426\text{ab}$	$24.380 \pm 5.245\text{a}$	$6.053 \pm 3.214\text{a}$	$8.152 \pm 0.089\text{b}$	$848.800 \pm 428.898\text{ab}$
15 a 棉田	0—20	$226.318 \pm 41.657\text{a}$	$33.493 \pm 27.210\text{a}$	$0.775 \pm 0.200\text{a}$	$20.648 \pm 3.517\text{a}$	$8.323 \pm 1.794\text{a}$	$8.066 \pm 0.058\text{a}$	$1045.800 \pm 925.451\text{a}$
	20—50	$225.243 \pm 57.143\text{a}$	$21.790 \pm 16.208\text{a}$	$0.721 \pm 0.394\text{a}$	$18.992 \pm 5.633\text{a}$	$5.847 \pm 3.413\text{a}$	$8.052 \pm 0.064\text{b}$	$1206.000 \pm 790.239\text{a}$
	50—80	$238.267 \pm 67.485\text{a}$	$8.526 \pm 5.788\text{a}$	$0.687 \pm 0.189\text{a}$	$18.722 \pm 11.279\text{a}$	$4.471 \pm 2.642\text{a}$	$8.234 \pm 0.163\text{ab}$	$613.300 \pm 526.021\text{b}$
20 a 棉田	0—20	$145.039 \pm 49.101\text{b}$	$23.784 \pm 5.070\text{ab}$	$0.836 \pm 0.344\text{a}$	$28.602 \pm 7.128\text{a}$	$6.260 \pm 1.071\text{ab}$	$8.070 \pm 0.138\text{a}$	$1193.200 \pm 470.379\text{a}$
	20—50	$137.001 \pm 62.315\text{b}$	$19.722 \pm 11.928\text{a}$	$0.509 \pm 0.183\text{a}$	$21.996 \pm 9.072\text{a}$	$5.021 \pm 2.884\text{a}$	$8.128 \pm 0.215\text{b}$	$1148.400 \pm 589.611\text{a}$
	50—80	$127.239 \pm 63.124\text{b}$	$20.351 \pm 16.730\text{a}$	$0.399 \pm 0.361\text{b}$	$23.888 \pm 10.013\text{a}$	$5.297 \pm 4.409\text{a}$	$8.156 \pm 0.238\text{ab}$	$1091.600 \pm 601.847\text{ab}$

3.3.2 土壤酶动力学特征与理化因子相关性 对土壤酶动力学参数与理化因子进行相关分析可知,  $V_{\max}$  主要受速效磷含量和土壤含水量大小影响,与其呈正相关关系,相关系数分别为 0.826, 0.913;  $V_{\max}$  与电导率呈负相关关系,相关系数为 -0.84。  $K_m$  与土壤各

理化因子均未表现出显著的相关关系。  $V_{\max}/K_m$  与速效磷、土壤含水量、pH 值均呈正相关关系,相关系数分别为 0.836, 0.806, 0.994。综上所述,土壤酶动力学特征受速效磷、土壤含水量、pH 值和电导率的影响较大。

表 4 土壤酶动力学参数与理化因子相关性 ( $n=5$ )

变量	速效钾	速效磷	全氮	土壤含水量	有机质	pH 值	电导率
$V_{\max}$	0.160	0.826	0.051	0.913	0.275	0.558	-0.840
$K_m$	0.601	0.530	-0.098	0.796	-0.169	0.350	-0.513
$V_{\max}/K_m$	-0.341	0.836	-0.713	0.806	-0.074	0.994	-0.272

## 4 讨论

### 4.1 不同连作年限棉田土壤脲酶活性特征

土壤脲酶是一种参与有机态氮素分解的重要酶之一,其活性高低是土壤肥力的关键指标<sup>[13-14]</sup>。本研究中土壤脲酶活性受土层深度和种植年限的影响显著。同一年限下的土壤,表层土壤受人为影响较大且获得的氮肥等养分比底土层要多,脲酶活性最高,其他土层由于土层深度加深,人为耕作作用减弱,所表征的脲酶活性更趋向于历史沉淀的因素<sup>[15-18]</sup>。顾峰雪等<sup>[16]</sup>研究了塔克拉玛干沙漠腹地土壤春季和夏季的酶活性特征,发现土壤表层的酶活性与下层相比增强比率较高。不同连作棉田随着连作年限增加,表层土壤与其他土层土壤脲酶活性呈相反变化规律,而出现这种差异是因为在耕作初期,棉田土壤氮肥在一定程度上比较贫瘠。但是随着种植年限的增加,绿洲农田土壤熟化和灌淤作用的增强促使土壤环境产生积极的影响,此外人为活动干扰和耕作方式在很大程度上改变了土壤环境中碳输入量和土壤水分的保持,而后期不合理的开发和长期耕作破坏了土壤环境<sup>[19-21]</sup>,因此随不同连作年限的增加,棉田土壤的脲酶活性呈现先升高后降低不同的变化趋势。

### 4.2 不同连作年限棉田土壤脲酶动力学特征

酶活性高低是土壤肥力的重要指标,而土壤脲酶动力学特征表征了土壤中脲酶含量的高低及脲酶与底物的反应程度,能够从酶促反应机理上分析绿洲农田土壤中的生物化学过程<sup>[22-23]</sup>。土壤酶动力学参数主要包括  $V_{\max}$ ,  $K_m$ ,  $V_{\max}/K_m$  值。 $V_{\max}$  值表示酶促反应中酶被底物浓度饱和时的反应速度,能够反映酶浓度大小; $K_m$  值表征反应复合物中酶与底物的亲和力; $V_{\max}/K_m$  值在较大范围内也代表了酶促反应初速度的大小,同时也是衡量酶催化能力的重要指标<sup>[24-25]</sup>。

研究区不同连作年限棉田在人类活动的影响下其土壤环境发生了重要变化,土壤脲酶活性也因此受到影响<sup>[26]</sup>。土壤脲酶动力学特征受多种因素影响,因此不同年限脲酶动力学特征均差异明显。随年限增加,研究区土壤  $V_{\max}$  和  $V_{\max}/K_m$  值表现出明显的随年限增加而表现出先升高后降低的变化趋势,这主要是因为种植年限能够对绿洲农田土壤环境中的脲酶活性产生积极的影响,土壤水分和养分的改变为脲酶酶促反应提供了条件,使得土壤中脲酶活性升高<sup>[27-28]</sup>。但随着连作年限增加,种植模式长期重复,土壤微生物种类单一、棉田土壤质量下降,研究区土

壤酶活性显著下降<sup>[29-30]</sup>。而  $K_m$  值随不同年限的增加而增加,这说明棉田的连作年限越长,脲酶与底物的结合度则越低。

### 4.3 不同连作年限棉田土壤脲酶动力学特征与理化因子相关性

酶动力学特征反映了酶在催化反应过程的影响因素<sup>[25]</sup>。研究土壤酶动力学特征与理化因子之间的关系可为绿洲农田土壤改良及土壤资源的开发利用提供科学依据<sup>[31]</sup>。本研究中土壤脲酶  $V_{\max}$  与  $V_{\max}/K_m$  均与速效磷、土壤含水量等因子表现出一定的相关性。磷元素是土壤肥力的物质基础之一,是作物体内重要的有机化合物的组成部分,当其含量增加时,土壤脲酶活性增强并积极参与这些养分元素的转化分解过程<sup>[31-32]</sup>。李为等<sup>[33]</sup>对桂林岩溶生态系统土壤酶活性与土壤肥力关系的研究发现,土壤水解酶类活性与土壤养分水平密切相关,一般与土壤有机质、全 N、有效 N、速效 P 之间呈显著或极显著正相关。水分条件会直接影响土壤酶活性的强弱,水分为土壤中的多种酶促反应提供了反应条件和场所,是土壤酶维持活性的保障<sup>[11,33]</sup>。本研究中土壤含水量与土壤脲酶动力学特征相关性较大,主要原因是农田土壤定期灌溉保证了土壤含水量,酶促反应受土壤水分之外的因素影响更大<sup>[32-34]</sup>。

## 5 结论

(1) 阿拉尔垦区连作棉田土壤脲酶活性随土层深度和连作年限呈一定规律性变化。随着连作年限增加,0—20 cm 土层土壤脲酶活性呈先降低后升高趋势,20—50 cm 和 50—80 cm 与其规律相反。不同年限棉田土壤脲酶活性由高到低依次为:20 a 棉田 > 15 a 棉田 > 10 a 棉田 > 5 a 棉田。

(2) 各连作年限棉田脲酶酶促反应总趋势为随底物浓度增高反应初速度逐渐增大。5 a, 10 a, 15 a, 20 a 棉田  $V_{\max}$ ,  $V_{\max}/K_m$  值表现出明显的随年限增加而呈先升高后降低的变化趋势,而土壤脲酶  $K_m$  值则显现出随连作年限增大脲酶与底物结合度越低的规律。

(3) 相关性分析结果表明,  $V_{\max}$  与速效磷、土壤含水量正相关,与电导率负相关,  $K_m$  与各土壤理化因子相关性不大,  $V_{\max}/K_m$  与速效磷、土壤含水量、pH 值均呈正相关关系。综上所述,土壤酶动力学特征受速效磷、土壤含水量、pH 值和电导率的影响较大。

### 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] 黄勇,杨忠芳.土壤质量评价国外研究进展[J].地质通报,2009,28(1):130-136.
- [3] 焦志勇.土壤脲酶的研究进展及发展前景[J].江西农业,2016,9(17):84.
- [4] 焦晓光,隋跃宇,张兴义.土壤有机质含量与土壤脲酶活性关系的研究[J].农业系统科学与综合研究,2008,24(4):494-496.
- [5] 翟心心,贺秋芳.岩溶区土壤脲酶活性与土壤肥力的关系[J].中国农学通报,2011,27(3):462-466.
- [6] Garcia-Ruiz R, Ochoa V, Hinojosa M B. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(9):2137-2145.
- [7] 和文祥,朱铭莪.陕西土壤脲酶与土壤肥力关系研究: II. 土壤脲酶的动力学特征[J].土壤学报,1997,34(1):42-52.
- [8] 苏苗苗.施肥对稻田土壤脲酶动力学和热力学参数的影响研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [9] 霍玉芹,刘福春.农田土壤脲酶活性和水解氮含量的生态特征研究[J].安徽农业科学,2012,40(3):1521-1522.
- [10] 吴雪,贡璐,冉启洋,等.阿拉尔垦区土壤理化因子与酶活性的通径分析[J].水土保持研究,2013,20(3):48-54.
- [11] 贡璐,冉启洋,韩丽.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[J].水土保持通报,2012,32(4):36-42.
- [12] 解丽娜,贡璐,朱美玲,等.塔里木盆地南缘绿洲土壤酶活性与理化因子相关性[J].环境科学研究,2014,27(11):1306-1313.
- [13] 贾若凌,李丽,刘香玲,等.荔枝果园土壤脲酶活性与土壤肥力的关系研究[J].河南农业科学,2011,40(6):79-81.
- [14] 李秀玲,吕光辉,何雪芬.连作年限对土壤理化性质及酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):93-97.
- [15] 王莹.秦王川灌区不同土地利用方式土壤活性有机碳库、土壤酶活性和土壤养分研究[D].兰州:甘肃农业大学,2013.
- [16] 顾峰雪,文起凯,潘伯荣,等.塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地风沙土的土壤酶活性研究[J].中国沙漠,2000,20(3):293-297.
- [17] 马春梅,王家睿,战厚强,等.稻草还田对土壤脲酶活性及土壤溶液无机氮含量影响[J].东北农业大学学报,2016,47(3):38-43,79.
- [18] 马宁宁,李天来,武春成,等.长期施肥对设施菜田土壤酶活性及土壤理化性状的影响[J].应用生态学报,2010,21(7):1766-1771.
- [19] Giacometti C, Cavani L, Baldoni G, et al. Microplate-scale fluorometric soil enzyme assays as tools to assess soil quality in a long-term agricultural field experiment [J]. Applied Soil Ecology, 2014,75(2):80-85.
- [20] Jin K, Sleutel S, Buchan D, et al. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2009,104(1):115-120.
- [21] 孙浩智.青藏高原东缘高寒草甸不同管理方式下土壤酶活性的研究[D].兰州:兰州大学,2014.
- [22] 张丽莉,陈利军,张玉兰,等.土壤氧化还原酶催化动力学研究进展[J].应用生态学报,2005,26(2):371-374.
- [23] 和文祥,朱铭莪,张一平,等.陕西土壤脲酶热力学特征研究[J].土壤学报,2007,44(6):1043-1048.
- [24] 王乐乐,聂立水,戴伟.北京山地不同针叶林型下土壤脲酶动力学和热力学特征研究[J].北京林业大学学报,2008,30(2):89-94.
- [25] 邱莉萍,王益权,刘军,等.旱地长期培肥土壤脲酶和碱性磷酸酶动力学及热力学特征研究[J].植物营养与肥料学报,2007,13(6):1028-1034.
- [26] 刘淑英.不同施肥对西北半干旱区土壤脲酶和土壤氮素的影响及其相关性[J].水土保持学报,2010,24(1):219-223.
- [27] 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.
- [28] 景宇鹏,李跃进,姚一萍,等.盐渍化土壤酶活性及其与微生物、理化因子的关系[J].中国农业科技导报,2016,18(2):128-138.
- [29] 刘曾媛,贡璐,张雪妮,等.克里雅河流域于田绿洲土壤酶活性与理化因子相关性分析[J].中国土壤与肥料,2014(4):35-41,52.
- [30] Jin K, Sleutel S, Buchan D, et al. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau[J]. Soil & Tillage Research, 2009,104(1):115-120.
- [31] 赵静,韩甜甜,谢兴斌,等.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.
- [32] 陈彩虹,叶道碧.4种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J].中南林业科技大学学报,2010,30(6):64-68.
- [33] 李为,余龙江,李涛,等.岩溶生态系统土壤酶活性的时空动态及其与土壤肥力的关系:以桂林丫吉村岩溶试验场为例[J].农业环境科学学报,2008,27(1):260-266.
- [34] Li Y Y, Dong S K, Wen L, et al. Assessing the soil quality of alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau using a modified soil quality index[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(10):8011-8022.