

网络出版时间:2013-01-14 16:36
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130114.1636.034.html>

黄土高原沟壑区宅基地复垦土壤酶动力学研究

孔 龙^{1a,1b}, 谭向平^{1a}, 和文祥^{1a}, 王旭东^{1a}, 郝明德²

(1 西北农林科技大学 a 资源环境学院, b 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100;
2 中国科学院 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**研究不同培肥措施对宅基地复垦土壤酶动力学特征的影响,探讨适宜农村闲置宅基地复垦的培肥模式。**【方法】**在位于黄土高原沟壑区的长武县,采用田间试验,设置不施肥以及施用化肥、有机复合肥、有机复合肥+菌肥、有机肥、有机肥+菌肥共 6 个处理,分析不同培肥措施下复垦土壤转化酶、脲酶、碱性磷酸酶的动力学参数(米氏常数(K_m)、最大反应速度(V_{max})和 V_{max}/K_m)的变化特征。**【结果】**复垦培肥后,化肥处理降低了土壤脲酶 V_{max} 及磷酸酶的 V_{max} 、 V_{max}/K_m 值,有机复合肥处理降低了土壤脲酶的 V_{max}/K_m 值,有机复合肥+菌肥处理降低了土壤脲酶及磷酸酶的 V_{max} 、 V_{max}/K_m 值,有机肥+菌肥和有机肥处理均较大幅度地提高了土壤脲酶、磷酸酶、转化酶的 V_{max} 、 V_{max}/K_m 值。相关性分析和主成分分析表明,转化酶 V_{max} , 脲酶 K_m 、 V_{max} 和磷酸酶 V_{max} 可用于评价土壤肥力水平的高低。**【结论】**有机肥单施或与菌肥配施是黄土高原沟壑区宅基地复垦较为适宜的培肥方式。
[关键词] 土壤酶;动力学特征;宅基地;复垦
[中图分类号] S154.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2013)02-0123-07

Enzyme kinetics characteristics of soil in the reclaimed
homestead land on Loess Plateau

KONG Long^{1a,1b}, TAN Xiang-ping^{1a}, HE Wen-xiang^{1a}, WANG Xu-dong^{1a}, HAO Ming-de²

(1 a College of Natural Resources and Environment, b College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The objective of this study was to clarify kinetics characteristics of land soil enzyme affected by different fertilizing measures, and develop the reclamation fertilization system. **【Method】** The field experiments with 6 fertilizing treatments (no fertilizer, fertilizer, compound fertilizer, compound fertilizer+ bacterial manure, organic fertilizer, organic fertilizer+ bacterial manure) were conducted to study the kinetics characteristics (K_m , V_{max} and V_{max}/K_m) of soil invertase, urease, and alkaline phosphatase in the Changwu County, Shaanxi Province. **【Result】** Compared with the initial soil samples, chemical fertilizer reduced V_{max} of soil urease and V_{max} and V_{max}/K_m of phosphatase and compound fertilizer reduced V_{max}/K_m of urease. Compound fertilizer combined with bacterial manure reduced V_{max} and V_{max}/K_m of urease as well as V_{max} and V_{max}/K_m of phosphatase, while organic fertilizer combined with bacterial manure and organic fertilizer increased V_{max} and V_{max}/K_m of invertase, urease and phosphatase. Correlation and principal component analysis showed that V_{max} of invertase, K_m and V_{max} of urease, V_{max} of phosphatase were important factors for

[收稿日期] 2012-05-18
[基金项目] 中国科学院知识创新工程重大项目(KSCX-YW-09-07);西北农林科技大学“青年学术骨干人才支持计划”项目;农业部西北植物营养与农业环境重点实验室联合资助项目
[作者简介] 孔 龙(1988—),女,山东德州人,在读硕士,主要从事土壤生物化学研究。E-mail:longk1988@gmail.com
[通信作者] 和文祥(1968—),男,陕西黄龙人,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤生态毒理及土壤生物化学研究。
E-mail:wxhe1968@163.com

evaluation of soil fertility. 【Conclusion】 The research showed that single organic fertilizer or combined with bacterial manure was a rational fertilization to improve fertility of the homestead land soil on Loess Plateau.

Key words: soil enzymes; kinetics characteristics; homestead; reclamation

经济社会快速发展,特别是新农村建设加快推进,导致农村建设用地需求不断增大,保护耕地和保障发展的矛盾日益突出^[1]。当前,农村居民“一户多宅”、宅基地闲置的情况较为普遍。按照集约用地和城乡统筹发展的土地利用方针,开展农村宅基地复垦整理,合理利用土地,才能达到推进农村农业发展的目的。与此同时,在当前耕地面积减少,粮食供需紧张的情势下,农村宅基地复垦意义更为重大。

土壤酶参与并控制着土壤中物质的转化循环及能量代谢过程,对土壤微生物、植物的生长和土壤结构的稳定起着十分重要的作用^[2]。通过土壤酶及动力学特征研究来评价农业耕作、施肥等措施的优劣及对环境的影响是一条重要的途径,同时也是土壤质量和养分供应能力的重要表征^[3]。

目前,基于不同模式对复垦效果的研究,主要集中于采用土壤养分因子及酶活性对矿区土壤复垦的评价中^[4-5]。而从土壤酶促反应动力学角度对宅基地复垦后土壤肥力进行评价的研究鲜见报道。为此本研究通过玉米大田试验,分析 6 种不同培肥措施下宅基地土壤水解酶动力学变化特征,探讨土壤酶动力学参数与土壤肥力之间的关系,揭示土壤酶作用机理的差异,筛选出宅基地复垦时的最佳施肥模式,以期为黄土高原沟壑区宅基地复垦提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样及培肥方案

试验布置在黄土高原的长武县洪家镇王东村一农户废弃近 10 年的宅基地上,试区土壤为中壤质,形成于黄土母质上,属堆垫干润均腐土(Cumuli-ustic isohumols)^[6]。

2009-03 进行田间试验,共设 6 个处理:1)对照(不施肥,CK);2)化肥处理(施用 1 200 kg/hm² 专用肥);3)有机复合肥处理(施用 1 500 kg/hm² 有机复合肥);4)有机复合肥+菌肥处理(施用 1 500 kg/hm² 有机复合肥和 62.5 kg/hm² 菌肥);5)有机肥处理(施用 125 m³/hm² 鸡粪);6)有机肥+菌肥处理(施用 125 m³/hm² 鸡粪和 62.5 kg/hm² 菌肥)。施氮量控制在 180 kg/hm²。肥料均作为底肥

施入,其中鸡粪的 $m(\text{有机质}) : m(\text{N}) : m(\text{P}) : m(\text{K}) = 25.5 : 1.40 : 1.03 : 0.72$;化肥为“好年华”玉米专用肥(加锌), $\text{N} : \text{P} : \text{K} \geq 15\% : 5\% : 5\%$;复合肥为“博帝森”有机复合肥, $\text{N} : \text{P} : \text{K} \geq 12\% : 4\% : 4\%$,有机质 $\geq 20\%$;菌肥为“可利丰”复合微生物肥料,有效活菌数 $\geq 2.0 \times 10^8 \text{ g}^{-1}$ 。每个处理面积 60 m² (15 m $\times$ 4 m),重复 2 次,随机区组排列,共 12 个小区。各处理除所施肥料不同外,均为常规传统管理。

本研究采用的玉米品种为长武广泛种植的“豫玉 22”,购自当地种子公司。玉米于 2009-05 播种,10 月中旬收获。在收获玉米同时采集土样,先去除 0~5 cm 表层土样,之后采集 5~20 cm 土层土样,将其混匀,风干、过孔径 1 mm 筛后备用。供试土壤基本理化性质见文献^[7]。

1.2 测定方法^[8]

1.2.1 土壤转化酶酶促反应 称取 5.00 g 土壤,添加 10 mL 不同浓度的蔗糖溶液(5, 10, 50, 100 mmol/L)、20 mL 磷酸盐缓冲液(pH=5.5)和 0.25 mL 甲苯,摇匀后 37 ℃ 恒温静置培养,于反应 10, 14, 18, 22 h 时取上清液,采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤转化酶活性。

1.2.2 土壤脲酶酶促反应 称取 5.00 g 土壤,加入 1 mL 甲苯静置 15 min 后添加 10 mL 不同浓度的尿素溶液(5, 10, 50, 100 mmol/L)及 20 mL 磷酸盐缓冲液(pH=6.7),37 ℃ 恒温静置培养,于反应 10, 14, 18, 22 h 时取上清液,采用靛酚蓝比色法测定土壤脲酶活性。

1.2.3 土壤磷酸酶酶促反应 称取 5.00 g 土壤,加入 0.25 mL 甲苯静置 15 min 后添加 20 mL 用硼酸缓冲液(pH=9.4)配制的不同浓度磷酸苯二钠溶液(1, 2.5, 5, 10 mmol/L),37 ℃ 恒温静置培养,于 10, 14, 18, 22 h 时取上清液,采用磷酸苯二钠法测定土壤磷酸酶活性。

每处理重复 3 次,并设无底物和无土壤处理为对照。

1.3 数据处理

土壤酶动力学参数米氏常数 K_m 和最大反应速度 $V_{\max}$ 可用米-孟速度方程的积分式^[9]测定:

$$V=-d[S]/d\,t=V_{\max}\times[S]/(K_m+[S])。$$
(1)

经数学变换和整理得到:

$$1/t\times\ln([S_0]/[S])=-1/K_m\times([S_0]-[S])/t+V_{\max}/K_m。$$
(2)

式中: t 为酶促反应时间, $[S_0]$ 是初始底物浓度, $[S]$ 为 t 时间的底物浓度。

可见,式(2)是 $1/t\times\ln([S_0]/[S])$ 对 $1/t\times([S_0]-[S])$ 的直线方程。在反应期间通过测量不同时间利用的底物浓度(或形成的产物浓度),然后进行直线回归,即可求得 K_m 和 $V_{\max}$ 值。

2 结果与分析

2.1 不同培肥措施对复垦土壤转化酶动力学特性的影响

表 1 显示,与复垦前相比,种植玉米和施肥均不同程度降低了土壤转化酶的 K_m 值,降幅为 14.98%~38.59%。可见,种植作物和施肥均能提高酶-底物复合物的亲和力,从而促进转化酶与底物复合物的形成。各处理均使转化酶 $V_{\max}$ 较复垦前有所提高,增幅为 9.84%~119.67%,其中以有机肥处理和有机肥+菌肥处理最高, $V_{\max}$ 分别为复垦前

的 1.98 和 2.20 倍。各处理间,土壤转化酶 $V_{\max}$ 值大小表现为有机肥+菌肥>有机肥>有机复合肥+菌肥>CK>有机复合肥>化肥,其中有机复合肥和有机肥中添加菌肥处理的 $V_{\max}$ 比单施有机复合肥及有机肥处理有一定增高,说明菌肥的合理施用能够提高土壤转化酶总量。这可能是由于菌肥本身含有微生物,可以分泌更多的酶所致。 $V_{\max}/K_m$ 反映了酶促反应初速度。与复垦前相比,各处理均提高了转化酶 $V_{\max}/K_m$ 值,增幅为 28.57%~178.57%。除化肥处理外,其他培肥处理的 $V_{\max}/K_m$ 均较 CK 有所提高,其中有机肥处理增幅最大。反应速度常数 k 的大小决定一个反应在本质上是“快”还是“慢”。经过一轮培肥后,土壤转化酶的 k 值是复垦前的 1.75~4.73 倍。各施肥处理 k 值变化规律与 $V_{\max}/K_m$ 一致,由大到小依次为有机肥、有机肥+菌肥>有机复合肥、有机复合肥+菌肥>CK>化肥。相关性分析结果表明,土壤转化酶 K_m 值与土壤各化学指标间相关性较低, $V_{\max}$ 、 $V_{\max}/K_m$ 值与土壤有机质、全氮、速效磷及速效钾含量均呈显著或极显著正相关关系,另外 $V_{\max}$ 与碱解氮呈显著正相关关系(表 2)。

表 1 不同培肥措施下复垦土壤的转化酶动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of soil invertase with different fertilizations

测定时期 Determination stage	处理 Treatment	$K_m/$ (mmol·L ⁻¹)	$V_{\max}/$ (mmol· L ⁻¹ ·h ⁻¹)	$(V_{\max}/K_m)/$ h ⁻¹	反应速度常数(k)/h ⁻¹ Reactive velocity parameter	相关系数 Correlation coefficient
复垦前 Pre-reclaim		8.81	0.122	0.014	0.008	0.634**
复垦后 Post reclaim	对照 CK	6.33	0.143	0.023	0.015	0.912**
	化肥 Fertilizer	7.49	0.134	0.018	0.014	0.847**
	有机复合肥 Organic-inorganic compound fertilizer	5.41	0.139	0.026	0.021	0.770**
	有机复合肥+菌肥 Organic-inorganic compound fertilizer and microbial manure	5.91	0.154	0.026	0.021	0.853**
	有机肥 Organic fertilizer	6.17	0.242	0.039	0.033	0.864**
	有机肥+菌肥 Organic fertilizer and microbial manure	7.41	0.268	0.036	0.033	0.822**

注:自由度 $n-2=14$, $r_{0.05}=0.479$, $r_{0.01}=0.623$ 。“***”表示相关性极显著($P<0.01$)。表 3,4 同。

Note:Freedome $n-2=14$, $r_{0.05}=0.479$, $r_{0.01}=0.623$ 。“***”means very significant correlotion ($P<0.01$). The same as table 3 and 4.

2.2 不同培肥措施对复垦土壤脲酶动力学特性的影响

由表 3 可见,与复垦前相比,施用化肥或不施肥均会使脲酶 K_m 值减小,而其他 4 种处理的 K_m 值较复垦前有较大幅度的提高,其中以有机肥处理和有机肥+菌肥处理增幅均较大,分别为 152.68%,137.22%。表明施用有机肥会使脲酶与底物之间亲和力和大幅降低,影响酶促反应的发生。脲酶 $V_{\max}$ 变

化与 K_m 类似,有机复合肥、有机肥和有机肥+菌肥处理脲酶 $V_{\max}$ 与复垦前相比均升高,分别是复垦前的 1.10,2.65,2.30 倍,其余 3 种施肥处理 $V_{\max}$ 较复垦前有所降低。复垦后,所有施肥处理中,CK 的土壤脲酶 $V_{\max}/K_m$ 最低,化肥处理的脲酶 $V_{\max}/K_m$ 值最大。这是由于化肥施入土壤,其能够迅速被土壤脲酶水解,因此脲酶表现出较高的酶促反应初速度。所有施肥处理 k 值均大于复垦前,各施肥处理间 k

值由大到小顺序依次为有机肥>有机肥+菌肥>化肥>有机复合肥、CK>有机复合肥+菌肥。表明培肥加快了脲酶酶促反应速度。相关性分析结果表明,土壤脲酶 K_m 、 $V_{\max}$ 值与土壤有机质、全氮、速效磷及速效钾含量呈极显著正相关关系, $V_{\max}$ 值还与碱解氮含量呈极显著正相关关系(表 2)。

表 2 土壤酶动力学参数与土壤化学性质的相关性分析

Table 2 Correlation coefficients between kinetic parameters and chemical properties							
土壤酶 Soil enzymes	动力学参数 Kinetic parameters	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	碱解氮 Total N	速效磷 Available P	速效钾 Available K
转化酶 Invertase	K_m	0.331	0.277	0.402	0.634	0.230	0.274
	$V_{\max}$	0.964 **	0.990 **	0.741	0.880 *	0.937 **	0.908 *
	$V_{\max}/K_m$	0.892 *	0.942 **	0.599	0.69	0.923 **	0.876 *
脲酶 Urease	K_m	0.940 **	0.974 **	0.623	0.783	0.963 **	0.914 **
	$V_{\max}$	0.914 **	0.960 **	0.605	0.860 **	0.987 **	0.910 **
	$V_{\max}/K_m$	-0.072	-0.008	0.072	0.433	0.109	-0.013
磷酸酶 Phosphatase	K_m	0.863 **	0.837 **	0.412	0.861 **	0.928 **	0.909 **
	$V_{\max}$	0.951 **	0.970 **	0.599	0.877 **	0.993 **	0.929 **
	$V_{\max}/K_m$	0.820 **	0.887 **	0.661	0.720	0.842 **	0.729

注:自由度 $n-2=4$, $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。“*”表示相关性显著($P<0.05$),“**”表示相关性极显著($P<0.01$)。
Note:Freedom $n-2=4$, $r_{0.05}=0.811$, $r_{0.01}=0.917$ 。“*”indicates significant correlation($P<0.05$)and“**”indicates very significant correlation ($P<0.01$).

表 3 不同培肥措施下复垦土壤的脲酶动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of soil urease with different fertilizations						
测定时期 Determination stage	处理 Treatment	$K_m/$ (mmol · L ⁻¹)	$V_{\max}/$ (mmol · L ⁻¹ · h ⁻¹)	$(V_{\max}/K_m)/$ h ⁻¹	反应速度常数(k)/h ⁻¹ Reactive velocity parameter	相关系数 Correlation coefficient
复垦前 Pre-reclaim		3.17	0.040	0.013	0.001	0.675 **
复垦后 Post reclaim	对照 CK	3.01	0.028	0.009	0.011	0.655 **
	化肥 Fertilizer	2.08	0.037	0.018	0.012	0.798 **
	有机复合肥 Organic-inorganic compound fertilizer	3.63	0.044	0.012	0.011	0.638 **
	有机复合肥+菌肥 Organic-inorganic compound fertilizer and microbial manure	3.58	0.039	0.011	0.010	0.649 **
	有机肥 Organic fertilizer	8.01	0.106	0.013	0.014	0.671 **
	有机肥+菌肥 Organic fertilizer and microbial manure	7.52	0.092	0.012	0.013	0.617 **

2.3 不同培肥措施对复垦土壤磷酸酶动力学特性的影响

由表 4 可知,与复垦前相比,除有机复合肥、有机复合肥+菌肥处理外,其余处理土壤磷酸酶 K_m 值均升高,其中有机肥和有机肥+菌肥处理增幅均较高,分别达到 55.93%,33.90%。与复垦前相比,除了有机肥、有机肥+菌肥处理土壤磷酸酶 $V_{\max}$ 大幅提高外,其余处理 $V_{\max}$ 变化较小。表明有机肥对土壤磷酸酶总量的提高作用明显,这可能是施用的鸡粪本身磷酸酶含量较高所致。所有施肥处理中,除了有机复合肥、有机肥、有机肥+菌肥处理 $V_{\max}/K_m$ 较复垦前有所增大外,其余施肥处理均减小,其中化肥处理 $V_{\max}/K_m$ 最低,表明化肥降低了土壤磷酸酶的催化能力。土壤磷酸酶 k 值与

$V_{\max}/K_m$ 的变化规律一致,即有机复合肥、有机肥、有机肥+菌肥处理 k 值大于复垦前,其他施肥处理 k 值变化不明显。相关性分析结果表明,土壤磷酸酶 K_m 、 $V_{\max}$ 值均与土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量呈极显著正相关关系, $V_{\max}/K_m$ 与土壤有机质、全氮、速效磷含量呈极显著正相关关系(表 2)。

2.4 土壤水解酶动力学特征及化学性质的主成分分析

主成分分析可以表征不同土壤指标对土壤肥力的贡献率及不同培肥措施下土壤质量的差异。由表 5 可以看出,第 1 主成分和第 2 主成分的累计方差贡献率为 89.68%,已经超过 85%,因此前 2 个主成分可以反映土壤肥力的变异信息。

表 4 不同培肥措施下复垦土壤的磷酸酶动力学参数

Table 4 Kinetic parameters of soil phosphatase with different fertilizations

测定时期 Determination stage	处理 Treatment	$K_m/$ (mmol · L ⁻¹)	$V_{max}/$ (mmol · L ⁻¹ · h ⁻¹)	$(V_{max}/K_m)/$ h ⁻¹	反应速度常数(k)/h ⁻¹ Reactive velocity parameter	相关系数 Correlation coefficient
复垦前 Pre-reclaim		0.59	0.032	0.055	0.024	0.871**
复垦后 Post reclaim	对照 CK	0.60	0.029	0.048	0.023	0.836**
	化肥 Fertilizer	0.70	0.030	0.043	0.023	0.818**
	有机复合肥 Organic-inorganic compound fertilizer	0.55	0.032	0.059	0.028	0.775**
	有机复合肥+菌肥 Organic-inorganic compound fertilizer and microbial manure	0.55	0.029	0.053	0.024	0.846**
	有机肥 Organic fertilizer	0.92	0.063	0.068	0.043	0.916**
	有机肥+菌肥 Organic fertilizer and microbial manure	0.79	0.060	0.075	0.042	0.972**

表 5 供试土壤的主成分分析特征值

Table 5 Principal component eigenvalues of the initial soil samples

项目 Item	第 1 主成分 1st principal component	第 2 主成分 2nd principal component
特征值 Eigenvalues	11.40	2.05
方差贡献率/% Proportion of variance	76.00	13.68
累计方差贡献率/% Proportion of cumulative variance	76.00	89.68

由表 6 可知,第 1 主成分主要综合了土壤有机质、全氮、速效磷、转化酶 V_{max} 、脲酶 K_m 、脲酶 V_{max} 、磷酸酶 V_{max} 的变异信息。第 2 主成分主要反映了土壤转化酶 K_m 、脲酶 V_{max}/K_m 及碱解氮的变异信息。由第 1 主成分特征向量来看,转化酶 V_{max} 和脲酶 K_m 、 V_{max} 以及磷酸酶 V_{max} 均在第 1 主成分内,与土壤肥力关系密切,可以表征土壤肥力水平的高低。和文祥等^[9]在研究陕西土壤脲酶与土壤肥力关系时也发现,用脲酶动力学参数构筑的土壤肥力信息系统可以用来评价供试土样的肥力水平。

表 6 不同土壤指标的主成分特征向量

Table 6 Principal component eigenvectors of different factors of tested soils

测定项目 Analysis items	第 1 主成分 1st principal component	第 2 主成分 2nd principal component
有机质 Organic matter	0.285 9	-0.034 2
全氮 Total N	0.294 3	-0.030 6
全磷 Total P	0.202 3	0.103 9
碱解氮 Total N	0.263 7	0.296 9
速效磷 Available P	0.289 8	-0.008 0
速效钾 Available K	0.278 4	-0.021 7
转化酶 K_m K_m of invertase	0.089 2	0.587 7
转化酶 V_{max} V_{max} of invertase	0.292 4	-0.023 4
转化酶 V_{max}/K_m V_{max}/K_m invertase	0.275 5	-0.244 9
脲酶 K_m K_m of urease	0.289 1	-0.145 7
脲酶 V_{max} V_{max} of urease	0.290 3	-0.017 4
脲酶 V_{max}/K_m V_{max}/K_m of urease	-0.000 6	0.620 0
磷酸酶 K_m K_m of phosphatase	0.259 6	0.207 4
磷酸酶 V_{max} V_{max} of phosphatase	0.294 0	-0.006 4
磷酸酶 V_{max}/K_m V_{max}/K_m of phosphatase	0.262 2	-0.208 5

根据主成分分析特征值及载荷量可以得到反映土壤肥力水平的第 1、2 主成分函数表达式。然后将标准化数据代入对应的函数表达式中,获得不同施肥处理下土壤指标在主成分上的得分,由此可计算出主成分综合得分并进行排序^[10]。由表 7 可知,不同培肥措施下复垦土壤综合得分顺序依次为有机肥+菌肥>有机肥>化肥>有机复合肥+菌肥>有机复合肥>对照。其中有机肥+菌肥和有机肥处理的综合得分均较高,说明在对宅基地复垦时有机肥单施或与菌肥配施培肥改土效果较好。

表 7 不同培肥措施下复垦土壤主成分得分及综合得分

Table 7 Scores of principal components and general scores of tested soil with different fertilizations

处理 Treatments	得分 Score		综合得分(排序) General score(order)
	第 1 主成分	第 2 主成分	
	1st principal component	2nd principal component	
对照 CK	-2.647 1	-0.950 1	-2.141 8 (6)
化肥 Fertilizer	-2.457 4	2.967 2	-1.461 7 (3)
有机复合肥 Organic-inorganic compound fertilizer	-2.499 7	-1.226 4	-2.067 5 (5)
有机复合肥+菌肥 Organic-inorganic compound fertilizer and microbial manure	-1.924 8	-0.819 4	-1.574 9 (4)
有机肥 Organic fertilizer	4.767 5	-0.449 6	3.561 8 (2)
有机肥+菌肥 Organic fertilizer and microbial manure	4.761 5	0.478 2	3.684 2 (1)

3 讨 论

米氏常数 K_m 可用于表示土壤酶与底物结合的牢固程度,同时可以反映酶来源的差异,其随着土壤类型、肥力高低的变化而变化。本研究结果显示,复垦后各培肥处理转化酶 K_m 值均降低,而脲酶和磷酸酶 K_m 值有增有减。这可能与不同土壤酶在土壤中所处环境及被粘粒吸附的程度不同有关,如 Paulson 等^[11]报道,土壤中存在 2 种脲酶:一种是与土壤微生物直接结合的脲酶,其 K_m 值较小;一种是吸附在土壤胶体上的脲酶,其 K_m 值较大。有机肥的施用会改变酶在土壤中存在形式的比例,土壤有机质-粘粒复合体所占比例增加,吸附在粘粒上的脲酶对酶分子与底物结合起阻碍作用,从而使 K_m 值增加^[12]。但土壤水解酶 K_m 值基本上都处于同一数量级,这可能是土壤酶来源较单一造成的。

V_{max} 可表征酶-底物复合体分解为酶和产物的速度,即酶促反应形成产物的能力。对于风干土样而言, V_{max} 值是表征酶促过程潜在能力的容量指标,即土壤中总酶的量度^[9]。 V_{max}/K_m 值在较大范围内是酶促反应初速度的重要指标,也是衡量酶催化能力的重要指标^[8]。 V_{max}/K_m 值大,即酶催化能力较大,反之则催化能力较小。本研究中,所有培肥处理均提高了土壤转化酶 V_{max} 和 V_{max}/K_m 值,表明施肥能够快速提升土壤转化酶活性及其酶促反应速度,从而有效地促进了土壤碳素的转化和利用。CK 的转化酶 V_{max} 和 V_{max}/K_m 值较复垦前也有提高,可能是由于玉米的根系残体及分泌物刺激微生物分泌了更多水解碳水化合物化合物的酶类,为自身新陈代谢提供营养物质,表明种植玉米也能促进转化酶酶促反应速度。

本研究中,与复垦前相比,土壤脲酶和磷酸酶

V_{max} 、 V_{max}/K_m 总体呈现出有机肥、有机肥+菌肥处理增大,其他处理稍有降低的趋势。邱莉萍等^[8]对长期培肥土壤的研究也表明,培肥会增加土壤脲酶的 V_{max} 和 V_{max}/K_m 值。樊军等^[13]对长期不同施肥处理下旱地冬小麦连作的研究指出,土壤磷酸酶的动力学参数(K_m 、 V_{max} 、 V_{max}/K_m)反映了不同施肥条件下土壤中酶活性特征及不同酶之间的差别,其中碱性磷酸酶的 V_{max} 受有机肥影响最大。本研究结果显示,所有处理中,仅有有机肥、有机肥+菌肥处理大幅提高了土壤脲酶和磷酸酶总量及酶促反应速度,而化肥处理作用较弱。这可能是由于鸡粪本身含有丰富的营养元素、微生物和活性酶,施用后可利用底物量增多,土壤的酶活性增强。袁玲等^[14]的研究表明,施用化肥会使土壤磷酸酶活性降低。孙瑞莲等^[15]也认为,土壤中无机磷的增加可能是磷酸酶活性减弱的一个原因。

本研究结果显示,土壤各养分因子不同程度地影响着土壤酶动力学特性。除转化酶 K_m 值和脲酶 K_m/V_{max} 外,3 种酶的动力学参数与部分土壤化学性质呈显著或极显著正相关关系;主成分分析结果显示,土壤水解酶动力学参数与土壤肥力有着密切的关系,用其构筑的土壤肥力信息系统可用来评价土壤肥力水平的高低,且起主要作用的因子群是转化酶 V_{max} 和脲酶 K_m 、 V_{max} 以及磷酸酶 V_{max} 。表明土壤转化酶、脲酶、磷酸酶动力学参数能反映复垦土壤的肥力水平。

4 结 论

本研究结果表明,与复垦前相比,有机肥和有机肥+菌肥处理提高了土壤转化酶、脲酶、磷酸酶 V_{max} 及 V_{max}/K_m 值,促使酶促反应的加快,推动土壤中碳、氮、磷营养元素循环。相关性分析表明,转化酶

$V_{\max}$ 、 $V_{\max}/K_m$ 值和脲酶 K_m 、 $V_{\max}$ 以及磷酸酶 K_m 、 $V_{\max}$ 、 $V_{\max}/K_m$ 值与土壤化学性质都有着很好的相关性,表明转化酶、脲酶及磷酸酶的动力学参数能够作为黄土高原沟壑区土壤肥力的评价指标。

主成分分析表明,土壤有机质、全氮、速效磷、转化酶 $V_{\max}$ 、脲酶 K_m 、脲酶 $V_{\max}$ 、磷酸酶 $V_{\max}$ 与土壤肥力关系紧密,由水解酶动力学参数所组成的土壤肥力信息系統可以用来评价土壤肥力水平。在此基础上,根据土壤水解酶动力学特征和养分因子综合评价结果可知,施用有机肥或将其与菌肥配施是黄土高原沟壑区宅基地复垦较为适宜的培肥方式。

[参考文献]

[1] 罗林涛. 关于旧村废弃宅基地复垦整理的思考 [J]. 陕西农业科学,2009(5):173-175.
Luo L T. Study on the reclamation of abandoned house sites in old village [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences,2009 (5):173-175. (in Chinese)

[2] Dick R P, Sandor J A, Eash N S. Soil enzyme activities after 1500 years of terrace agriculture in the Colca Valley, Peru [J]. Agric Ecosyst Environ,1994(50):123-131.

[3] 张玉兰,陈利军,刘桂芬,等. 土壤水解酶类催化动力学研究进展 [J]. 应用生态学报,2003,14(12):2326-2332.
Zhang Y L, Chen L J, Liu G F, et al. Research advance in catalytic kinetics of soil hydrolase [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(12):2326-2332. (in Chinese)

[4] 武瑞平,李 华,曹 鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究 [J]. 农业环境科学学报,2009,28 (9):1855-1861.
Wu R P, Li H, Cao P. Amelioration of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009,28(9):1855-1861. (in Chinese)

[5] 栗 丽,洪坚平,谢英荷,等. 生物菌肥对采煤塌陷复垦土壤生物活性及盆栽油菜产量和品质的影响 [J]. 中国生态农业学报,2010,18(5):939-944.
Li L, Hong J P, Xie Y H, et al. Effect of bacterial manure on soil biological activity, yield and quality of rape in reclaimed core-mining areas [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,18(5):939-944. (in Chinese)

[6] 王宗明,梁银丽. 黄土塬区作物生产潜力分析:以长武武区为例 [J]. 水土保持通报,2002(1):30-33.
Wang Z M, Liang Y L. Analysis of crop potential productivity on highland of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2002(1):30-33. (in Chinese)

[7] 谭向平,胡 一,罗 磊,等. 培肥复垦宅基地土壤酶和微生物特征研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40

(1):107-114.
Tan X P, Hu Y, Luo L, et al. Study on soil biochemical characteristics of the homestead land reclaimed soil on Loess Plateau [J]. Journal of Northwest A&F University:Not Sci Ed,2012, 40(1):107-114. (in Chinese)

[8] 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.
Qiu L P, Wang Y Q, Liu J, et al. The dynamic and thermodynamic characteristics of soil reactions catalyzed by soil enzymes under long-term fertilization in Loess Plateau [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6):1028-1034. (in Chinese)

[9] 和文祥,朱铭菽. 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.
He W X, Zhu M E. Study on relation between urease and fertility of soils in Shaanxi: Ⅱ. Soil urease kinetic characteristics [J]. Acta Pedologica Sinica,1997,34(1):42-52. (in Chinese)

[10] 唐玉姝,慈 恩,颜廷梅,等. 太湖地区长期定位试验稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力关系 [J]. 土壤学报,2008,45(5): 999-1006.
Tang Y S, Ci E, Yan T M, et al. Relationship between soil enzyme activity and soil fertility of paddy fields under wheat-rice cropping system in a long term experiment in Taihu lake region [J]. Acta Pedologica Sinica,2008,45(5):999-1006. (in Chinese)

[11] Paulson K Z, Kurtz L T. Michaelis constants of urease [J]. Soil Sci Soc Am Pro,1970(34):70-72.

[12] Senwo Z N, Tabatabai M A. Aspartase activity of soils [J]. Soil Sci Am J,1996(60):1416-1422.

[13] 樊 军,郝明德. 旱地农田土壤脲酶与碱性磷酸酶动力学特征 [J]. 干旱地区农业研究,2002,20(1):35-37.
Fan J, Hao M D. Kinetic characteristics of urease and alkaline phosphatase in dry land farming [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2002,20(1):35-37. (in Chinese)

[14] 袁 玲,杨邦俊,郑兰君,等. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,1997,3(4):300-306.
Yuan L, Yang B J, Zheng L J, et al. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,1997,3(4):300-306. (in Chinese)

[15] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003,9(4):406-410.
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S, et al. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science,2003,9(4):406-410. (in Chinese)