保护性耕作对旱作农田耕层土壤肥力及酶活性的影响

罗珠珠¹, 黄高宝^{2*}, Li Guangdi³, 张仁陟¹, 蔡立群¹

(1 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070; 2 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070;

3 NSW Department of Primary Industries, Wagga Wagga, NSW 2650, Australia)

摘要:通过田间定位试验,研究了不同耕作方式对黄土高原西部旱农区耕层土壤肥力和酶活性的影响。结果表明,秸秆还田可以显著提高0—5和5—10 cm土层有机质、全氮、全磷、全钾、铵态氮、速效磷、速效钾和3种水解酶活性;10—30 cm土层仅提高了有机质、全钾和速效钾含量,对其余各养分含量和水解酶活性并无明显影响。免耕降低了0—5、5—10和10—30 cm土层硝态氮含量,但对过氧化氢酶活性有明显促进作用。相关分析表明,土壤有机质、养分和碱性磷酸酶、蔗糖酶活性之间呈极显著相关关系。进一步应用主成分分析表明,土壤有机质、养分和水解酶活性共同反映着黄土高原雨养农区土壤肥力水平的高低。

关键词:免耕; 秸秆还田; 旱作农田; 土壤养分; 土壤酶活性

中图分类号: S344; S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2009)05-1085-08

Effects of conservation tillage on soil nutrients and enzyme activities in rainfed area

LUO Zhu-zhu¹, HUANG Gao-bao^{2*}, LI Guang-di³, ZHANG Ren-zhi¹, CAI Li-qun¹

(1 Resources and Environment Faculty of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Agronomy Faculty of Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3 NSW Department of Primary Industries, Wagga Wagga, NSW 2650, Australia)

Abstract: Based on the field experiments conducted in Dingxi of the western Loess Plateau, effects of the conventional tillage and five conservation agricultural patterns, namely conventional tillage, conventional tillage with stubble incorporating, no tillage with no stubble, no tillage with stubble retention, conventional tillage with plastic mulching and no tillage with plastic mulching on soil nutrients and enzyme activities in a rainfed farming system were studied. The results show that contents of soil organic matter, total N, total P, total K, NH_4^+ -N, available P and K, soil urease, alkaline phosphates and invertase activities at the 0–5 and 5–10 cm layers are increased in the two stubble retention systems. Moreover, in the two stubble retention systems, soil organic matter, total K and available K are improved greatly at the 10–30 cm depth of soil. Soil catalase activity is improved at the 0–30 cm depth of soil in the three no-tillage systems, while NO_3^- -N content is decreased. There are significant correlations between soil organic matter, contents of the nutrients, alkaline phosphatase and invertase activities. Principal component analysis indicates that soil organic matter, nutrients and hydrolases could be used to evaluate soil fertility in rainfed areas of Loess Plateau.

Key words: no tillage; stubble retention; rainfed; soil nutrient; soil enzyme activities

土壤酶活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向,它在土壤营养物质的循环和能量的转化过程中起着重要作用^[1];土壤营养物质反映了作

物根系供应养分的潜在能力,是构成土壤肥力的重要方面之一^[2]。不同的栽培制度和管理措施等都会影响土壤养分的空间变异和土壤酶活性。一直以

收稿日期: 2008-09-28

接受日期: 2009-01-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAD15B06); 中澳合作 ACIAR 项目(SMCN LWR²)/1999/094 资助。

作者简介: 罗珠珠(1979—),女,甘肃天水人,博士,主要从事生态与环境工程的教学与研究工作。E-mail: LuoZZ@gsau.edu.cn

* 通讯作者 Tel: 0931-7632188, E-mail: Huanggb@gsau.edu.cn

来,国内外关于保护性耕作对作物产量和土壤养分影响的报道较多^[3-4]。但关于保护性耕作对土壤酶活性,特别是对旱作农田土壤酶活性及其与养分之间关系的研究较少,且结论不尽一致^[5-6]。土壤酶对土壤 C、N 生物矿化循环过程有很好的指示作用,而影响这些酶分解因素中 90% 以上是由土地利用和耕作方式引起的^[7]。因此,对土壤酶活性进行系统研究将有助于探求不同耕作方式下土壤的生物化学过程,并有助于对其养分循环进行科学调控。

作为西部黄土高原雨养农区,休闲—春小麦单作的种植体系和过度耕作以及作物秸秆的移出造成了土壤有机质耗竭和肥力下降。为此,通过对试区 6 种不同耕作措施下土壤有机质、全量养分、速效养分和酶活性的比较研究,旨在阐明保护性耕作培肥地力的效应,为旱作农田土壤肥力的培育和土地生产力的提高提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验设在黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西县李家堡乡麻子川村。该试区属中温带半干旱区,平均海拔 2000 m,年均太阳辐射 592.9 kJ/cm²,年均降水 390.9 mm,年蒸发量 1531 mm,干燥度 2.53,为典型的雨养农业区。土壤为典型的黄绵土,土质疏松,土层深厚,质地均匀,贮水性能良好。

试验共设 6 种耕作处理(表 1)。试验于 2001 年 8 月开始,小麦豌豆轮作。为了加快研究进程,设计了小麦→豌豆(2002 年小麦→2003 年豌豆→2004 年小麦→2005 年豌豆→2006 年小麦→2007 年豌豆)和豌豆→小麦(2002 年豌豆→2003 年小麦→2004 年豌豆→2005 年小麦→2006 年豌豆→2007 年小麦)2 个轮作序列,4 次重复,共 48 个小区,小区面积 4m ×

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

代码 Code	处理 Treatments	耕作模式 Patterns
T	传统耕作 Conventional tillage with no straw	试验地在前茬收获后三耕两耨。八月份收获后马上进行第一次耕作,八月底和九月分别进行第二、三次耕作,耕深依次为 20 cm, 10 cm 和 5 cm。九月份第三次耕后耨一次,十月份冻结前再耨一次。这是定西地区很典型的传统耕作方式。 The field is ploughed 3 times and harrowed twice after harvesting. The first plough is in August immediately after harvesting, the second and third ploughs are in late August and September respectively. The plough depths are 20 cm, 10 cm and 5 cm, respectively. The field is harrowed after the last plough in September and re-harrowed in October before the ground is frozen. This is the typical conventional tillage practice in Dingxi region.
NT	免耕 No tillage with no straw cover	全年不耕作,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种。 No-tillage throughout the life of the experiment, no straw cover.
TS	传统耕作秸秆还田 Conventional tillage with straw incorporated	耕作方式同 T,但在结合第一次耕作将所有前作秸秆翻埋入土。 The field is ploughed and harrowed exactly as for T treatment (3 passes of plough and 2 harrows), but with straw incorporated at the first plough. All the straw from the previous crop is sent back to the original plot immediately after threshing and then incorporated into ground.
NTS	免耕秸秆覆盖 No-tillage with straw cover	播种、除草方法同 NT,收获脱粒后将全部前作秸秆覆盖在原小区。 No-tillage throughout the life of the experiment. The ground is covered with straw of previous crop from August till next March. All the straw from previous crop is sent back to the original plot immediately after threshing.
TP	传统耕作地膜覆盖 Conventional tillage with plastic mulch	试验地耕耨同 T(三耕两耨),但在 10 月份最后一次耨后覆盖塑料薄膜。膜宽 40 cm,膜侧种作物,因此该处理作物宽窄行种植,宽行 40 cm,窄行 10 cm,平均 25 cm。 The field is ploughed and harrowed exactly as for T treatment (3 passes of plough and 2 harrows), but covered with plastic after the last harrow in October. Plastic film is laid out between crop rows and the covering belt width is 40 cm. Thus, the row spaces between crops are 40 and 10 cm alternatively, with a average of 25 cm.
NTP	免耕地膜覆盖 No-tillage with plastic mulch	全年不耕作,覆膜及播种的时间和方式同 TP,为避免前茬秸秆挂坏薄膜,收获后用剪草机剪平或耨平残茬。 No-tillage throughout the life of the experiment. The plastic film is laid in October using same machine as for the treatment 5. To avoid the damage of plastic film, the crop residue is mowed or/harrowed after harvesting.

20m 随机区组排列。

供试作物春小麦品种为定西 35,播种量 187.5 kg/hm²;豌豆品种为绿农 1 号,播种量 100 kg/hm²。除覆膜处理外,其他处理用免耕播种机播种(中国农业大学研制),春小麦行距 20 cm,豌豆行距 24 cm;播深均为 7 cm。春小麦于 3 月中旬,豌豆为 3 月下旬播种。种小麦各处理均施 N 105 kg/hm²,P₂O₅ 105 kg/hm²(尿素 + 二铵);豌豆各处理均施 N 20 kg/hm²,P₂O₅ 105 kg/hm²(二铵 + 过磷酸钙),所有肥料都作基肥在播种时施入。

1.2 采样及测定项目与方法

2007 年作物收获时,各小区随机取 5 个点,分 3 层(0—5、5—10、10—30 cm)采集土样。样品经风干后研磨、过筛分装,供土壤养分含量和酶活性测定。

土壤有机质用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法;全氮用凯氏定氮法;全磷用酸溶钼锑抗比色法;全钾用氢氧化钠熔融—火焰光度法;铵态氮和硝态氮用氯化钾浸提—蒸馏法;速效磷用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法;速效钾用醋酸铵提取—火焰光度法^[8]测定。

土壤过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法^[9];碱性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法^[10];蔗糖酶用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[11];脲酶用靛酚蓝比色法^[11]测定。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对土壤养分的影响

2.1.1 对土壤有机质和全氮的影响 土壤有机质的含量取决于土壤原有有机质的矿化和外源有机物(作物残茬、落叶、杂草、根系分泌物、有机肥料等)的补充,作物秸秆本身就含有较为丰富的有机成分和营养元素,还田之后能补充土壤新鲜有机质^[12]。试验进行 5 年后,两种轮作序列下各处理土壤全量养分和有机碳测定结果(表 2)看出,不同耕作方式耕层 0—30 cm 土壤有机质含量差异明显。秸秆还田(TS、NTS)显著高于传统耕作和免耕(T、NT)和地膜覆盖(TP、NTP)处理。

对土壤氮素的影响与有机质类似,因为土壤有机氮与腐殖质的消长常常是一致的^[12]。相关分析表明,土壤有机质与全氮含量之间有极显著的正相关关系($r = 0.848^{**}$, $n = 36$)。进一步利用非线性回归模型进行拟合,二者之间存在幂函数关系:

$$Y = 0.114X^{0.826}; R^2 = 0.714.$$

2.1.2 对土壤全磷和全钾的影响 两种轮作序列

下不同处理 0—30 cm 土层全磷变化在 0.78—1.09 g/kg 之间。其中 0—10 cm 土层为秸秆还田处理(TS、NTS)显著高于其他处理,而且免耕高于耕翻,即 NTS > TS, NT > T, NTP > TP; 10—30 cm 土层除了 TS 和 NTP 处理之外,其余各处理间无显著差异(表 2)。这主要是因为作物残茬在地表的覆盖、磷肥的表施及磷在土壤中移动性较小,使得免耕土壤中磷素常在表层富集,而连年耕翻土壤的磷素在整个耕层分布相对较均匀。

表 2 还看出,土壤全钾在整个耕层(0—30 cm)均表现为秸秆还田的 TS、NTS 处理显著高于 T、NT、TP、NTP 处理。原因是 TS 和 NTS 每年进行秸秆还田,将作物带走的 70%—80% 的土壤钾素又归还土壤钾库;另外,地膜覆盖(TP、NTP)处理,由于作物的生物产量较高,每年从土壤钾库中带走的养分也多,导致的土壤钾素亏缺较大,甚至低于传统耕作(T)处理。

2.1.3 对土壤速效氮、磷、钾的影响 表 2 看出,秸秆还田(TS、NTS)处理耕层 0—30 cm 土层铵态氮含量显著高于其他处理,这是因为秸秆还田后能增加耕层土壤含水量、降低耕层土壤温度和 pH 值,从而降低氨分压并减小氨挥发速率,有效地削弱了氨挥发损失。免耕(NT、NTS、NTP)硝态氮含量显著低于耕翻(T、TS、TP),有研究认为,这可能与免耕土壤耕层较少硝化细菌和较多反硝化细菌有关^[13]。实际上,反硝化作用仅仅在田间持水量大于 76% 的条件下发生^[14],陇中黄土高原地区属半干旱地区,农田不会形成反硝化的环境条件,高云超^[15]研究表明,免耕与翻耕土壤反硝化细菌数量变化趋势一致,数量也相近。因此,本研究中免耕土壤中硝态氮含量较低并不是由于免耕增大反硝化作用引起的,而是与免耕条件下土壤排水良好导致硝态氮容易渗漏流失,以及免耕条件下作物产量高带走的速效氮多有关。

土壤速效磷含量均表现为 0—5 和 5—10 cm 土层秸秆还田(TS、NTS)处理显著高于其他处理。因为秸秆覆盖后土壤有机质含量显著提高,有机质分解产生的中间产物(有机酸)及其最终产物(CO₂)均能增加土壤溶液的酸度,而酸度的增加对某些固定磷的化合物具有一定的溶解力,从而提高了土壤中固定态磷的有效性;同时,由于磷在土壤剖面的移动性较小,不易产生淋失和挥发,土壤磷的移出量主要取决于植株摄取量,地膜覆盖后作物产量明显提高,速效磷摄取量大,因而在土壤中积累少。另外,

表 2 不同耕作方式下耕层土壤养分状况

Table 2 Soil nutrients under the different tillage systems

土层 Layer (cm)	处理 Treatment	有机质	全氮	全磷	全钾	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	速效磷	速效钾
		OM	Tot. N	Tot. P	Tot. K			Avail. P	Avail. K
		(g/kg)				(mg/kg)			
0—5	T	13.60 c	1.00 cd	0.87 b	15.33 b	6.37 b	30.97 a	13.91 c	201.72 d
	NT	13.90 c	1.05 bc	0.93 b	14.55 c	6.68 b	28.11 c	14.02 c	237.52 bc
	TS	14.91 b	1.09 b	1.07 a	16.33 a	8.08 a	31.22 a	16.32 b	264.46 ab
	NTS	16.24 a	1.17 a	1.08 a	16.84 a	8.94 a	30.16 ab	18.82 a	283.82 a
	TP	13.44 c	0.98 d	0.87 b	14.66 c	6.41 b	31.49 a	14.54 c	207.56 cd
	NTP	13.90 c	1.05 bc	0.92 ab	14.62 c	6.69 b	28.99 bc	14.18 c	231.19 cd
5—10	T	13.49 bc	0.99 bc	0.82 c	14.77 b	6.38 ab	29.15 ab	13.65 bc	189.08 b
	NT	13.85 bc	1.03 b	0.88 c	14.06 b	6.13 b	28.40 ab	14.10 bc	197.17 b
	TS	14.68 a	1.03 b	0.99 ab	15.57 a	7.53 a	30.67 a	15.22 ab	253.90 a
	NTS	14.86 a	1.09 a	1.02 a	16.24 a	7.19 ab	29.09 ab	16.08 a	263.96 a
	TP	13.44 c	0.98 c	0.91 bc	14.32 b	6.68 ab	28.40 b	12.27 c	190.24 b
	NTP	13.92 b	1.03 b	0.98 ab	14.31 b	6.42 ab	26.79 b	13.04 c	193.00 b
10—30	T	12.80 de	0.97 a	0.84 ab	14.53 b	6.14 a	36.03 a	5.36 a	149.35 b
	NT	13.59 bc	1.00 a	0.84 ab	14.04 bc	5.87 a	31.84 b	4.75 a	155.86 b
	TS	14.24 a	1.00 a	0.86 a	15.19 a	7.26 a	34.63 a	5.49 a	193.67 a
	NTS	13.98 ab	1.01 a	0.85 ab	15.47 a	6.70 a	32.64 b	5.26 a	202.12 a
	TP	12.58 e	0.98 a	0.82 ab	13.93 c	6.08 a	32.65 b	5.14 a	167.32 b
	NTP	13.28 cd	1.00 a	0.81 b	14.03 bc	5.85 a	31.77 b	4.74 a	166.75 b

注：表中数据为两种轮作体系的平均值。同一列数值后的不同字母表示同一土层不同处理间差异达 5% 显著水平，表 3 同。

Note: Data in the table are average of two cropping rotation systems. Values followed by different letters in the same column means significant at 5% level, among treatments with same soil layer, the same symbols were used for table 3.

0—5 和 5—10 cm 土层免耕 (NTS、NT、NTP) 处理速效磷含量显著高于翻耕 (T、TS、TP) 处理；而 10—30 cm 土层相反，但差异不显著，表明土壤速效磷随着免耕年限的增加而出现明显表聚趋势。

土壤速效钾含量与全钾趋势基本一致，即表现为整个耕层 (0—30 cm) 秸秆还田 (TS、NTS) 处理均显著高于其他处理 (表 2)。因为作物秸秆中一般含有数量较多的水溶性钾，施入土壤后能明显提高土壤代换性钾 (速效钾) 的水平。而且，秸秆覆盖后土壤有机质含量显著提高，有机质分解产生的酸性物质能增加土壤溶液的酸度，削弱粘土矿物对钾的固定作用，从而提高了土壤中固定态钾的有效性。地膜覆盖 (TP、NTP) 经过连续 5 年掠夺式的高产以后，大量速效钾被作物吸收携出，导致土壤速效钾明显低于其他处理。

2.2 不同耕作方式对土壤酶活性的影响

土壤过氧化氢酶活性可以用来表征土壤氧化强度，它在有机质氧化和腐殖质形成过程中起重要作用^[9]。

由表 3 可知，NT 耕层土壤氧化还原酶活性高于 T 处理，0—5、5—10、10—30 cm 土层分别提高了 3.20%、2.72%、4.51%；NTS 与 TS 相比，分别提高了 4.80%、3.62%、9.50%；NTP 与 TP 相比，分别提高了 8.76%、5.06%、6.97%。可见，无论覆盖与否，也无论覆盖何种材料，两种轮作序列下免耕 (NT、NTS、NTP) 土壤耕层 0—30 cm 过氧化氢酶活性均明显高于翻耕 (T、TS、TP) 土壤。

水解酶参与高分子有机化合物的水解反应，对丰富土壤中能被植物和微生物利用的可溶性营养物质起着重要的作用。3 种水解酶活性在 0—5 cm 土层均表现为 NT > T，NTS > TS，NTP > TP，且各处理差异显著；5—10 cm 土层，脲酶活性为 NT > T，NTP > TP，NTS 和 TS 差异不显著；而蔗糖酶活表现为 TS 处理与其他处理差异显著，碱性磷酸酶活性各处理间无明显差异。10—30 cm 土层各处理三种水解酶活性均无显著差异。

表 3 不同耕作措施下耕层土壤酶活性

Table 3 Soil enzymatic activities under the different tillage systems

土层 Layer (cm)	处理 Treatment	过氧化氢酶 Catalase [0.1 mol/L KMnO ₄ mL/(g·h)]	脲酶 Urease [NH ₃ -N mg/(g·d)]	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase [Phenol mg/(g·d)]	蔗糖酶 Invertase [Glucose mg/(g·d)]
0—5	T	4.94 cd	2.37 d	0.66 d	16.76 c
	NT	5.10 bc	2.57 bc	0.80 c	20.36 b
	TS	5.07 bc	2.48 cd	0.82 c	18.05 c
	NTS	5.31 a	2.71 a	1.08 a	24.10 a
	TP	4.77 d	2.43 d	0.73 cd	17.20 c
	NTP	5.19 ab	2.63 ab	0.95 b	21.50 b
5—10	T	4.77 b	2.24 a	0.72 a	17.07 b
	NT	4.90 b	2.32 a	0.75 a	16.57 b
	TS	4.70 b	2.35 a	0.85 a	20.38 a
	NTS	4.87 b	2.32 a	0.80 a	18.54 ab
	TP	4.91 ab	2.25 a	0.76 a	17.72 b
	NTP	5.16 a	2.36 a	0.74 a	17.38 b
10—30	T	4.81 ab	2.35 a	0.58 a	13.60 a
	NT	5.02 a	2.41 a	0.67 a	13.65 a
	TS	4.49 b	2.42 a	0.66 a	14.43 a
	NTS	4.92 a	2.38 a	0.73 a	15.12 a
	TP	4.69 ab	2.31 a	0.63 a	13.88 a
	NTP	5.02 a	2.33 a	0.69 a	13.86 a

2.3 土壤养分与土壤酶活性关系分析

有研究表明^[16],土壤肥力水平在很大程度上受制于土壤酶的影响,与土壤酶活性之间存在着非常密切的相关关系。对土壤酶与主要肥力因子相关分

析(表4)表明,土壤养分之间相关程度较高,除了硝态氮以外,其余各全量养分、速效养分和有机质均呈极显著正相关关系,说明其存在消长协调性,可以用于评价土壤肥力高低。土壤酶活性之间的相关关系

表 4 土壤养分和酶活性相关分析

Table 4 Correlation analysis between soil nutrients and enzyme activities

指标 Factors	OM	TN	TP	TK	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	AP	AK	Cat	Uase	APase	Iase
OM	1											
TN	0.862**	1										
TP	0.737**	0.800**	1									
TK	0.792**	0.726**	0.726**	1								
NH ₄ ⁺ -N	0.752**	0.730**	0.794**	0.842**	1							
NO ₃ ⁻ -N	-0.244	-0.220	-0.353*	0.030	-0.056	1						
AP	0.590**	0.608**	0.736**	0.534**	0.557**	-0.618**	1					
AK	0.831**	0.818**	0.819**	0.797**	0.787**	-0.359*	0.787**	1				
Cat	0.233	0.391*	0.404*	0.103	0.285	-0.262	0.243	0.196	1			
Uase	0.422*	0.432**	0.270	0.322	0.259	-0.113	0.202	0.363*	0.321	1		
APase	0.743**	0.629**	0.485**	0.465**	0.506**	-0.486**	0.593**	0.714**	0.136	0.561**	1	
Iase	0.647**	0.644**	0.678**	0.530**	0.636**	-0.519**	0.818**	0.780**	0.244	0.406*	0.785**	1

注(Note): * 显著相关 Significant at 5% level ; ** 极显著相关 Significant at 1% level. OM—有机质 Organic matter ; TN—全氮 Total N ; TP—全磷 Total P ; TK—全钾 Total K ; AP—速效磷 Available P ; AK—速效钾 Available K ; Cat—过氧化氢酶 Catalase ; Uase—脲酶 Urease ; APase—碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase ; Iase—蔗糖酶 Invertase ; 下同 The same symbols were used for table 5.

表明,除过氧化氢酶之外,其余3种水解酶之间的相关性均达到显著水平。表明3种水解酶进行酶促反应时,不仅具有自身的专一特性,还存在着一些共性,可在总体活性程度上反映土壤肥力水平的高低。对土壤酶活性与土壤养分之间的相关关系分析显示,碱性磷酸酶和蔗糖酶活性与土壤有机质、全量养分、速效养分均呈极显著正相关,与硝态氮呈极显著负相关;脲酶与有机质、全氮和速效钾含量呈显著正相关;过氧化氢酶活性仅与土壤全氮含量呈显著相关,与其他养分含量无显著相关性。

为了进一步论证土壤酶是土壤肥力的一个重要指标,该研究将土壤酶与土壤主要肥力因子作了主成分分析。表5看出,第一主成分的方差贡献率最

大,为59.19%,加上第二主成分和第三主成分方差贡献率,其累积方差贡献率达80.81%。因此,前三个主成分能基本反应土壤肥力系统的变异信息。再将土壤主成分进行分权计算,并计算出各因子在各主成分上的载荷。第一主成分主要综合了土壤有机质、速效养分、全量养分和两种水解酶的变异信息;第二主成分和第三主成分则综合了硝态氮、脲酶和过氧化氢酶的变异信息。第一主成分的累积方差贡献率最大,其对土壤肥力起着主要作用。从分权系数来看,土壤有机质、养分、蔗糖酶和碱性磷酸酶都在第一主成分内。因此,可以证明蔗糖酶、碱性磷酸酶和土壤有机质及土壤养分共同反映着土壤肥力水平的高低。

表5 土壤肥力因子主成分贡献率和负荷量

Table 5 Cumulative percentages and values of component capacity of different soil fertility indices

主成分 Component	特征根 Eigenvalues	贡献率 Percent of variance	累计贡献率 Cumulative percentage	负荷量 Capacity		
				第1主成分 1 st component	第2主成分 2 nd component	第3主成分 3 rd component
OM	7.10	59.19	59.19	0.8921	0.1977	0.0484
TN	1.50	12.51	71.70	0.8861	0.1598	0.1433
TK	1.09	9.11	80.81	0.8761	0.0848	0.1277
TP	0.92	7.65	88.45	0.7981	0.5038	0.0560
NH ₄ ⁺ -N	0.38	3.13	91.58	0.8281	0.3915	0.0812
NO ₃ ⁻ -N	0.30	2.50	94.08	0.4210	0.8214	0.2202
AP	0.21	1.77	95.85	0.8108	0.3080	0.3487
AK	0.18	1.48	97.33	0.9406	0.0767	0.1437
Cat	0.10	0.87	98.20	0.3648	0.3089	0.5350
Uase	0.08	0.71	98.90	0.4791	0.0891	0.7296
APase	0.08	0.64	99.54	0.7877	0.2653	0.1475
Iase	0.05	0.46	100.00	0.8537	0.2703	0.1132

3 讨论与结论

据报道,多年覆盖免耕后土壤的有机质含量要高于常规耕作。由于有机质对氮、磷、钾的吸附作用,免耕提高土壤有机质含量的同时,其吸附的氮、磷、钾也会随之增加,并能提高磷、钾的有效性,减轻磷、钾的固定^[17-18]。也有研究指出,有机质是氮、磷的重要来源,土壤氮素的95%以上是以有机态存在,土壤有机磷随有机质积累而增加,故在相同母质(含磷)条件下,土壤全磷往往随有机质积累而增加^[19]。相对而言,有机质与钾的关系则存在争议。如有研究认为,土壤全钾与有机质含量呈极显著负相关,因为有机质中的钾含量一般大大低于矿物质,土壤有机质积累势必对矿物钾产生“稀释效应”,导

致土壤全钾量的降低^[20];但另有研究认为,土壤全钾与有机质的负相关只有在富含有机质的土壤中才有明显的表现,并且有机质含量愈高,其相关性愈显著;而缺乏有机质的土壤,其相关性则未达显著水平^[21]。

土壤酶在响应作物轮作^[22]、残留物管理和土壤压实^[23]、耕翻^[24]等不同土壤管理措施的效果时比较敏感。有研究表明,免耕条件下土壤表层酶活性通常较高,因为不同耕作方式对土壤扰动程度不同,形成了不同的土壤环境,可能会造成土壤酶活性的差异^[25];另有研究发现,作物残体是土壤生物活动的主要和有效能源,通过秸秆还田可给土壤酶提供大量作用底物,因而能激发和提高土壤酶活性^[26]。有关土壤酶活性能否作为土壤肥力指标争论已久。

周瑞莲^[27]研究表明,土壤酶活性与土壤的营养水平间并不存在显著相关;邱莉萍认为^[16],土壤脲酶和磷酸酶活性与土壤养分之间呈显著或极显著相关关系,可以作为衡量土壤肥力水平的指标。周礼恺等认为^[28],土壤酶活性与主要肥力因子有显著相关关系,可作为土壤肥力指标之一。

本试验结果看出,秸秆还田可以显著提高表层 0—10 cm 土壤有机质、全氮、全磷、全钾、氨态氮、速效磷、速效钾含量和水解酶活性;免耕降低了耕层 0—30 cm 土壤硝态氮含量,但对过氧化氢酶活性有明显促进作用。相关分析结果表明,土壤有机质、养分含量和蔗糖酶和碱性磷酸酶活性可以反映黄土高原旱农区土壤肥力水平的高低,而免耕秸秆覆盖是适合于该区农业可持续发展的有效耕作模式。

参 考 文 献:

- [1] 姜勇,梁文举,闻大中,等. 免耕对农田土壤生物学特性的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 347-351.
Jiang Y, Liang W J, Wen D Z *et al.* Effects of no-tillage on soil biological properties in farmlands: A review [J]. Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(3): 347-351.
- [2] 崔晓东,侯龙鱼,马风云,等. 黄河三角洲不同土地利用方式土壤养分特征和酶活性及其相关性研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 66-69.
Cui X D, Hou L Y, Ma F Y *et al.* Characteristics of soil nutrient and enzyme activity and mutual relative analysis of different land use types in yellow river delta [J]. J. Northwest For. Univ., 2007, 22(4): 66-69.
- [3] Tracy P W. Carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur mineralization in plow and no-till alteration [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(2): 457-461.
- [4] 江晶,张仁陟,海龙. 耕作方式对黄绵土无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 387-391.
Jiang J, Zhang R Z, Hai L. Effect of tillage methods on inorganic phosphorus forms in Loessal soil [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2008, 14(2): 387-391.
- [5] Dumontet S, Mazzatura A, Casucci C *et al.* Effectiveness of microbial indexes in discriminating interactive effects of tillage and crop rotations in a Vertic Ustorthens [J]. Biol. Fert. Soils, 2001, 34(6): 411-416.
- [6] Acosta-Martínez V, Zobeck T M, Gill T E *et al.* Enzyme activities microbial community structure in semiarid agricultural soils [J]. Biol. Fert. Soils, 2003, 38(4): 216-227.
- [7] Monreal C M, Bergstrom D W. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical quality [J]. Can. J. Soil Sci., 2000, 80: 419-428.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Analysis on soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [9] 严昶升. 土壤肥力研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 1988.
Yan C S. Soil fertility and its research method [M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [10] 赵兰坡,姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法探讨 [J]. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.
Zhao L P, Jiang Y. Discussion on measurements of soil phosphates [J]. Chin. J. Soil Sci., 1986, 17(3): 138-141.
- [11] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274-328.
Guan S Y. Soil enzyme and its research method [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986. 274-328.
- [12] 高亚军,朱培立,黄东迈,等. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响 [J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 27-30.
Gao Y J, Zhu P L, Huang D M *et al.* Long-term impact of different soil management on organic matter and total nitrogen in rice-based cropping system [J]. Soil Environ. Sci., 2000, 9(1): 27-30.
- [13] Rice C W, Smith M S. Denitrification in no-tilled and plowed soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46: 1168-1173.
- [14] 陈文新. 土壤与环境微生物学 [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1990. 34-78.
Chen W X. Soil and environmental microbiology [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1990. 34-78.
- [15] 高云超,蔡作新,朱文珊,等. 秸秆覆盖免耕对土壤氮素转化细菌区系的影响 [J]. 生态科学, 2003, 22(2): 150-152.
Gao Y C, Cai Z X, Zhu W S *et al.* Effect of straw mulch no-tillage on community composition of soil nitrogen transferous bacteria [J]. Ecol. Sci., 2003, 22(2): 150-152.
- [16] 邱莉萍,刘军,王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 277-280.
Qiu L P, Liu J, Wang Y Q *et al.* Research on relationship between soil enzyme activities and soil fertility [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2004, 10(3): 277-280.
- [17] Reeves D W. The role of organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems [J]. Soil Till. Res., 1997, 43: 131-167.
- [18] Sims A L. Irrigated corn yield and nitrogen accumulation response in a comparison of no-till and conventional till: tillage and surface-residue variables [J]. Agron. J., 1998, 90(4): 630-637.
- [19] 刘世全,高丽丽,蒲玉琳,等. 西藏土壤有机质和氮素状况及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 54-57.
Liu S Q, Gao L L, Pu Y L *et al.* Analysis on status of soil organic matter and n nutrient and their influencing factors in Tibet [J]. J. Soil Water Conserv., 2004, 18(6): 54-57.
- [20] 刘世全,高丽丽,蒲玉琳,等. 西藏土壤磷素和钾素养分状况及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 75-78.
Liu S Q, Gao L L, Pu Y L *et al.* Status of soil P and K nutrient and their influencing factors in Tibet [J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(1): 75-78.
- [21] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. 166-219.
Yuan K N. Plant nutrient elements of soil chemistry [M]. Beijing:

- Science Press , 1983. 166–219.
- [22] Dick R P. Soil enzyme activity as biodiversity measurements as integrating biologic indicators [A]. Doran J W (Ed). Handbook of methods for assessment of soil quality [C]. Madison : SSSA Spec. Pub 49. Soil Soc. Am. Special Publication pub , 1996. 247–272.
- [23] Dick R P , Myrold D D , Kerle E A. Microbial biomass and soil enzyme activities in compacted and rehabilitated skid trail soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J. , 1988 , 52 : 512–516.
- [24] Martens D A , Johnson J B , Frankenberger W T. Production and persistence of soil enzyme with repeated addition of organic residues [J]. Soil Sci. , 1992 , 153 : 53–61.
- [25] Bergstrom D W , Monreal C M , Tomlin A D *et al.* Interpretation of soil enzyme activities in a comparison of tillage practices along a topographic and textural gradient [J]. Can. J. Soil Sci. , 2000 , 80 : 71–79.
- [26] 李焕珍, 张忠源, 杨伟奇, 等. 玉米秸秆直接还田培肥效果的研究 [J]. 土壤通报, 1996, 27(5): 213–215.
Li H Z , Zhang Z Y , Yang W Q *et al.* The effect of rice straw returning to soil fertile [J]. Chin. J. Soil Sci. , 1996 , 27(5): 213–215.
- [27] 周瑞莲, 张善金, 徐长林, 等. 高寒山区火烧土壤对其养分含量和酶活性影响及灰色关联分析 [J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 89–96.
Zhou R L , Zhang S J , Xu C L *et al.* Effectes of burning turf on nutrient contents and enzymatic activity of alpine meadow soil and its grey relationship analysis [J]. Acta Pedol. Sin. , 1997 , 34(1): 89–96.
- [28] 周礼恺, 张志明, 曹承绵. 土壤酶活性的总体在评价土壤肥力水平中的作用 [J]. 土壤学报, 1983, 20(4): 413–417.
Zhou L K , Zhang Z M , Cao C M. On the role of the totality of soil enzyme activities in the evaluation of the level of soil fertility [J]. Acta Pedol. Sin. , 1983 , 20(4): 413–417.