植物营养与肥料学报 2003,9(1):9～13
Plant Nutrition and Fertilizer Science

黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究

Ⅰ. 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响

樊　军,郝明德
(中国科学院水利部水土保持研究所、西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌　712100)

摘要:在黄土高原旱作条件下,对连续轮作、施肥15年后不同处理过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶活性进行了测定。结果表明,长期轮作施肥降低了旱地黑垆土的过氧化氢酶活性,以长期不种作物的休闲地酶活性最高,各处理比休闲地降幅为1.2%～20.6%。其它4种酶的活性则比休闲地有不同程度提高,蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶活性分别增加26.0%～138.3%、22.5%～321.7%、31.4～157.8%、15.2%～483.3%。有机肥的作用明显大于化肥,豆科作物苜蓿、豌豆、红豆草等对土壤酶活性的影响大于小麦、玉米等禾本科作物。

关键词:长期定位试验;土壤酶活性;旱地
中图分类号:S147.2;S154.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1008-505X(2003)01-0009-05

Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the Loess Plateau

Ⅰ. Effect of crop rotation and continuous planting on soil enzyme activities

FAN Jun, HAO Ming-de
(*Inst. of Soil and Water Conservation, CAS, Northwestern Sci-tech Univ. of Agric and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The effect of long-term crop rotation and fertilization on the activity of enzymes in soil was studied. Soil samples (0～20 cm) were collected from plots where various crop and rotation combinations had been continuously applied to a black loessial soil (for 15 years). The results indicated that long-term rotation and fertilization reduced catalase activity by 1.2%～20.6% compared with fallow treatment. Other soil enzyme activities including invertase, urease, alkaline phosphatase, and protease increased by 26.0%～138.3%, 22.5%～321.7%, 31.4～157.8%, and 15.2%～483.3% after different fertilizers were applied and different plants were cropped for 15 years continuously. The effect of organic manure on soil enzyme activities was higher than that of chemical fertilizer and the enzyme activities affected by alfalfa, pea, and sainfoin (*Onobrychis sativa*) were higher than that of wheat and maize.

Key words: long-term experiment; soil enzyme activity; dry land

种植作物因残茬及根系而对土壤酶活性产生影响;施入化肥对土壤养分循环有所改善并给土壤留下更多的残留物,施有机肥不但增加了土壤有机C含量,而且带入丰富的微生物与酶,对土壤酶活性影响显著;有机肥与化肥配合施用不仅提供了丰富的有机C,而且化肥还可调节土壤营养元素的比例,为微生物的活动与酶活性的提高创造条件。这些结论在以往的短期试验,如袁玲等[1]在紫色水稻土与关松荫[2]在潮土上的试验已得到证实。

增加有机残体、作物及动物粪便等通常可增加土壤的生物学活性。施有机肥可增加土壤微生物量与酶活性,施无机肥可增加作物的生物产量,也可增

收稿日期:2001-12-11
基金项目:中国科学院知识创新方向性项目(KZCX2-413);中国生态网络研究项目(CERN)资助。
作者简介:樊军(1974—),男,陕西省府谷县人,在职博士研究生,主要研究土壤水分、养分利用及其在土壤中的运移。

加每年归还到土壤中的有机残体(如落叶、根),它们可以刺激并提高土壤生物学活性。植物根量增加不仅可产生更多腐解物,而且可提供更多的根系分泌物,从而为微生物提供一个更适宜的生长环境。有机物的增加可提高土壤酶活性,改善土壤结构,提高生产力,且增加的酶活性在土壤生态系统中能够促进养分循环[3]。长期施用无机肥料对土壤酶活性的影响很不相同,栽培措施、施入土壤的植物残体的数量和土壤腐殖质状况等起着关键作用[4,5]。土壤有机物的增加通常比矿质肥料对微生物数量有较大的影响[6~8],因为有机质是土壤微生物的碳源与能源[9]。

据报道,有机肥和无机肥配施的效果最佳,能够较多地增加脲酶、转化酶、过氧化氢酶、磷酸酶等的活性。尿素与有机肥料配合对土壤脲酶、过氧化氢酶活性影响比单施尿素明显[1,10,11]。李科江[12]通过15年的定位试验研究不同施肥条件对作物产量及土壤养分供应的影响,结果表明,各施肥处理均不同程度地促进了土壤全量养分和速效养分的增加;有机肥对土壤有机无机复合状况及腐殖质结合形态有较好的效果,能提高土壤水分含量、改善土壤物理性状、增加土壤团聚体的含量、促进微团聚体的形成、提高团聚度和团聚水平。这些结果均有利于土壤酶活性的提高,也证明酶活性的确能很好地表征土壤肥力水平。

黄土高原石灰性黑垆土 $CaCO_3$ 含量高,pH 呈碱性,土层疏松,养分贫瘠,并经常受干旱胁迫,为此,研究土壤生物学性质对养分循环与作物对逆境的抵抗能力有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验位于黄土高原中南部陕西省长武县十里铺村无灌溉条件的塬面旱地上。年均气温 9.1℃,无霜期 171 d。年平均降水量为 584 mm,季节性分布不均,7~9 月降水占全年降水量的 55%。供试土壤为黄盖黑垆土,耕层土壤有机 C 含量为 10.5 g/kg,全 N 0.80 g/kg,土壤碱解 N 37.0 mg/kg,有效 P 2.0 mg/kg,pH(H_2O)8.24,土壤肥力水平较低,K 素丰富,N、P 俱缺。

1.2 试验设计

长期轮作培肥试验开始于 1984 年,共 36 个处理,108 个小区,小区面积 66.67 m^2,3 次重复,采用顺序排列法进行排列。本研究选取其中 27 个处理:苜蓿连作施肥 3 个处理(CK、P、NPM);小麦连作施肥 8 个处理(CK、P、M、PM、NM、NP、N、NPM);玉米连作施肥处理 1 个(NPM);粮草长周期 8 年轮作(苜蓿-苜蓿-苜蓿-苜蓿-马铃薯-小麦-小麦-小麦 + 苜蓿)8 个处理(选择当年为小麦、马铃薯、苜蓿茬口的 3 个处理);粮草短周期 3 年轮作(红豆草-小麦-小麦 + 红豆草)3 个处理;粮豆 3 年轮作(豌豆-小麦-小麦 + 糜子)3 个处理;粮豆轮作施肥 4 个处理(CK、P、NP、NPM)NP 处理与粮豆 3 年轮作相同;粮饲(玉米-小麦-小麦 + 糜子)轮作施肥 2 个处理(NPM、NP);休闲地处理 1 个。轮作试验各轮作系统施肥量(NP)相同,各处理进行定期除草和松土,并按设计要求施肥:N(尿素)120 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,$P_2O_5$(过磷酸钙)60 $kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,M(厩肥)75 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,所有肥料在播种时一次性施入,田间管理同大田。供试作物品种及其生育期见表 1。

表 1 供试作物品种及其生育期

Table 1 Experimental varieties and their growth stages

作物 Crop	品种 Variety	播种 Seeding	收获 Harvest
小麦 Wheat	秦麦 4 号(1984~1985),长武 131(1986~1995),长武 134(1996) Qinmai 4(1984~1985), Changwu 131(1986~1995), Changwu 134(after 1996)	9 月中旬 Mid Sep.	次年 6 月下旬 Late Jun.
玉米 Maize	中丹二号或丹玉 13 Zhongdan 2 or Danyu13	4 月中旬 Mid Apr.	9 月中旬 Mid Sep.
糜子 Millet	当地农家品种 Native	7 月上旬 Early Jul.	10 月上旬 Early Oct.
马铃薯 Potato	沙杂、虎头或农家品种 Shaza, Hutou or native	4 月中旬 Mid Apr.	8 月下旬 Late Aug.
豌豆 Pea	白豌豆 White pea	3 月中旬 Mid Mar.	7 月上旬 Early Jul.
红豆草 Sainfoin	宁夏固原县引 From Guyuan	7 月~8 月 Jul.~Aug.	次年 7 月与 9 月各割一次 Jul. and Sep. of next year.
紫花苜蓿 Alfalfa	本地种 Native		6 月上旬与 8 月下旬各割一次 Early Jun. and late Aug.

1.3 分析测定方法

试验于1999年9月冬小麦播种前采集各处理0～20 cm土壤样品,风干过筛,测定有关酶活性,并统计冬小麦产量。

过氧化氢酶活性用高锰酸钾滴定法测定,以0.1 mol/L $KMnO_4$ mL/g (25℃,20 min)表示,蔗糖酶活性用滴定法测定,以0.1 mol/L $Na_2S_2O_3$ mL/g (37℃, 24 h)表示,脲酶活性以靛酚比色法测定,以 NH_3-N mg/g (37℃, 24 h)表示,磷酸酶活性以苯磷酸二钠法测定,以酚 mg/g (37℃, 24 h)表示,蛋白酶活性以Hoffmann铜盐比色法测定,以 NH_2-N mg/g,风干土(37℃,24 h)表示酶活性。

2 结果与分析

2.1 过氧化氢酶活性

过氧化氢酶参与生物的呼吸代谢,同时可以解除在呼吸过程中产生的对活细胞有害的过氧化氢。它可以表示土壤氧化过程的强度[13,14]。

长期轮作与施肥土壤的过氧化氢酶活性均较休闲地处理有不同程度的降低,与过氧化氢酶活性最高的休闲地相比,降低幅度在1.2%～20.6%(表2)。

表2还看出,施有机肥增加土壤有机C含量,但却降低了土壤过氧化氢酶活性。不同种植方式中不同施肥处理的过氧化氢酶活性大小不同。苜蓿连作施肥为P>CK>NPM;粮豆轮作施肥为CK>NP>P>NPM;粮饲轮作施肥为NP>NPM;小麦连作施肥为CK>NP>N>NM>P>M>PM>NPM。但3个不同作物轮作体系中,同为施NP处理,其当季茬口的过氧化氢酶活性差异并不明显。

表2　轮作与施肥系统土壤酶活性

Table 2　The soil enzyme activities under crop rotation and fertilization conditions

处理 Treatment			Cat.	Inv.	Ur.	Pho.	Pro.
休闲地 Fallow			17.51	3.74	1.57	0.87	0.11
粮草轮作(8年)	小麦 Wheat		16.13	6.61	2.34	1.39	0.29
Food-forage rotation (8 yr.)	洋芋 Potato	NP	16.08	6.91	3.11	1.43	0.29
	苜蓿 Alfalfa		16.95	8.91	3.26	1.71	0.45
粮草轮作(3年)	麦+红豆草 Wheat+Sainfoin		16.77	8.62	3.89	1.60	0.33
Food-forage rotation (3 yr.)	小麦 Wheat	NP	16.52	7.76	3.32	1.44	0.30
	红豆草 Sainfoin		16.50	7.74	3.21	1.45	0.35
粮豆轮作	小麦 Wheat		16.04	7.34	3.49	1.45	0.29
Food-legume rotation	豌豆 Pea	NP	15.91	7.06	3.17	1.28	0.25
	麦+糜子 Wheat+Millet	NP	15.71	7.91	3.41	1.68	0.30
粮豆轮作,施肥	麦+糜子 Wheat+Millet	NPM	13.91	6.30	6.64	1.98	0.49
Food-legume rotation,	麦+糜子 Wheat+Millet	P	15.44	5.99	2.93	1.18	0.17
fertilization	麦+糜子 Wheat+Millet	CK	16.69	5.66	2.19	1.23	0.13
粮饲轮作,施肥	麦+糜子 Wheat+Millet	NP	16.17	7.13	3.04	1.55	0.28
Food-forage rot., fertilization	麦+糜子 Wheat+Millet	NPM	14.69	7.00	5.90	1.64	0.49
玉米连作 Maize succession		NPM	15.04	4.71	5.10	1.58	0.41
苜蓿连作 Alfalfa succession		CK	16.86	8.39	4.59	1.94	0.45
		P	17.26	7.56	4.62	1.71	0.49
		NPM	16.42	8.14	6.40	2.23	0.66
小麦连作 Wheat succession		CK	17.31	5.67	1.93	1.15	0.17
		P	16.06	5.97	2.07	1.14	0.17
		N	16.97	5.53	2.80	1.16	0.15
		M	15.27	6.20	4.27	1.59	0.41
		NP	17.01	6.80	3.24	1.47	0.26
		PM	15.25	5.82	3.90	1.56	0.37
		NM	16.54	5.96	4.18	1.74	0.41
		NPM	14.33	6.45	5.07	1.50	0.49
平均 Mean			16.12	6.74	3.69	1.51	0.33
标准差 SD			0.92	1.21	1.31	0.29	0.14

注(Note):Cat-过氧化氢酶 Catalase;Inv-蔗糖酶 Invertase;Ur-脲酶 Urease;Pho-碱性磷酸酶 Alkali-phosphatease;Pro-蛋白酶 Protease.

为进一步证实有机肥施用能降低旱地土壤过氧化氢酶活性,将不同浓度的 H_2O_2(0.3%,0.4%,0.5%,0.6%,0.8%)加到不同的施肥处理土壤中,25℃、20min后测定剩余的 H_2O_2 量,测得不同施肥处理土壤对 H_2O_2 分解量。同一处理土壤随着加入 H_2O_2 浓度的增加,分解量也增加,并且不同施肥处

理分解 H_2O_2 的量在同一浓度下不同，表现为休闲地>N>P>M>NPM，N、P 处理与休闲地之间差异随 H_2O_2 浓度增加不明显，M、NPM 处理与休闲地间随 H_2O_2 的浓度增加相差明显，N、P、休闲地处理以直线增加，而 M 与 NPM 处理更符合对数增加。证实长期施以牲畜粪为主的有机肥的确使土壤分解 H_2O_2 能力降低。这与有些研究者的结论相反，因为土壤催化 H_2O_2 分解是一种比较复杂的现象，与土壤的机械组分有很大关系，土壤中的铁、锰化合物对所述的催化作用有很大的影响，对旱地石灰性土壤来说，其它因素对 H_2O_2 的分解作用可能高于过氧化氢酶的分解作用。

2.2 蔗糖酶活性

蔗糖酶是土壤中参与 C 循环的一种重要的酶，被广泛用于表征土壤中生物化学过程的动向与强度。许多研究发现蔗糖酶活性与有机 C、全 N、有效 P 等土壤养分状况有密切相关性，蔗糖酶活性是土壤的生物学指标之一[13]。

处理中常年不种作物的休闲地的蔗糖酶活性最低，长期轮作与施肥后较休闲地增加 26.0%～138.3%，但较高的蔗糖酶活性并没有出现在各种植体系施 NPM 或 M 的处理，尽管有机肥能提高土壤有机 C 含量。不同种植方式中不同施肥处理的蔗糖酶活性大小也不相同。苜蓿连作施肥表现为 CK>NPM>P；粮豆轮作施肥为 NP>NPM>P>CK；粮饲轮作为 NP>NPM；小麦连作为 NP>NPM>M>NM>P>PM>CK>N(表 2)。

苜蓿连作有利于蔗糖酶活性提高；粮草轮作与粮豆轮作提高蔗糖酶活性的作用超过小麦连作与粮饲轮作，因为豆科作物根系含有较多的蔗糖酶，且能分泌富含 N 素的物质，有利于土壤微生物的繁殖。

以土粪为主的有机肥对土壤蔗糖酶活性的影响比对其它酶的影响小。一方面是因为牲畜粪中的蔗糖酶含量远低于其它几种酶[15]，并且绝大部分是来自累积在土壤中的蔗糖酶，而不是微生物增殖生成的酶；累积在土壤中的蔗糖酶主要以完整的死细胞和非增殖的活细胞结合的形式存在，而不是从细胞释出，然后以吸附的形式存在[16]，受土壤有机-无机复合胶体的影响不显著。另一方面是因为蔗糖酶活性不仅与土壤有机 C 含量有关，而且与有机 C 存在状态有关。

2.3 脲酶活性

脲酶是对尿素转化起关键作用的酶，因此脲酶活性与土壤供 N 能力有密切的关系，对施入土壤尿素的利用率影响很大。

表 2 看出，轮作与施肥比休闲地脲酶活性增加了 22.5%～321.7%。连作与轮作中施有机肥使脲酶活性提高的幅度大于施化肥。苜蓿连作施肥显然有利于脲酶活性的提高，即使不施肥处理，其脲酶活性也比连作小麦的高出 2.66 mg/g。连作体系中，不同施肥对脲酶活性影响显著。苜蓿连作为 NPM>P>CK；小麦连作施肥为 NPM>M>NM>PM>NP>N>P>CK；粮豆轮作施肥为 NPM>NP>P>CK；粮饲轮作为 NPM>NP。

2.4 磷酸酶活性

旱地黑垆土中碱性磷酸酶的活性比中性、酸性磷酸酶活性平均高 4.4 倍(表 3)。原因是土壤的 pH 值在 8.5 左右，在碱性条件下，磷酸酶分解底物的能力明显高于在中性和酸性条件。比较不同施肥处理 3 种磷酸酶活性发现，小麦连作不同施肥对 3 种磷酸酶活性的影响规律基本一致。对旱地黑垆土酶活性进行分析时，碱性磷酸酶活性比酸性或中性磷酸酶活性更能表现处理间的差异。

表 3 不同 pH 条件下土壤磷酸酶活性

Table 3 Soil phosphatase activities at different pH values

处理 Treatment	pH=5.0	pH=7.0	pH=10.0
NPM	0.52	0.52	1.50
NP	0.37	0.34	1.47
P	0.25	0.22	1.14
N	0.28	0.26	1.16
M	0.53	0.47	1.65
CK	0.25	0.23	1.18
休闲地 Fallow	0.14	0.15	0.87
PM	0.45	0.39	1.56
NM	0.53	0.41	1.74

种植作物与施肥对土壤磷酸酶活性均有提高作用，平均比休闲地增加 31.4%～157.8%(表 2)。但不同种植制中施肥的效果有所不同，苜蓿连作为 NPM>CK>P；小麦连作为 NM>M>PM>NPM>NP>N>CK>P；粮豆轮作为 NPM>NP>P>CK；粮饲轮作为 NPM>NP；休闲地磷酸酶活性最低。

2.5 蛋白酶活性

种植作物及施肥能不同程度地提高蛋白酶活性，与休闲地相比，提高幅度为 15.2%～483.3%(表 2)。小麦连作的 CK、N、P 处理比休闲地略提高，而 NP、PM、NM、NPM 处理则明显高于休闲地，显然施有机肥对蛋白酶活性的作用大于施化肥。连作小麦与粮豆轮作的 CK、P 处理由于长年不施 N

肥使土壤 N 素水平相对较低,蛋白酶合成受到限制,这种作用在脲酶、碱性磷酸酶活性上也有表现。但是在苜蓿或豌豆等豆科作物上,这种作用因为作物的固氮作用而变得不明显[17,18]。

3 小结

长期轮作施肥对土壤酶活性的影响是一个长期过程,经过 15 年的种植施肥,土壤生化性质发生了明显变化,但轮作体系与施 NP 肥处理之间的茬口差异不大,这与体系中作物的长期反复种植有关。

综合比较 5 种酶活性在不同种植体系中的差异会发现,粮草 8 年轮作中,当季苜蓿茬口的 5 种酶活性高于小麦与马铃薯茬;除过氧化氢酶活性外,其它 4 种酶活性均是马铃薯茬高于小麦茬。粮草 3 年轮作中,过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性表现为小麦+红豆草茬>小麦茬>红豆草茬;粮豆轮作中脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶、蛋白酶活性为糜子茬>小麦茬>豌豆茬。施肥相同、长期连作的不同作物土壤酶活性之间也有差异,过氧化氢酶活性与碱性磷酸酶活性为苜蓿>玉米>小麦;而蔗糖酶、脲酶、蛋白酶活性则为苜蓿>小麦>玉米。小麦与苜蓿连作的 2 个 CK 处理除过氧化氢酶活性接近外,其余均为苜蓿>小麦;而单施 P 处理的 5 种酶活性均为苜蓿>小麦。可见苜蓿对土壤酶活性的提高作用显然大于小麦与玉米。总之,豆科作物苜蓿、豌豆、红豆草等对土壤酶活性影响程度大于小麦与玉米等禾本科作物,这是因为豆科作物根系可以释放较多的酶,并给土壤留下了更多富含 N 素的有机残体,后者在土壤中分解后,使土壤含有较多的 N 素及其它化合物,促进了土壤生物学活性的增强。

从以上分析表明,长期施肥使耕层几种酶活性明显增强,肥力相应提高。施肥增产的原因不仅在于补充了土壤养分的不足,更重要的在于肥料中的有效养分为微生物提供了能源与基质,使土壤生化过程活跃起来。酶活性的增强促进了土壤代谢作用,从而使土壤养分所处的形态发生变化,提高了土壤肥力,改善了土壤性质,有利于保持生产力水平的可持续性。干旱贫瘠土壤中作物生长发育所需的养分除施肥提供外,还有土壤有机质分解转化提供的养分。在这个过程中,参与土壤生化反应的酶活性起重要作用,同时也影响施入土壤中肥料的去向。

长期轮作施肥对土壤酶活性有明显影响,轮作施肥中施有机肥有利于土壤有机 C 含量的增加和土壤生物学活性的增强,为作物稳产高产创造良好的土壤生化环境,因为有机肥本身一方面带有外源酶,另一方面为土壤生物创造了良好的生活环境而有利于土壤酶活性的提高,因此施有机肥在旱地土壤有很好的培肥增产效果。

参 考 文 献:

[1] 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.

[2] 关松荫. 土壤酶活性影响因子的研究. Ⅰ 有机肥料对土壤中酶活性及氮磷转化的影响 [J]. 土壤学报, 1989, 26 (1): 72-77.

[3] Martens D A, Johanson J B and Frankenberger Jr. W T. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues [J]. Soil Sci., 1992, 153: 53-61.

[4] Juma N G and Tabatabai M A. Comparison of kinetic and thermodynamic parameters of phosphomonoesterases of soils of corn and soybean roots [J]. Soil Biol. Biochem., 1988, 20: 533-539.

[5] Chantigny M H, Angers D A and Beauchamp C J. Active carbon pools and enzyme activities in soils amended with de-inking paper sludge [J]. Can. J. Soil Sci., 2000, 80: 99-105.

[6] Dick R P, Rasmussen P E and Kerle E A. Influence of long-term reside management on soil enzyme activities in relation to soil chemical properties of a wheat-fallow system [J]. Biol. Fertil. Soils, 1988, 6: 159-164.

[7] Bolton H, Elliott L F, Papendick R I and Bezdicek D F. Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: Effect of fertilization and cropping practices [J]. Soil Biol. Biochem., 1985, 17: 297-320.

[8] McGill W B, Cannon K R, Robertson, J A. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations [J]. Can. J. Soil Sci., 1986, 66: 1-19.

[9] Tale Ⅲ R L. Function of protease and phosphatase activities in subsidence of Pahokee muck [J]. Soil Sci., 1984, 138: 271-278.

[10] 李军,孙宏德,尚惠贤,等. 黑土酶的活性与施肥和产量相关性分析[J]. 土壤通报, 1986, 17 (6): 280-283.

[11] 任祖淦,陈玉水,唐福钦,等. 有机无机肥料对土壤微生物和酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2 (6): 179-283.

[12] 李科江,张素芳,贾文竹,等. 半干旱区长期施肥对作物产量和土壤肥力的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5 (1): 21-25.

[13] 周礼恺. 土壤酶学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[14] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力的关系 [J]. 土壤肥料, 1980, (2): 19-21.

[15] 周礼恺,张志明,陈恩凤. 黑土的酶活性 [J]. 土壤学报, 1981, 18 (2): 158-165.

[16] Pang P C K and Kolenko H. Phosphomonoesterase activity in forest soils [J]. Soil Biol. Biochem., 1986, 18: 35-40.

[17] Campbell C A, Brandt S A, Biederbeck V O *et al*. Effect of crop rotations and rotation phase on characteristics of organic matter in a Dark Brown Chernozemic soil [J]. Can. J. Soil Sci., 1992, 72: 403-416.

[18] Collins H P, Rasmussen P E and Douglas Jr. C L. Crop rotation and residue management effects on soil carbon and microbial dynamics [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 783-788.