

黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究

Ⅱ. 土壤酶活性与土壤肥力

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: 本文分析了长期试验土壤酶活性与土壤有机 C、全 N、有效 P 含量、主要微生物类群之间的关系。相关分析表明, 土壤脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶活性随土壤有机 C 含量的增加而增加, 蔗糖酶、过氧化氢酶活性与有机 C 之间的关系因施肥种类及种植方式的不同而不同; 微生物数量仅真菌与脲酶、蛋白酶活性之间的相关性达到显著水平。除过氧化氢酶外, 其它 4 种酶的活性均与当年种植冬小麦处理的产量存在显著相关关系。利用主成分分析与通径分析揭示了土壤酶活性与养分之间的内在关系及酶活性对土壤养分的影响。根据主成分分析结果, 旱地土壤肥力状况用脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶活性作为综合评价指标优于过氧化氢酶与蔗糖酶。

关键词: 长期试验; 土壤酶活性; 主成分分析; 通径分析

中图分类号: S154.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2003)02-0146-05

Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the loess plateau

Ⅱ. Relationship between soil enzyme activities and soil fertility

FAN Jun, HAO Ming-de

(Inst. of Soil and Water Conservation, CAS and Northwestern Sci-tech University
of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The correlation between soil enzyme activities and other soil properties was studied. The results of correlation analysis showed that soil organic C was correlated very highly significantly with urease activity ($r = 0.9384^{**}$), alkaline phosphatase activity ($r = 0.7854^{**}$), and protease activity ($r = 0.9105^{**}$), and the interrelationship between catalase, invertase activities and organic C content varied with fertilization and cropping patterns. The amount of fungi was significantly correlated with urease and protease activities, and the yield of winter wheat was significantly correlated with urease, alkaline phosphatase and protease activities except catalase. In this paper, the relationship between soil enzyme activities and nutrient factors and the effects of soil enzyme activities on soil nutrient content were analyzed by Principal Components Analysis (PCA) and Path Analysis (PA). According to the results of PCA, urease, alkaline phosphatase, and protease activity could be a better index to evaluate soil fertility in dry land than catalase and invertase activity.

Key words: long-term experiment; soil enzyme activity; Principal Components Analysis; Path Analysis

土壤质量、土壤污染与环境功能等问题备受关注, 运用微生物量、酶活性等土壤生物学指标对土壤退化及土壤污染进行评价成为研究热点^[1~4]。施

肥可影响甚至改变土壤养分循环, 同时也影响与后者相关的一些酶的活性。一般情况下, 土壤蛋白酶、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶活性与土壤有机 C、全 N 含量

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, 主要从事土壤水分、养分利用及其在土壤中的运移研究。

有非常好的相关关系^[5~10]。土壤酶活性可用来表征因农业措施而导致的土壤性质的早期变化。尽管在不同土壤类型条件下土壤酶活性与土壤质量之间的关系还没有明确,但土壤中许多酶与微生物呼吸、微生物种类及数量、有机 C 含量之间存在着显著的相关关系^[11~15]。Monreal 认为,用包含几个酶活性的生物因子可以表征土地利用对土壤有机质的氧化、C/N 养分的矿化,并将酶活性分成 7 级来评判农业土壤生产力水平高低^[16];Bergstrom 等认为,脲酶与脱氢酶活性可以作为土壤生化性质的评价指标^[13]。其它一些国内外学者也认为土壤酶活性可以表征土壤生物活性的高低,用它作为土壤质量改变的早期预测指标是可行的^[17~22]。

土壤微生物与土壤肥力的关系及其在物质循环中的作用已有大量研究。近年的研究表明,土壤微生物能够帮助植物适应养分胁迫环境,改善土壤养分的吸收利用^[23,24]。本项研究在长期试验基础上分析土壤酶活性与土壤其它性质及产量的关系,旨在探索旱作条件下土壤酶在土壤养分转化中的作用,并应用数学方法来分析土壤酶活性与土壤肥力之间的关系,以期对旱田土壤肥力评价与施肥增产提供理论依据。

1 材料与方法

试验区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,多年均气温 9.1℃,无霜期 171d。多年平均降水量为 584mm,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,土壤肥力水平较低,K 素丰富,N、P 欠缺。

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 66.67m²,均为 3 次重复,采用顺序排列法进行排列。本研究于 1999 年 9 月采集其中 27 个处理土壤 0~20cm 土层样进行研究(具体设计方案见论文 I. 长期轮作与施肥对土壤酶活性的影响,见本刊 9 卷 1 期第 10~11 页)。

2 结果与分析

2.1 相关分析

2.1.1 酶活性与养分含量的关系 过氧化氢酶活性与有机 C、全 N 均为极显著的负相关关系,随土壤有机质累积,有机 C、全 N 的增加,过氧化氢酶活性降低(表 1)。过氧化氢酶活性与全 N 显著相关,可能因为有机 C 与全 N 存在着极显著的相关关系, $r=0.9776$ 。过氧化氢酶活性与 C/N 显著负相关,与有效 P 有极显著的负相关关系($r=-0.9309$)。说明

旱地农田过氧化氢酶的水平不但与有机 C 含量有关,而且与有效 P 的关系密切,这可能是土壤中大量磷酸根离子对过氧化氢酶活性的抑制。Brookes 认为^[25],过氧化氢酶的辅基会遭到施入肥料中阴离子的封阻。这方面的深入解释有待进一步研究。

蔗糖酶活性与有机 C、全 N、C/N、有效 P 含量相关系数很低,均未达显著水平。脲酶活性与 4 个养分含量指标之间均达极显著相关,与有机 C、全 N 相关系数为 0.9384、0.9217,说明脲酶在土壤 C、N 转化过程中作用很大,同时对土壤 P 素转化也有影响。碱性磷酸酶活性与有机 C、全 N 达极显著相关,与 C/N、有效 P 相关未达到显著水平。蛋白酶活性与有机 C、全 N 达极显著相关,与 C/N、有效 P 达显著相关,同样蛋白酶对土壤 C、N 循环非常重要。可见脲酶与蛋白酶参与土壤 N 素循环,有重要作用。

2.1.2 酶活性与微生物的关系 过氧化氢酶活性与微生物量 C、N 呈显著负相关,与真菌数量呈极显著负相关。蔗糖酶活性与微生物量呈显著正相关,但与三类微生物数量相关均未达显著水平。脲酶、蛋白酶、碱性磷酸酶活性与微生物量 C、N 均呈极显著正相关。过氧化氢酶活性与真菌数量呈极显著负相关,蔗糖酶活性与三类微生物数量相关均未达显著水平。脲酶活性与真菌数量极显著正相关,蛋白酶活性与真菌数量显著相关(表 1)。从试验相关分析发现,微生物数量仅真菌与一些酶相关达到显著水平,数量占优势的细菌、放线菌与酶活性相关系数都小,酶活性与微生物数量不相关或不显著相关,这可能是由于平板记数法并不能准确反映土壤中微生物数量;酶在自然状态下主要以胞外酶形式存在,与微生物群体关系不密切;培养基的选择性,所测得的微生物不是实际数量的全部;土壤中的酶来源于其它途径如:植物根系、残体与土壤动物^[26]等。

2.1.3 酶活性之间的关系 土壤酶活性之间也存在一定线性相关关系(表 1)。脲酶与碱性磷酸酶活性极显著相关表明,土壤中 N 素的转化与 P 素的转化是相互影响的。蛋白酶与蔗糖酶活性显著相关及与脲酶、碱性磷酸酶活性极显著相关表明,土壤中多糖的转化、有机 P 的转化与 N 素循环之间关系密切并相互影响。土壤酶活性之间相互关系表明,土壤酶在酶促土壤有机物质转化中不仅显示专性特性,同时也存在共性关系。酶的专性能反映土壤中与某类酶相关的有机化合物转化进程,而有共性关系酶的总体活性在一定程度上反映土壤肥力水平高低^[6]。

2.1.4 酶活性与产量关系 酶活性除与化学性质有显著的相关关系外,与产量也密切相关。试验当年种植冬小麦的 15 个处理子粒产量与脲酶活性、碱性磷酸酶活性、蛋白酶活性呈极显著正相关($r =$

0.770^{**} , 0.903^{**} , 0.854^{**}),高于产量与有机 C (0.768)及全 N(0.778)的相关系数。产量与蔗糖酶活性呈显著正相关($r = 0.599^{*}$)。另外土壤放线菌数量与产量相关也达到显著水平($r = 0.544^{*}$)。

表 1 土壤酶活性与其它土壤因素的相关矩阵(r)

Table 1 Correlation matrix (r-values) between soil enzyme activities and other soil properties

	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)	X(9)	X(10)	X(11)	X(12)	X(13)	X(14)
X(1)	1.0000	0.9776**	0.6109**	0.6587**	-0.5742**	0.1930	0.9384**	0.7854**	0.9105**	0.0295	0.4752*	0.3249	0.7113**	0.7040**
X(2)		1.0000	0.4321*	0.5847**	-0.5281**	0.3103	0.9217**	0.8303**	0.9292**	-0.0256	0.4965**	0.3443	0.7745**	0.7393**
X(3)			1.0000	0.5960**	-0.4388*	-0.3204	0.5497**	0.2533	0.4200**	0.2083	0.1542	0.1075	0.1340	0.2422
X(4)				1.0000	-0.9309**	-0.1936	0.6252**	0.2538	0.4120*	0.3033	0.4998**	0.2815	0.3192	0.4386*
X(5)					1.0000	0.1220	-0.5835**	-0.2778	-0.3770	-0.1531	-0.5265**	-0.3423	-0.4255*	-0.4777*
X(6)						1.0000	0.2848	0.5980**	0.4788*	-0.2739	-0.0516	0.1654	0.5102**	0.4363**
X(7)							1.0000	0.8360**	0.8952**	-0.0361	0.5257**	0.3265	0.7366**	0.7825**
X(8)								1.0000	0.9049**	-0.2677	0.3638	0.4203*	0.8563**	0.7385**
X(9)									1.0000	-0.1531	0.3889*	0.3256	0.8010**	0.7318**
X(10)										1.0000	-0.2141	-0.2083	-0.3506	0.0550
X(11)											1.0000	0.2861	0.4232*	0.3563
X(12)												1.0000	0.5426**	0.3575
X(13)													1.0000	0.7138**
X(14)														1.0000

* * 0.01 水平显著, * 0.05 水平显著。 * * Correlation is significant at the 0.01 level. * Correlation is significant at the 0.05 level.

X_i(i=1~14)分别指有机 C、全 N、C/N、有效 P、过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶、细菌、真菌、放线菌、微生物量碳、微生物量氮。

X_i(i=1~14)means TOC, total N, C/N, available P, catalase, invertase, urease, alkaline phosphatase, protease, bacteria, fungi, actinomycetes, microbial carbon, and microbial nitrogen, respectively.

2.2 通径分析

酶对土壤养分影响作用的过程中,彼此之间并不是孤立的,而是存在着相互制约、互相促进的复杂关系,这种关系单纯从测定结果相关分析说明是不够的。通径分析是在各变量无量纲的基础上,计算通径系数,通过通径系数的大小与正负来表示自变量对因变量作用的大小与方向,且通径系数之间可进行相互比较,比相关分析可提供更多的信息。通径分析结果(表 2)显示,酶活性对土壤有机 C 直接影响的顺序为:蛋白酶>脲酶>蔗糖酶>过氧化氢酶>碱性磷酸酶,碱性磷酸酶与过氧化氢酶对有机 C 的影响主要是间接的。蔗糖酶对有机 C 的直接显著负影响被其通过蛋白酶的正向作用抵消,使总影响很小。脲酶对有机 C 的总影响通过蛋白酶的间接效应超过其直接效应。综合蛋白酶对有机 C 的较大直接作用系数及碱性磷酸酶对有机 C 的间接作用可以认为,脲酶、蛋白酶与有机质转化密切相关,其中蛋白酶超过脲酶;蔗糖酶对有机 C 含量有显著负效应。酶活性对全 N 直接影响作用的顺序为:蛋白酶>脲酶>蔗糖酶>碱性磷酸酶>过氧化氢酶,仅蛋白酶对全 N 的直接作用达到了极显著水平(0.6835);过氧化氢酶对全 N 直接影响未达显著

水平,但通过蛋白酶对全 N 间接效应而使其总影响达到显著水平(-0.5281),脲酶与碱性磷酸酶对全 N 的影响主要是间接效应。综合以上结果可看出,5 种酶活性与全 N 的关系主要由蛋白酶活性所决定,很显然蛋白酶因为直接参与 N 循环而成为旱地土壤影响 N 素转化的重要酶。脲酶与蛋白酶因为直接参与 N 素循环,其活性与土壤 C/N 显著正相关。脲酶主要是直接效应,蛋白酶则是通过脲酶较大的间接效应与较小的直接效应共同作用。但蔗糖酶活性与 C/N 的负相关未达显著。通径分析表明,蔗糖酶对 C/N 有较大的负效应。过氧化氢酶对有效 P 的总影响为负作用,达到极显著水平(-0.9309),且主要是直接效应(-0.7465)。蔗糖酶对有效 P 的影响只是通过碱性磷酸酶起较小的间接作用。蛋白酶通过脲酶对有效 P 的正效应被碱性磷酸酶的负效应抵消,使其对有效 P 的影响未达显著水平。碱性磷酸酶对有效 P 有显著的负直接效应(-0.3948),而其通过脲酶、过氧化氢酶、蛋白酶的间接作用抵消了这种负作用,使其与有效 P 的相关系数降到 0.2538 。说明土壤有效 P 的增加对碱性磷酸酶活性的确有抑制作用,只是因为酶活性间的相互影响而抵消了。

表 2 土壤酶活性与土壤养分含量的通径分析

Table 2 Path coefficients of enzyme activities affecting soil nutrient content

		X1→Y	X2→Y	X3→Y	X4→Y	X5→Y	相关系数(r)
有机 C Organic C R=0.973**	X1	-0.0872	-0.0243	-0.2191	0.0151	-0.2586	-0.5742**
	X2	-0.0106	-0.1994*	0.1069	-0.0324	0.3285	0.1930
	X3	0.0509	-0.0568	0.3754*	-0.0453	0.6142	0.9384**
	X4	0.0242	-0.1192	0.3138	-0.0542	0.6208	0.7854**
	X5	0.0329	-0.0955	0.3361	-0.0490	0.6861**	0.9105**
全 N Total N R=0.957**	X1	-0.1039	-0.0112	-0.1482	-0.0071	-0.2577	-0.5281**
	X2	-0.0127	-0.0920	0.0723	0.0153	0.3273	0.3103
	X3	0.0606	-0.0262	0.2540	0.0214	0.6118	0.9217**
	X4	0.0289	-0.0550	0.2123	0.0256	0.6184	0.8303**
	X5	0.0392	-0.0440	0.2274	0.0232	0.6835**	0.9292**
C/N R=0.760**	X1	0.0560	-0.0621	-0.3619	0.0959	-0.1667	-0.4388*
	X2	0.0068	-0.5091	0.1767	-0.2065	0.2117	-0.3204
	X3	-0.0327	-0.1450	0.6203	-0.2887	0.3958	0.5497**
	X4	-0.0156	-0.3045	0.5185	-0.3454	0.4001	0.2533
	X5	-0.0211	-0.2438	0.5553	-0.3125	0.4422	0.4200*
有效 P Avail. P R=0.957**	X1	-0.7465**	-0.0073	-0.2183	0.1097	-0.0684	-0.9309**
	X2	-0.0911	-0.0600	0.1066	-0.2361	0.0869	-0.1936
	X3	0.4356	-0.0171	0.3742	-0.3300	0.1625	0.6252**
	X4	0.2073	-0.0359	0.3128	-0.3948*	0.1643	0.2538
	X5	0.2814	-0.0287	0.3350	-0.3572	0.1816	0.4120*

注:Xi(I=1~5)分别指过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶,Y 为各土壤养分含量。
Note: Xi (I=1~5) means catalase, invertase, urease, alkaline phosphatases, protease, respectively; Y means total C, total N, C/N and available P.

2.3 土壤肥力因素的主成分分析

由 5 种酶活性值构成的土壤信息系统 I (表 3),显示其第一主成分的方差贡献率为 64.73%,加上第二主成分的方差贡献率达 89.03%。根据主成分分析原理,当累积方程贡献率大于 85%时,即可

用于反映系统的变异信息,可见用第一、第二主成分这两个因素即可代表系统内的变异状况。由主成分的组成因素可知,第一主成分综合了土壤中的脲酶、碱性磷酸酶、蛋白酶活性的变异信息,第二主成分综合了过氧化氢酶、蔗糖酶活性的信息。

表 3 主成分分析的特征根与方差贡献率
Table 3 The eigenvalues and percentages of PCA

土壤信息系统 Soil Information system	项目 Item	第一主成分 1st PC	第二主成分 2nd PC	第三主成分 3rd PC	第四主成分 4th PC
I 酶活性 Enzyme activity	特征根 Eigenvalue	3.2365	1.2151	-	-
	方差贡献率 Percentage	64.7304	24.3013	-	-
	累积方差贡献率 Cumul. percentage	64.7304	89.0317	-	-
II 酶活性 Enzyme activity 微生物 Microbes	特征根 Eigenvalue	5.2395	1.5940	1.1510	0.7611
	方差贡献率 Percentage	52.3947	15.9397	11.5098	7.6109
	累积方差贡献率 Cumul. percentage	52.3947	68.3344	79.8442	87.4551
III 酶活性 Enzyme activity 微生物 Microbes 化学性质 Chem. property	特征根 Eigenvalue	7.4441	2.4703	1.2398	0.8609
	方差贡献率 Percentage	53.1724	17.6452	8.8556	6.1494
	累积方差贡献率 Cumul. percentage	53.1724	70.8176	79.6732	85.8226

由酶活性与微生物学性质进行主成分分析获得的土壤信息系统 II 可以看出,前四个主成分的累积方差贡献率为 87.46%,第一主成分比系统 I 增加

了微生物碳、微生物氮的变异信息,第二主成分仍然为过氧化氢酶与蔗糖酶活性的信息。本研究所有因子分析得到的土壤信息系统 III 的主成分分析,其各

主成分在第一主成分增加有机 C 与全 N 变异信息,第三、四主成分中增加 C/N 信息,其余基本与系统 II 相同,四个主成分的累积方差贡献率达 85.82%。

将各处理土样的测定值分别代入主成分分析得到的主成分方程,得到各系统的主成分值,由主成分值的大小及各样品间距离可进行样品的聚类,结果显示 3 个土壤信息系统非常相似。试验中所有 CK 处理、所有单施 P 处理、休闲地及单施 N 处理在 3 个系统中的得分均较低,显示这些处理的肥力水平较低,而所有 NPM 处理与长期连作苜蓿不同施肥处理在 3 个系统中均得分较高,表明长期施 NPM 及苜蓿连作对土壤肥力的提高作用明显。

3 结论

根据相关分析的结果,土壤有机 C 与全 N、有效 P 等密切相关,同时与土壤几种酶活性关系非常密切,结合前人研究结果可以认为土壤中有有机 C 含量及其存在状况深刻地影响着土壤理化及生物学性质。土壤有机 C 所代表的有机质含量是旱地土壤肥力的物质基础,土壤酶活性依赖于有机质的存在,当有机质含量增加时,酶积极参与其转化分解过程,活性被提高。

土壤肥力的各因子之间存在着不同程度的相关关系,这种相关关系在很大程度上反映了构成土壤肥力的各重要因素,如土壤供肥能力、对逆境的适应能力等。通过定量分析可以得到土壤各方面所体现的能力因素的有关结论,明确这些结论有助于了解土壤肥力特点,从而有目的地采取措施培肥地力。然而土壤中众多的物理、化学、生物等因子之间相互作用,给土壤肥力的评价带来一定难度,应用数学方法可以综合各因子间的关系,有助于对所得结果的深入分析。

参考文献:

- [1] 赵其国. 土壤与环境问题国际研究概况及其发展趋向[J]. 土壤, 1998, 30 (6): 281-290.
- [2] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境. I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤, 1997, (3): 113-120.
- [3] 李阜. 当代土壤微生物学的活跃研究领域[J]. 土壤学报, 1993, 30 (3): 229-236.
- [4] 任天志. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33 (1): 68-75.
- [5] 曹承绵,李荣华,张志明,等. 红壤的酶活性与土壤肥力[J]. 土壤通报, 1986, 17 (7): 15-19.
- [6] 关松荫,沈桂琴,马昭鹏,等. 我国主要土壤剖面酶活性状况[J]. 土壤学报, 1984, 21 (4): 368-381.
- [7] Dick W A. Influence of long-term tillage and crop rotation combina-

- tion on soil enzyme activities[J]. Soil Soc. Am. J., 1984, 48: 569-574.
- [8] Zantua M I, Dumenil L C, Bremner J M. Relationships between soil urease activity and other soil properties [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1977, 41: 350-352.
- [9] 张志明,曹承绵,周礼恺. 耕作棕壤酶活性的研究[J]. 土壤学报, 1984, 21(6): 281-285.
- [10] 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.
- [11] Gagnon B, Lalande R, Simard R R, Roy M. Soil enzyme activities following paper sludge addition in a winter cabbage-sweet corn rotation [J]. Can. J. Soil Sci., 2000, 80: 91-97.
- [12] Abdul K S, Katayama A, Kimura M. Activities of some soil enzymes in different land use system after deforestation in hilly areas of west Lampung, South Sumatra, Indonesia [J]. Soil Sci. Plant Nutr., 1998, 44: 93-103.
- [13] Bergstrom D W, Monreal C M. Increased soil enzyme activities under two row crops [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1998, 62: 1295-1301.
- [14] Karlen D L, Wollenhaupt N C, Erbach D C *et al.* Long-term tillage effects on soil quality [J]. Soil Tillage Res., 1994, 32: 313-327.
- [15] Miller M and Dick R P. Thermal stability and activities of soil enzymes as influenced by crop rotations [J]. Soil Biol. Biochem., 1995, 27: 1161-1166.
- [16] 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.
- [17] Lalande R, Gagnon B, Simard R R. Microbial biomass and alkaline phosphatase activity in two composted amended soils [J]. Can. J. Soil Sci., 1998, 78: 581-587.
- [18] Insam H, Mitchell C C, Dormaar J F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols [J]. Soil Biol. Biochem., 1991, 23: 459-464.
- [19] Vekemans X, Godden B, Penninckx J. Factor analysis of the relationships between several physico-chemical and microbiological characteristics of some Belgian agricultural soils [J]. Soil Biol. Biochem., 1989, 21: 53-58.
- [20] 邱凤琼,周礼恺,陈恩凤,等. 东北黑土有机质和酶活性与土壤肥力的关系[J]. 土壤学报, 1981, 18 (3): 244-252.
- [21] 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(5): 413-418.
- [22] 陈恩凤,周礼恺,邱凤琼,等. 土壤肥力实质的研究 II. 棕壤[J]. 土壤学报, 1985, 22(2): 113-119.
- [23] 陈文新,胡正嘉. 土壤和环境微生物学[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1990.
- [24] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, Srivastava S C. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna [J]. Nature, 1989, 338: 499-500.
- [25] Brookes P C, Tate K R, Jenkinson D S. The adenylate energy charge of the soil microbial biomass [J]. Soil Biol. Biochem., 1983, 15: 9-16.
- [26] Doran J W, Fraser D G, Culik M N *et al.* Influence of alternative and conventional agricultural management on soil microbial processes and nitrogen availability [J]. Am. J. Alternative Agric., 1987, 2: 99-106.