

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*

唐玉姝^{1,2} 慈恩¹ 颜廷梅^{1†} 魏朝富² 杨林章¹ 沈明星³

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716)

(3 农业部苏州水稻土生态环境野外科学观测试验站, 江苏苏州 215001)

摘要 采用主成分分析法研究了太湖地区水稻土 25 a 长期定位试验稻麦两季的土壤酶活性与土壤肥力之间的相互关系。结果表明, 稻麦两季的脲酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、葡糖苷酶和芳基硫酸酯酶活性与肥力因子大都具有不同程度的显著线性相关关系。特别是酸性磷酸酶和葡糖苷酶, 其稻麦两季的酶活性与 pH、速效氮、速效磷和有机质之间均呈显著或极显著线性相关。结合土壤酶活性及肥力因子对稻麦两季 14 种处理进行分析, 筛选出影响土壤肥力的主要因子群并进行了综合评价: 土壤酶活性可作为反映土壤肥力的重要指标, 且磷酸酶、芳基硫酸酯酶和葡糖苷酶活性作为综合评价指标优于脲酶。氮磷肥配施是最优的培肥模式; 在施用其他肥料的基础上增施磷肥能够提高土壤肥力; 不施肥或仅施有机肥均会导致土壤肥力的退化; 秸秆还田可提高麦季土壤肥力水平, 而对稻季的无明显影响。

关键词 主成分分析; 土壤酶活性; 土壤肥力; 稻麦轮作

中图分类号 S154.2 **文献标识码** A

土壤酶是土壤营养代谢的重要驱动力^[1], 反映了土壤中各种生物化学活性的高低和土壤养分转化强度与方向, 其活性是土壤肥力评价的重要指标之一。长期定位试验能系统地研究土壤肥力演变和肥效变化规律, 克服因气候、年变化对施肥效果的影响^[2], 使各种施肥、耕作方式有更好的可比性^[1], 从而研究各种肥料对作物产量、品质的作用及对土壤肥力的效应^[2], 并进一步揭示土壤酶作用的机理及其与土壤肥力之间的关系^[3]。但在土壤肥力研究中往往具有多个彼此存在一定相关性的变量, 而主成分分析法可将各个因子化为少数几个综合因子并尽可能地保留原变量的信息量^[3], 且彼此之间互不相关, 而达到简化的目的。因此主成分分析法在近年来土壤酶和土壤肥力研究中得到了普遍的应用^[3-7], 但目前极少有针对长期定位试验稻麦两季的土壤酶活性与土壤肥力关系进行的系统研究。稻麦轮作是两个截然不同土壤环境的联

结, 且是我国广泛采用的农业耕作方式之一。本文采用主成分分析法, 对太湖地区 25 a 长期试验地的土壤酶活性与土壤肥力的关系进行系统研究, 以期了解稻麦两季不同施肥条件下作物稳产高产的土壤生物化学环境, 为长期定位试验土壤酶活性变化和土壤肥力评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验位于江苏太湖地区农科所的试验田区。土壤为该地区面积最大的微酸性重壤质黄泥土。试验始于 1980 年, 耕层土壤 (0 ~ 15 cm) 的基本理化指标如下: pH 6.7, 容重 1.26 g cm^{-3} , 有机质 24.2 g kg^{-1} , 全氮 1.43 g kg^{-1} , 全磷 (P_2O_5) 0.98 g kg^{-1} , 速效磷 (P_2O_5) 8.4 mg kg^{-1} , 速效钾和缓效钾分别为 127 mg kg^{-1} 和 237 mg kg^{-1} ^[8]。

* 国家自然科学基金项目 (40371073)、江苏省自然科学基金项目 (BK2005169)、国家科技支撑计划项目 (2006BAD17B06) 资助

† 通讯作者: 颜廷梅, 女, 山东泗水人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤生态和土壤微生物生态等方面的研究。E-mail: tmyan@issas.ac.cn

作者简介: 唐玉姝 (1982 ~), 女, 汉族, 四川南充人, 硕士, 主要研究方向为区域水土资源管理。E-mail: 0803@tom.com

收稿日期: 2007 - 03 - 05; 收到修改稿日期: 2007 - 08 - 03

试验为两因素随机区组设计,A因素有2个处理,即只施化肥区(代号C)和有机肥(猪粪)加化肥区(代号为M)。B因素有7个处理:不施肥(0),单施N肥(N),N、P肥(NP),N、K肥(NK),P、K肥(PK),N、P、K肥(NPK),N肥加稻草还田(RN)。3重复之间顺序排列,小区面积为 20 m^2 ($4\text{ m} \times 5\text{ m}$)。区间用花岗岩板材与水泥作永久性田埂分隔,中间有灌渠通各小区。供试作物除1993年夏熟作物为油菜、2000年为蚕豆以外,其余均为稻麦轮作。除1982年为三熟制外,其余均为二熟制。

各试验处理的肥料用量如表1。

表1 不同处理肥料用量

Table 1 Treatment description ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)

化肥处理 CF ¹⁾ treatments	肥料用量 Fertilizer dosage	有机肥加 化肥处理 CAOC ²⁾ treatments	肥料用量 Fertilizer dosage
C0	对照(不施肥)	M0	猪粪(相当于N 103.1, P 82.7和K 70.1)
CN	N 150 ~ 300	MN	猪粪 + CN
CNP	N 150 ~ 300 + P 55.8	MNP	猪粪 + CNP
CNK	N 150 ~ 300 + K 137.5	MNK	猪粪 + CNK
CPK	P 55.8 + K 137.5	MPK	猪粪 + CPK
CNPK	N 150 ~ 300 + P 55.8 + K 137.5	MNPK	猪粪 + CNPK
CRN	N 150 ~ 300 + 秸秆 4500(相当于N 40.6, P 5.5和K 59.8)	MRN	猪粪 + CRN

1) Chemical fertilizer; 2) Combined application of organic manure and chemical fertilizer

1.2 样品采集与分析

土壤样品分为稻麦两季进行采集。麦季采样时间为2005年6月小麦收割后,稻季采样时间为2005年11月水稻收割后。每个小区用土钻在耕层(0~15 cm)分别按“S形取10个点,每10个点的土样组成一个混合样品。所得的新鲜土样用四分法分出两份,一份风干供理化性质测试,另一份鲜样过10目筛保存在0~4℃冰柜中。

土壤pH用电极法测定(土水比为1:2.5),土壤有机质用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 - \text{H}_2\text{SO}_4$ 氧化法测定,速效氮用流动分析仪测定(KCl提取),速效磷用分光光度计测定(NaHCO_3 提取),速效钾用火焰光度计测定(NH_4OAc 提取)^[9]。脲酶(UR)、酸性磷酸酶

(ACP)、碱性磷酸酶(ALP)、葡糖苷酶(-GLY)和芳基硫酸酯酶活性(ARL)根据Tabatabai^[10]方法进行测定。

土壤持水量(Water Holding Capacity, WHC)的测定:在漏斗颈部放置一个玻璃棉活塞并用少量蒸馏水湿润棉塞,然后关闭橡胶管上的夹子。称取50 g土壤鲜样置于上述漏斗内,加入100 ml蒸馏水,并在漏斗口放置一个表面皿以防止水分蒸发,30 min后打开夹子,让多余的水分排入漏斗下的量筒,再过30 min测量量筒水的体积。土壤持水量由下列公式计算:

$$\text{WHC}(\text{ml } 100\text{g}^{-1}\text{干土}) = (\text{土壤总含水量} \times \text{土壤烘干重}) \times 100$$

$$\text{土壤总含水量}(\text{g}) = \text{土壤含水量} + (\text{100} - \text{量筒水的体积})$$

1.3 数据分析

常规数据整理由Excel2003完成,方差分析、主成分分析分别用DPSv3.01和SPSS13.0完成。

2 结果与分析

2.1 长期施肥土壤酶活性与土壤肥力的相关分析

土壤酶主要来自土壤微生物和植物根系,而微生物和植物生长状况均与土壤肥力特征关系密切^[11]。由表2可知,稻麦两季土壤肥力水平在不同程度上受土壤酶影响,土壤肥力与土壤酶活性密切相关。尤其是酸性磷酸酶和葡糖苷酶,其稻麦两季的酶活性与pH、速效氮(AN)、速效磷(AP)和有机质(OM)之间均呈显著线性相关,部分甚至达到极显著水平:酸性磷酸酶活性与pH在稻麦两季均呈显著负相关($r_{0.01}$ 稻季 = -0.716, $r_{0.05}$ 麦季 = -0.571),与速效氮呈极显著正相关($r_{0.01}$ 稻季 = 0.827, $r_{0.01}$ 麦季 = 0.679),与有机质呈显著正相关($r_{0.05}$ 稻季 = 0.637, $r_{0.05}$ 麦季 = 0.642);葡糖苷酶活性在稻麦两季与有机质呈显著正相关($r_{0.01}$ 稻季 = 0.740, $r_{0.05}$ 麦季 = 0.635),在稻季与pH呈极显著负相关($r_{0.01}$ 稻季 = -0.737),与速效氮呈极显著正相关($r_{0.01}$ 稻季 = 0.738),与速效磷呈显著正相关($r_{0.05}$ 稻季 = 0.633)。综上可见许多变量之间直接的相关性较强,证明它们存在信息上的重叠^[12]。即说明了土壤酶活性与土壤肥力之间关系密切,可以用来评价土壤肥力状况^[13]。

表 2 土壤酶活性与肥力因素的相关矩阵

Table2 Correlation matrix (*r*-values) between soil enzyme activity and soil fertility factors

	WHC	pH	AN	AP	AK	OM
UR	0.201 (- 0.282)	- 0.108 (0.097)	- 0.118 (- 0.073)	0.132 (- 0.165)	- 0.098 (- 0.138)	- 0.192 (- 0.550 [*])
ACP	- 0.080 (0.459)	- 0.571 [*] (- 0.716 ^{**})	0.679 ^{**} (0.827 ^{**})	0.240 (0.678 ^{**})	- 0.280 (- 0.107)	0.642 [*] (0.637 [*])
ALP	0.271 (- 0.273)	0.496 (0.264)	- 0.579 [*] (0.097)	0.209 (0.105)	0.474 (- 0.162)	- 0.658 [*] (- 0.229)
- GLY	- 0.227 (0.293)	- 0.498 (- 0.737 ^{**})	0.442 (0.738 ^{**})	0.247 (0.633 [*])	- 0.390 (- 0.051)	0.635 [*] (0.740 ^{**})
ARL	- 0.032 (0.400)	0.042 (- 0.445)	- 0.100 (0.200)	0.015 (0.091)	- 0.227 (- 0.206)	0.303 (0.642 [*])

注:括号外为麦季线性相关数据,括号内为稻季线性相关数据 Note: Inside of bracket are coefficients of line correlation of the wheat season, outside of bracket are coefficients of line correlation of the rice season. ^{*}, *p*<0.05; ^{**}, *p*<0.01. *n*=5

2.2 长期施肥土壤酶活性与土壤肥力的主成分分析

为深入探讨稻麦两季土壤酶活性与土壤肥力的关系,对土壤酶活性及相关肥力因子进行了主成分分析,以便能筛选出稻麦两季土壤肥力的主要因子群。

特征值在某种程度上可以被看成是表示主成分影响力度大小的指标^[13],根据主成分分析原理,当累积方差贡献率大于 85 %时,即可用于反映系统的变

异信息。表 3 中的土壤肥力系统 由施化肥处理的稻麦两季土壤酶活性和肥力因子构成,土壤肥力系统 由施有机肥加化肥的稻麦两季土壤酶活性和肥力因子构成。由表 3 可知,土壤肥力系统 和 的麦季前四个主成分的累积方差贡献率分别达 92.72%和 89.88%,稻季前四个主成分的累积方差贡献率亦分别达 91.24%和 90.48%,且无变量丢失,因此说明稻麦两季的土壤肥力系统 和 均可以用其前四个主成分代表本肥力系统内的变异状况。

表 3 主成分分析特征值与方差贡献率

Table 3 Eigenvalues and contribution of PCA

土壤肥力系统 Soil fertilizer system	项目 Item	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3	主成分 4 PC4
化肥处理的酶活性和肥力因子 Soil enzyme activity and fertility factors in CF treatments	特征值 Eigenvalue	4.797 (3.804)	2.670 (2.816)	1.723 (2.350)	1.010 (1.066)
	方差贡献率 Contribution rate (%)	43.61 (34.59)	24.28 (25.60)	15.66 (21.37)	9.180 (9.690)
	累积方差贡献率 Cumul Contribution rate (%)	43.61 (34.59)	67.88 (60.18)	83.54 (81.55)	92.72 (91.24)
有机肥加化肥处理的酶活性和肥力因子 Soil enzyme activity and fertility factors in CAOC treatments	特征值 Eigenvalue	4.239 (4.757)	2.533 (2.758)	1.833 (1.414)	1.281 (1.023)
	方差贡献率 Contribution rate (%)	38.54 (43.24)	23.03 (25.08)	16.66 (12.86)	11.64 (9.298)
	累积方差贡献率 Cumul Contribution rate (%)	38.54 (43.24)	61.57 (68.32)	78.23 (81.18)	89.88 (90.48)

注:括号外为麦季数据,括号内为稻季数据 Note: Inside of bracket are datum of the wheat season, outside of bracket are datum of the rice season

表 4 中每一个载荷量表示主成分与对应变量的相关系数^[14],结合贡献率与正负相关性作用可得出:对于土壤肥力系统 ,麦季酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、持水量、pH、速效氮和有机质在第一主成分上有较高荷载,脲酶、葡糖苷酶、芳基硫酸酯酶和速效磷在第二主成分上有较高荷载,速效钾在第三主成分上有较高荷载;稻季酸性磷酸酶、芳基硫酸酯酶、持水量、pH和速效氮在第一主成分上有较高荷载,脲酶、葡糖苷酶、速效磷和速效钾在第二主成分上有较高荷载,有机质和碱性磷酸酶分别在第三、四主成分上有较高荷载。对于土壤肥力系统

,麦季酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、葡糖苷酶、芳基硫酸酯酶、速效钾和有机质在第一主成分上有较高荷载,pH、速效氮和速效磷在第二主成分上有较高荷载,脲酶和持水量分别在第三、四主成分上有较高荷载;稻季碱性磷酸酶、葡糖苷酶、芳基硫酸酯酶、速效氮和速效磷在第一主成分上有较高荷载,脲酶和有机质、酸性磷酸酶和速效钾分别在第二、三主成分上有较高荷载,仅 pH在第四主成分上有较高荷载。由以上分析可知,对于稻麦两季的土壤肥力系统 和 ,各自的前四个主成分包含了其全部指标具备的大部分信息^[14],即可反映土壤肥力的

表 4 主成分分析因子载荷阵

Table 4 The component loading of the principal components

	化肥处理的土壤酶活性和肥力因子 Soil enzyme activity and fertility factors in CF treatments					有机肥加化肥处理的土壤酶活性和肥力因子 Soil enzyme activity and fertility factors in CAOC treatments			
	PC1	PC2	PC3	PC4		PC1	PC2	PC3	PC4
UR	0.072 (0.340)	0.826 (-0.913)	-0.267 (0.171)	0.344 (-0.044)	UR	0.243 (0.560)	0.468 (-0.571)	0.518 (0.492)	-0.453 (0.201)
ACP	0.669 (0.738)	-0.435 (-0.206)	0.466 (0.539)	-0.254 (0.122)	ACP	0.770 (0.478)	-0.126 (0.483)	0.459 (-0.625)	-0.158 (0.237)
ALP	-0.977 (-0.397)	0.000 (0.194)	-0.152 (-0.488)	-0.119 (0.679)	ALP	-0.732 (0.903)	0.029 (-0.264)	0.649 (-0.131)	-0.065 (0.260)
-GLY	0.415 (0.309)	0.617 (0.558)	0.225 (-0.517)	-0.596 (-0.541)	-GLY	0.919 (0.734)	0.111 (0.220)	0.152 (-0.034)	-0.292 (-0.320)
ARL	-0.440 (0.790)	0.840 (0.140)	0.072 (-0.575)	-0.305 (-0.073)	ARL	0.897 (-0.925)	-0.217 (0.311)	0.290 (0.032)	-0.040 (0.035)
WHC	0.730 (0.647)	0.334 (0.273)	-0.494 (0.417)	0.304 (-0.183)	WHC	-0.159 (0.052)	-0.030 (0.918)	0.596 (0.121)	0.720 (0.292)
pH	-0.896 (-0.806)	-0.392 (0.484)	-0.099 (0.193)	-0.087 (0.000)	pH	0.061 (-0.668)	-0.863 (0.192)	0.383 (0.019)	0.217 (0.681)
AN	0.825 (0.832)	-0.137 (0.063)	0.428 (0.134)	0.279 (0.435)	AN	0.418 (0.942)	0.836 (-0.004)	-0.184 (0.004)	0.284 (0.260)
AP	-0.502 (0.437)	0.596 (0.757)	0.559 (0.426)	0.256 (0.208)	AP	-0.204 (0.805)	0.801 (0.512)	0.497 (0.189)	0.112 (0.059)
AK	-0.535 (-0.184)	0.045 (0.718)	0.764 (0.625)	0.323 (-0.042)	AK	-0.762 (0.052)	0.301 (0.376)	-0.003 (0.843)	-0.115 (0.021)
OM	0.684 (0.531)	0.272 (0.411)	0.153 (-0.627)	-0.128 (0.147)	OM	0.758 (0.127)	0.250 (0.837)	-0.208 (0.019)	0.536 (-0.367)

注:UR:脲酶;ACP:酸性磷酸酶;ALP:碱性磷酸酶;-GLY:葡糖苷酶;ARL:芳基硫酸酯酶。括号外为麦季因子载荷量,括号内为稻季因子载荷量 Note:UR: urease; ACP: acid phosphatase; ALP: alkaline phosphatase; -GLY: -glucosidase; ARL: arylsulfatase. Inside of bracket are component loadings of the wheat season, outside of bracket are component loadings of the rice season

提高与退化状况。

根据特征值和因子载荷量,可以分别得到反映土壤肥力系统和肥力水平的第一、二、三和四主成分函数表达式。将标准化数据分别代入相应主成分函数表达式中,得到稻麦两季土壤肥力系统和14个处理在各自四个主成分上的得分,再根据综合主成分函数模型 $F = b_1 Z_1 + b_2 Z_2 + \dots + b_m Z_m$ (b 为贡献率)^[15],计算出综合主成分值并进行排序(如表5),即可对稻麦两季土壤肥力系统和14个处理进行综合评价。

土壤肥力等级可以通过主成分综合得分区间进行划分^[15],首先根据综合得分的最大值和最小值,选择适当的分值区间。仅太湖地区水稻土相对比较而言,通过对表5的综合主成分结果按等距 $d = (|F_{\text{综}_{\text{max}}}| + |F_{\text{综}_{\text{min}}}|) / 4$ 计算可各自划分为四个肥力等级:

对于施化肥处理(麦季),等距 $d = (1.20 + 2.06) / 4 = 0.815$:

一等 {CN, CRN, CNP, CNPK}, 综合得分范围为 [0.385, 1.20]; 二等 {CNK}, 综合得分范围为

(-0.43, 0.385); 三等 {CPK}, 综合得分范围为 (-1.245, -0.43]; 四等 {C0}, 综合得分范围为 (-2.06, -1.245]。

对于施化肥处理(稻季),等距 $d = (1.44 + 1.14) / 4 = 0.645$:

一等 {CNP(R), CPK(R)}, 综合得分范围为 [0.795, 1.44]; 二等 {CNP(K)}, 综合得分范围为 (0.15, 0.795); 三等 {CRN(R)}, 综合得分范围为 (-0.495, 0.15]; 四等 {CN(R), CNK(R), C0(R)}, 综合得分范围为 (-1.14, -0.495]。

对于施有机肥加化肥的处理(麦季),等距 $d = (1.49 + 1.04) / 4 = 0.633$:

一等 {MNP, MRN}, 综合得分范围为 [0.857, 1.49]; 二等 {MNP(K)}, 综合得分范围为 (0.224, 0.857); 三等 {MN}, 综合得分范围为 (-0.409, 0.224]; 四等 {M0, MPK, MNK}, 综合得分范围为 (-1.04, -0.409]。

对于施有机肥加化肥的处理(稻季),等距 $d = (1.44 + 1.32) / 4 = 0.69$:

一等 {MNP(K), MNP(R), MPK(R)}, 综合得

分范围为 [0.75, 1.44]; 二等综合得分范围为 (0.06, 0.75); 三等综合得分范围为 (- 0.63, 0.06); 四等 { MN (R), MRN (R), MNK (R), M0 (R) }, 综合得分范围为 (- 1.32, - 0.63]。

由以上分析可知, 经过 25 a 长期定位施肥, 稻麦两季土壤肥力系统显示出不同的特点:

1) 对于施化肥处理, 麦季的仅施氮肥 (CN)、氮肥加秸秆 (CRN)、氮肥加磷肥 (CNP) 和氮磷钾全施 (CNPK), 以及稻季的氮肥加磷肥 (CNP (R)) 和磷肥加钾肥 (CPK (R)) 等处理具有最高的土壤肥力水平, 说明氮磷肥配施是适合于稻麦两季的施肥方式。且在氮、钾或秸秆的基础上配施磷肥的处理在稻麦两季的土壤肥力均相对较高。仅施氮肥处理在麦季肥力水平最高而在稻季最低。对照 (C0) 的肥力水平在稻麦两季均是最低的, 说明长期不施肥会引起土壤肥力的退化。此外, 由主成分分析第一主成分权系数可知, 麦季的酸性磷酸酶、碱性磷酸酶活性以及稻季的酸性磷酸酶、芳基硫酸酯酶活性与当季土壤肥力关系最为密切。

2) 对于施有机肥加化肥处理, 麦季的有机肥加氮磷肥 (MNP)、猪粪加氮肥和秸秆 (MRN) 以及稻季的有机肥加氮磷钾全施 (MNPK (R))、有机肥加氮磷肥 (MNP (R)) 和有机肥加磷钾肥 (MPK (R)) 等处理的肥力水平最高, 说明有机肥加氮磷肥配施是适合于稻麦两季的施肥方式。与只施化肥处理相似, 在氮、钾或秸秆的基础上配施磷肥的处理在稻麦两季的土壤肥力均较高。猪粪加氮肥和秸秆处理在麦季肥力水平最高而在稻季最低。对照 (M0) 的肥力水平在稻麦两季也是最低的, 说明仅施有机肥也有可能导致土壤肥力的退化。同样由相应第一主成分权系数可知, 麦季的酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、葡糖苷酶和芳基硫酸酯酶活性以及稻季的碱性磷酸酶、葡糖苷酶、芳基硫酸酯酶活性均与当季土壤肥力关系最为密切。

表 5 各主成分得分及综合得分

Table 5 Score and general score of principal components of samples

处理 Treatment	F1 Score of PC1	F2 Score of PC2	F3 Score of PC3	F4 Score of PC4	F综 General score	排名 Order	处理 Treatment	F1 Score of PC1	F2 Score of PC2	F3 Score of PC3	F4 Score of PC4	F综 General score	排名 Order
C0	- 2.92	- 1.07	- 2.1	- 0.54	- 2.06	7	C0 (R)	- 2.1	0.46	- 1.84	- 0.38	- 1.14	7
CN	2.73	- 0.19	- 1.14	1.58	1.20	1	CN (R)	- 0.95	- 1.55	- 0.07	1.81	- 0.62	5
CNP	- 0.17	2.89	- 0.49	- 0.04	0.59	3	CNP (R)	3.53	- 0.11	0.31	0.57	1.44	1
CNK	0.55	- 2.49	0.83	0.08	- 0.25	5	CNK (R)	- 1.79	- 1.15	1.53	- 0.32	- 0.68	6
CPK	- 2.7	0.48	1.67	0.9	- 0.77	6	CPK (R)	- 0.44	2.6	2.12	- 0.15	1.04	2
CNPK	0.24	0.17	0.91	- 0.49	0.26	4	CNPK (R)	0.64	1.62	- 1.95	0.05	0.25	3
CRN	2.27	0.22	0.32	- 1.49	1.03	2	CRN (R)	1.11	- 1.88	- 0.1	- 1.59	- 0.30	4
M0	- 1.55	- 2.22	0.97	1.13	- 0.91	5	M0 (R)	- 3.36	1.15	- 0.49	0.36	- 1.32	7
MN	0.62	- 0.05	- 0.4	- 1.78	- 0.05	4	MN (R)	- 0.13	- 1.17	- 0.91	- 1.54	- 0.67	4
MNP	2.03	1.4	1.59	- 0.23	1.49	1	MNP (R)	3.08	- 1.05	- 0.36	- 0.13	1.12	2
MNK	- 1.01	- 0.56	- 2.21	- 0.43	- 1.04	7	MNK (R)	- 1.51	- 0.02	- 0.65	- 0.23	- 0.84	6
MPK	- 2.85	0.56	1.22	- 0.68	- 0.94	6	MPK (R)	0.7	1.93	2.06	- 0.84	1.08	3
MNPK	- 0.3	2.34	- 0.98	1.52	0.49	3	MNPK (R)	2.07	1.66	- 0.95	1.25	1.44	1
MRN	3.05	- 1.48	- 0.18	0.46	0.95	2	MRN (R)	- 0.84	- 2.5	1.31	1.13	- 0.79	5

注: 括号中标注 R 的为稻季数据 Note: Inside of bracket those marked R are datum of the rice season

3 讨论与结论

综上, 可得到以下一些结论。针对于太湖地区水稻土, 在稻麦两季:

1) 稻麦两季土壤肥力水平在不同程度上受土壤酶活性影响, 土壤酶活性与土壤各肥力因子的线性相关程度显著, 稻麦两季的脲酶、酸性磷酸酶、碱

性磷酸酶、葡糖苷酶和芳基硫酸酯酶活性与肥力因子大都具有不同程度的显著线性相关关系, 特别是和土壤 C、P 循环密切相关的酸性磷酸酶和葡糖苷酶^[16]。某种酶活性在主成分中的载荷量, 代表这种酶活性与主成分关系的密切程度, 值越大与主成分关系越密切, 越能代表土壤系统内肥力的变异状况。从分析可知, 无论是在麦季还是在稻季, 尽管肥料配比差别较大, 但本研究中的五种土壤酶活

性绝大部分在第一、二主成分中占的比重均很大,对土壤肥力的贡献率很大,说明对土壤肥力起主要作用的因子主要包括土壤酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、葡糖苷酶和芳基硫酸酯酶活性和有机质等。即土壤酶活性能够和土壤肥力因子共同评价土壤肥力水平,这与许多文献中的结论一致^[7,17~19],且酸碱性磷酸酶、芳基硫酸酯酶和葡糖苷酶作为综合评价指标优于脲酶。

2) 在此基础上根据土壤酶活性和肥力因子综合评价可得,无论是仅施化肥还是施有机肥加化肥,氮磷肥配施处理的土壤肥力水平均是最高,是最优的培肥模式。因为供试土壤本身的钾库极大,长期定位试验中钾肥的施用与否并不会对土壤肥力产生较大影响,因此在此基础上氮磷共施即能取得良好效果;在施用其他肥料的基础上增施磷肥能够提高土壤肥力。说明磷是影响该地区水稻土壤肥力的关键性元素;不施肥或仅施有机肥均可能会导致土壤肥力的退化;秸秆还田能够提高麦季土壤肥力水平,而对稻季的无显著影响。造成这种差异可能原因是由于稻田的特殊性,即秸秆还田后处于长期淹水状态,从而导致酶活性和养分含量等土壤肥力指标变异不明显^[20]。

致谢 对中国科学院南京土壤研究所的郭汝礼、阎德智、程月琴、冯明雷和王岩等同志在采样制样过程中提供的帮助表示感谢!

参考文献

- [1] 李东坡,武志杰,陈利军,等. 长期不同培肥黑土磷酸酶活性动态变化及其影响因素. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 550~553. Li D P, Wu Z J, Chen L J, *et al* Dynamics of phosphatase activity and influencing factors in black soil under long-term fertilization (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 550~553
- [2] 沈善敏. 国外的长期肥料试验. 土壤通报, 1984, 15(2): 85~91. Shen S M. Long-term fertilizer experiment in the abroad (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 1984, 15(2): 85~91
- [3] 兰忠明,王飞. 多元统计分析在三明烟区土壤肥力评价中的运用. 中国农学通报, 2006, 22(3): 263~266. Lan Z M, Wang F. Multivariate statistical analysis application in evaluation soil fertility in Samming areas (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(3): 263~266
- [4] 樊军,郝明德. 黄土高原旱地轮作与施肥长期定位试验研究. 土壤酶活性与土壤肥力. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 146~150. Fan J, Hao M D. Study on long-term experiment of crop rotation and fertilization in the Loess Plateau. Relationship between soil enzyme activities and soil fertility (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 146~150
- [5] 安韶山,黄懿梅,刘梦云,等. 宁南宽谷丘陵区植被恢复中土壤酶活性的响应及其评价. 水土保持研究, 2005, 12(3): 31~34. An S S, Huang Y M, Liu M Y, *et al* The responses and evaluation of soil enzymatic activities to plant rehabilitation in Ningxia boss hilly-gully region (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(3): 31~34
- [6] 何斌,温远光,袁霞,等. 广西英罗港不同红树植物群落土壤理化性质与酶活性的研究. 林业科学, 2002, 38(2): 21~26. He B, Wen Y G, Yuan X, *et al* Studies on soil physical and chemical properties and enzyme activities of different mangrove communities in Yingluo bay of Guangdong (In Chinese). Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(2): 21~26
- [7] 邱莉萍,刘军,王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究. 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 (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 277~280
- [8] 郭汝礼,沈明星,卢萍,等. 太湖地区黄泥土氮肥对水稻产量、叶片碳氮同及不同土层氮的影响. 土壤学报, 2006, 43(4): 592~597. Guo R L, Shen M X, Lu P, *et al* Effects of long-term nitrogen application on yield, carbon-nitrogen assimilation in leaves and soil nitrogen (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 592~597
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical Methods of Soil and Agro-Chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [10] Tabatabai M A. Soil enzymes. In: Weaver R W, Angle J S, Bottomley P S Methods of Soil Analysis, Part 2-Microbiological and Biochemical Properties SSSA Book Series, no. 5. Soil Science Society of America, 677 S Segoe Rd, Madison, WI 53711, USA. 1994. 775~833
- [11] 薛冬,姚槐应,何振立,等. 红壤酶活性与肥力的关系. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1455~1458. Xue D, Yao H Y, He Z L, *et al* Relationships between red soil enzyme activity and fertilizer (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(8): 1455~1458
- [12] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用. 市场研究, 2005(12): 31~34. Zhang W L. Manipulation application of principal component analysis in SPSS (In Chinese). Marketing Research, 2005(12): 31~34
- [13] 王娟,谷雪景,赵吉. 羊草草原土壤酶活性对土壤肥力的指示作用. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 934~938. Wang J, Gu X J, Zhao J. Function of soil enzyme activities in indicating soil fertility in Leyluse Chinensis Steppe (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(4): 934~938
- [14] 林海明,张文霖. 主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷. 统计研究, 2005(3): 65~69. Lin H M, Zhang W L. The difference and sameness between the principal component analysis and the factor analysis and SPSS software—And consult with Liu Yumei, Lu Wen-dai, *et al* (In Chinese). Statistical Research, 2005(3): 65~69
- [15] 李月芬,汤洁,李艳梅. 用主成分分析和灰色关联度分析评价

- 草原土壤质量. 世界地质, 2004, 23 (2): 169 ~ 174. Li Y F, Tang J, Li Y M. Evaluation on grassland soil quality with analysis of Principal Component and Grey Relative (In Chinese). Global Geology, 2004, 23 (2): 169 ~ 174
- [16] Wang X C, Lu Q. Beta-glucosidase activity in paddy soils of the Taihu Lake region, China. *Pedosphere*, 2006, 16 (1): 118 ~ 124
- [17] Burns R G. *Soil Enzymes*. Chelsea, USA: Lewis Publishers, 1994. 93 ~ 97
- [18] 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. *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 its role in adjusting-controlling enzyme activities and soil fertility (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9 (4): 406 ~ 410
- [19] 高瑞, 吕家珑. 长期定位施肥土壤酶活性及其肥力变化研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13 (1): 143 ~ 145. Gao R, Lu J L. Study on the enzyme activities and fertility change of soils by a long-term located utilization of different fertilizers (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13 (1): 143 ~ 145
- [20] 李腊梅, 陆琴, 严蔚东, 等. 太湖地区稻麦二熟制下长期秸秆还田对土壤酶活性的影响. *土壤*, 2006, 38 (4): 422 ~ 428. Li L M, Lu Q, Yan W D, *et al* Effect of long-term straw incorporation on enzyme activity in paddy soil under rice-wheat rotation in Taihu region (In Chinese). *Soils*, 2006, 38 (4): 422 ~ 428

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

Tang Yushu^{1,2} Ci En¹ Yan Tingmei^{1†} Wei Chaofu² Yang Linzhang¹ Shen Mingxing³

(1 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

(3 Suzhou Paddy Soil Ecological Environment Scientific Observation and Experimental Station, Ministry of Agriculture, China, Suzhou, Jiangsu 215001, China)

Abstract Principal component analysis was used to study relationship between soil enzyme activity and soil fertility of paddy fields under the wheat-rice cropping system in a 25-year long-term experiment in the Taihu region. Results show that significant linear relationship was observed of soil fertility factors with the activities of urease, acid phosphatase, alkaline phosphatase, β -glucosidase, and arylsulfatase, especially acid phosphatase and β -glucosidase, which showed significant or extremely significant linear relations with pH, available N, available P and organic matter. Analysis was carried out of the 14 treatments of the experiment and soil enzyme activities and fertility factors therein, and main factor groups affecting soil fertility were screened out for comprehensive evaluation. The evaluation reveals that soil enzyme activities may be cited as important indexes reflecting soil fertility, and phosphatase, arylsulfatase and β -glucosidase are better than urease in this function. Combined application of N and P fertilizers is the optimal soil building mode. Addition of phosphate fertilizer in fertilization can increase soil fertility. No fertilization or application of organic manure only will lead to degradation of soil fertility. Straw incorporation can improve soil fertility in the wheat season, but has no obvious effect in the rice season.

Key words Principal component analysis; Soil enzyme activity; Soil fertility; Wheat-rice rotation