

不同养分和水分管理模式对水稻土 质量的影响及其综合评价

杨长明^{1,2}, 杨林章², 颜廷梅², 欧阳竹¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:田间小区试验下,通过对土壤理化和生物学特性指标的测定和分析,系统比较和研究了不同养分和水分管理模式对水稻土质量的影响及其综合评价。研究表明:在干湿交替和控水模式下,有机无机肥配施可明显改善水稻土壤物理特性,提高土壤的有效养分含量,增加土壤酶的活性和土壤微生物生物量。在连续淹水下,土壤中加入有机物料,特别是厩肥,加剧了土壤的还原过程,削弱了有机肥料对水稻土理化特性和生物学特性的改善效果。模糊综合评判显示,有机无机肥配施的水稻土在干湿交替的水分模式下,其质量指标综合表现较好,特别是厩肥与化肥配施和干湿交替的水肥模式组合的隶属度为0.7478,其土壤质量指标综合表现为最好。单施化肥和连续淹水的肥水模式组合的隶属度最低,为0.4112。

关键词:水稻土;水分模式;有机肥;理化特性;土壤微生物量;模糊综合评判

Effects of nutrient and water regimes on paddy soil quality and its comprehensive evaluation in the Taihu Lake Region

YANG Chang-Ming^{1,2}, YANG Lin-Zhang², YAN Ting-Mei², OUYANG Zhu¹ (1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 63~70.

Abstract: Soil quality has emerged as the central concept for examining and integrating relationships and functions among various biological, chemical and physical parameters of soils. Soil quality is important in the context of sustainable land use and management. Paddy soil is anthropic hydromorphic soil, and its evolution and formation are affected greatly by cultivations, irrigation and fertilization. Taihu Lake region is the major distribution area of Chinese paddy soil resource. However, due to irrational irrigation and fertilization practices, such as long-term submerging and application of exclusively chemical fertilizer, paddy soils in the Taihu Lake region are undergoing degradation of fertility and environmental quality, which negatively compact local agricultural sustainable development. The objectives of this study were to compare the effects of different nutrient and water regimes on paddy soil quality and to give their comprehensive evaluation, aiming to supply scientific and practical guidance for rational nutrient and water management for paddy soil.

Field experiments were conducted at the Changshu Agroecological Experiment Station (CAES), Chinese Academy of Sciences, situated in Yangtze Delta (at 31°33'N and 120°42'E) in Jiangsu province from 1999 to 2002. Four nutrient regimes were as following: CK(control); CF: chemical fertilizers only; CM: combination of chemical fertilizers with farmyard manure (FYM); CS: combined application of chemical fertilizers and wheat straw. Three soil moisture regimes included: (i) continuous waterlogged(CWL); (ii) alternate wetting and drying (AWD); (iii) controlled irrigation. (DRA). 48 field plots with each area of 30m²(5×6m²) were employed in a randomized complete block design with four replications. Soil samples were collected at the depth of 0~20cm after rice harvested. Soil physiochemical indicators were determined by conventional

基金项目:国家“973”重点基础研究发展资助项目(G1999011802);中国科学院创新工程方向性资助项目(KZCX2-413)

收稿日期:2002-11-26;**修订日期:**2003-04-29

作者简介:杨长明(1973~),男,安徽巢湖人,博士,主要从事土壤质量和农田生态系统健康方面研究。E-mail: yangcm@igsnr.ac.cn

Foundation item: the National Key Project (No. 1999011802) and Knowledge Innovative Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-413)

Received date: 2002-11-26; **Accepted date:** 2003-04-29

Biography: YANG Chang-Ming, Ph. D., mainly engaged in soil quality and agro-ecosystem health. E-mail: yangcm@igsnr.ac.cn

methods. The chloroform fumigation-extraction method was used to determine the soil microbial biomass C, N and P.

Results showed that in the alternate wetting and drying (AWD) and the controlled irrigation (DRA), the combined application of chemical fertilizers with organic sources, especially farmyard manure (CM) could not only markedly improve paddy soil physical characteristics and increase the content of available nutrients, but also enhance soil microbial biomass C, N and P. In the continuous waterlogging (CWL), organic materials, especially farm yard manure increased soil redox potential and weakened the effectiveness of the combined application of chemical fertilizers with organic sources in improving paddy soil physical and biological properties.

In view of the characters of gradual change in soil physicochemical and biological indicators, the analytic hierarchy process (AHP) and the Fuzzy mathematics model were applied to comprehensively evaluate the quality of paddy soils by different nutrient and water regimes. The results showed that the integration of soil quality factors in combination with application of chemical fertilizers with organic manure (CM) and alternate wetting and drying (AWD) pattern provided the highest subordinative degree of 0.7478. The combination of the chemical fertilizers only (CF) and the continuous waterlogged (CWL) exhibited the lowest soil quality with the subordinative degree of 0.4112.

Key words: paddy soil; soil moisture regimes; farmyard manure; physiochemical indicators; soil microbial biomass; Fuzzy comprehensive evaluation

文章编号:1000-0933(2004)02-0063-08 中图分类号:S154.1,S181 文献标识码:A

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础。随着世界社会经济的发展,人口-资源-环境间的矛盾日趋尖锐,土壤质量问题正在不断得到世界范围内的共同关注。土壤质量(Soil quality)是土壤在生态系统范围内,维持生态系统生产力和动植物健康而不发生土壤退化及其环境问题的能力,是土壤许多物理、化学和生物学性质,以及形成这些性质的一些重要过程的综合体^[1~3]。土地利用方式及管理措施是影响土壤质量的演变方向和强度的关键因子^[4,5],不合理的土壤管理措施会导致土壤有机质含量和质量下降、土壤结构破坏以及土壤生物多样性和生物活性下降,导致并加剧了土壤质量的退化^[6~9]。许多研究表明,与传统耕作方式(Conventional tillage)相比,有机(Organic)和免耕(No-tillage)等保护性耕作(Conservation tillage)可以明显改善土壤理化和生物学特性,从而更有利于土壤质量维持和提高^[10~14]。

水稻土是一种人工水成土,除自然因素外,灌溉、耕作和施肥等农业措施对水稻土的形成和发育起很大作用,这些措施会引起土壤一系列物理、化学和生物学特性的变化,进而对水稻土质量产生深刻的影响^[15,16]。水稻土是我国重要的土壤资源,太湖地区是我国水稻土分布较为集中的地区,该地区自然条件优越,但由于目前不合理的施肥和灌溉方式导致土壤养分失衡和非均衡化过程的发生,土壤质量呈现退化趋势,严重影响该地区农业和环境的可持续发展。目前对水稻土质量的系统研究较少^[16,17],特别是肥料结构(有机肥和无机肥)和水分管理对水稻土质量的综合效应和评价至今还尚未报道。本文通过对不同养分和水分模式下的土壤质量的理化和生物学性状指标系统比较、分析和综合评价,旨在揭示不同耕作和管理措施对水稻土质量的影响机制,为我国水稻土资源质量的调控和可持续利用提供理论依据。

1 试验区自然概况与研究方法

1.1 自然概况

试验于1999~2002年在中国科学院常熟农业生态实验站进行,该站地处太湖流域,属亚热带中部湿润季风气候,年平均气温15.5℃,最高气温39.1℃,最低气温-11.3℃,≥10℃的有效积温4933.7℃,年降雨量1038mm。试验地土壤类型为竖头乌栅土,供试前土壤理化性质见表1。

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Selected physical and chemical characteristics of surface (0~20cm) soil used in study

粘粒 Clay	砂粒 Sand	pH H ₂ O 1:1	有机质 O. M.	全氮 Total N	全磷 Total P	速效磷 Avail P	速效钾 Avail. K	CEC	无定形铁 Amorphous Fe ₂ O ₃
(%)	(%)			(g/kg)		(mg/kg)		(cmol/kg)	(g/kg)
46.7	15.4	7.85	32.1	1.88	0.89	8.26	119.71	16.9	6.23

1.2 研究方法

1.2.1 试验设置

养分模式设置 本次试验设置4种养分投入模式:Ⅰ单施无机肥(CF),N、P、K施用量分别为250 kg/hm²(N),60 kg/hm²(P₂O₅)和80 kg/hm²(K₂O);Ⅱ无机肥+秸秆(CS),N、P、K养分总量同Ⅰ;Ⅲ无机肥+厩肥(CM),N、P、K养分总量同Ⅰ;Ⅳ无

肥区 CK。处理Ⅰ和Ⅱ中秸秆和厩肥分别为 2500 kg/hm² 和 1500 kg/hm²,测定其 N、P、K 养分含量,并折合成相应的无机肥用量,再用化肥补足。磷肥和有机肥作基肥一次施入,氮肥和钾肥分别作基肥、分蘖肥和穗肥,分 3 次施入,比例为 5:3:2。每处理设 3 次重复,共 12 小区,小区面积为 30 m²,采用随机区组排列。

水分模式设置 试验设定 3 种水分管理模式:Ⅰ 干湿交替型(AWD),从水稻返青至分蘖初期,田间保持 3.0~5.0cm 的深水层;分蘖中期采取干湿交替灌(即每次田间灌水至 5.0cm 深,当土壤逐渐落干,土壤表层含水量为田间持水量 70%~80%时,再灌下一次水);分蘖末期,晒田 1 周,保持土壤含水量为田间持水量 70%~80%(水层深度约为 10cm);孕穗抽穗期田间保持水层 3.0~5.0cm 深;乳熟期田间保持干湿交替,收获前 15d 撤水晒田。Ⅱ 浅水层连续灌溉型(CWL),即在水稻整个生育期始终保持约 1.0~2.0cm 的浅水层。Ⅲ 控水模式(半干旱模式)(DRA),除返青建立 1.5~2.0cm 深水层外,其余处理阶段不建立水层,土壤水分保持在土壤饱和含水量的 80%~90%。

1.2.2 土壤样品采集 在水稻收割后,用土钻取 0~20cm 土层样,每小区按“S”型取 5 样品,并制成混合样。新鲜土样通过 2mm 筛后,一部分风干后,用于土壤养分的测定,另一部分于冰箱内冷藏(4℃, <72h)供土壤酶活性和微生物生物量 C、N、P 分析之用。

1.2.3 测定项目及其方法

物理指标 主要测定项目为容重、土壤微团聚体和非毛管孔隙度,所采用的测定方法依次为环刀法、吸管法和计算法等^[18]。

化学指标 土壤 pH、Eh 和土壤阳离子交换量(CEC)、土壤有机质含量(S.O.M)、土壤养分含量和还原物质总量等按常规测定方法^[18]。

生物指标 土壤磷酸酶活性用磷酸苯二钠法,以酚 μg/g, 24h, 37℃ 为单位;过氧化氢酶用 0.1mol KMnO₄ 滴定法,以 KMnO₄ ml/g, 24h, 37℃ 为单位;转化酶用滴定法,以葡萄糖 mg/g, 24h, 37℃ 为单位;脲酶活性用奈氏比色法,以 NH₄⁺-N mg/g, 24h, 37℃ 为单位^[19]。

土壤微生物量 C、N 取相当烘干土 50g 的新鲜土样 5 份于烧杯中,3 份置真空干燥器中,同时在干燥器内放入盛氯仿和水的小烧杯,抽气直至氯仿沸腾,将干燥器放置温室 25℃ 下熏蒸 24h。除去氯仿,加 0.5 mol/L K₂SO₄ 提取液(土:水=1:2),在往复式振荡机上振荡 30 min,过滤。与此同时,另两份土样直接加入 0.5mol/L K₂SO₄ 提取液,振荡过滤。提取液中 C 的测定用重铬酸钾-硫酸消煮,硫酸亚铁滴定法;N 的测定采用流动注射仪,测定其 NH₄-N 和 NO₃-N 含量,土壤微生物 C、N 含量以熏蒸和未熏蒸土样 0.5mol/L K₂SO₄ 提取液中 C、N 含量之差乘以转换系数 KEC 得到,BC=2.64EC, BN=EN/0.54,其中 EC 和 EN 分别为熏蒸土样与未熏蒸土样 C、N 之差;微生物量 P 采用氯仿熏蒸,0.5mol/L NaHCO₃ 提取(土:水=1:4)。熏蒸和提取过程同微生物量 C、N。提取液中 P 的测定用钼酸铵-抗坏血酸比色法, BP=EP/0.4(式中 EP 为熏蒸土样提取液中的 P 减去未熏蒸土样提取液中的 P)。

2 结果与分析

2.1 不同养分和水分模式对水稻土物理性状的影响

土壤物理环境对土壤质量和作物生长具有重要作用,测定结果表明(见表 2),不同养分和水分管理对土壤物理性状影响非常明显,单施有机肥(CF)的养分模式下的土壤容重明显高于有机无机肥配施(CM 和 CS)的土壤($P<0.05$ 或 $P<0.01$),而 1~0.01mm 微团聚体的含量和非毛管孔隙度比 CM 和 CS 的养分模式平均分别要小 16.2%和 21.7%($P<0.05$),相比而言,作物秸秆与化肥配施(CS)对土壤物理性状改善效果更为明显($P<0.05$)。就水分管理而言,在干湿交替(AWD)和控水灌溉(DRA)水分灌溉模式下,不同养分模式间的土壤物理特性指标的差异要明显大于在连续淹水(CWL)水分模式下,说明连续淹水条件削弱了有机肥料对改善土壤物理性质的效果。这可能是因为长期淹水会导致土壤结构破坏和产生粘闭(Puddling)^[16],从而大大抵消了有机物料对改善土壤物理性状的正面效应。

2.2 不同养分和水分模式对水稻土化学特性的影响

2.2.1 不同养分和水分模式对水稻土有机质含量和土壤阳离子交换量(CEC)的影响 土壤有机质是表征土壤质量的一个重要指标。除对照(CK)外,3 种养分模式下土壤有机质含量皆有所提高(图 1),但不同养分模式间土壤有机质含量提高幅度有明显不同,有机无机肥配施(CM 和 CS)的土壤有机质提高幅度明显高于单施化肥(CF)的土壤($P<0.05$),厩肥和化肥配施下土壤有机质含量比试验处理前土壤要高 3.5%(CLW)和 3.1%(AWD)。连续淹水(CLW)条件下,由于加入的有机物料或作物残体分解较慢,导致土壤有机质含量明显要高于干湿交替(AWD)和控水灌溉模式(DRA)下的土壤($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。

阳离子交换量(CEC)大小反映土壤保持养分能力的强弱,一般与土壤有机质呈正相关。本试验研究表明(图 2),有机无机肥配施的土壤 CEC 皆明显高于单施化肥的处理($P<0.01$ 或 $P<0.05$),其中以干湿交替(AWD)和厩肥+化肥(CM)的水分和养分模式组合为最高,而并非在连续淹水(CWL)与厩肥+化肥(CM)的水分和养分模式组合下为最高,说明在某些条件下土壤

有机质含量高并不意味着土壤 CEC 就高。

表 2 不同养分水分模式对水稻土物理特性影响 *

Table 2 Effect of soil nutrient and moisture regimes on physical properties of paddy soil

养分模式 Nutrient regimes	容重(g/cm) Volume weigh			1~0.01mm 微团聚体(%) Microaggregate 1~0.01mm			非毛管孔隙度(%) No-capillary pore space		
	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA
CK	1.35a	1.26b	1.24bc	68.4d	71.7c	74.2b	3.4f	5.2d	5.4cd
CF	1.40a	1.28b	1.27b	67.3d	70.9c	73.2b	2.8g	4.5e	4.6e
CM	1.27b	1.21cd	1.17de	72.1bc	76.8ab	75.2b	4.7e	5.8bc	6.1ab
CS	1.19d	1.14e	1.11f	73.0b	79.5a	76.3ab	5.1d	6.4a	6.9a

* 字母相同表示差异不显著,字母不同表示 $P<0.05$ 水平的显著差异 Means followed the same letter are not significantly different at 5 % level by Duncan's multiple range test

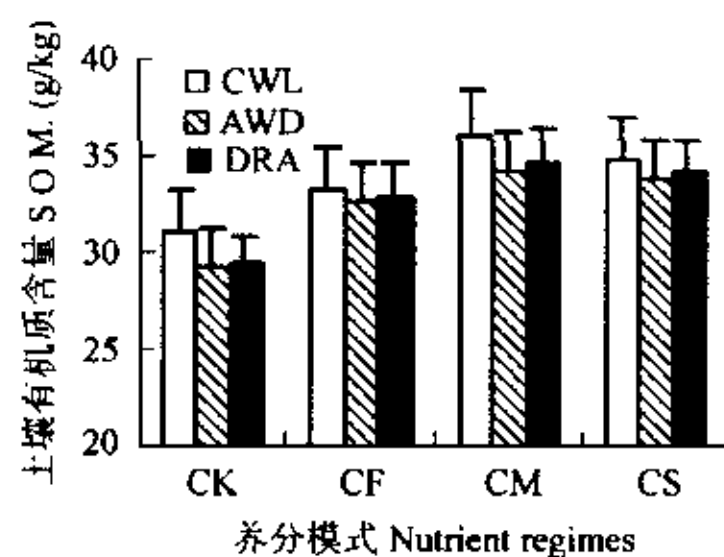


图 1 不同养分和水分模式对水稻土有机质含量的影响

Fig. 1 Effect of different nutrient and water regimes on paddy soil organic matter

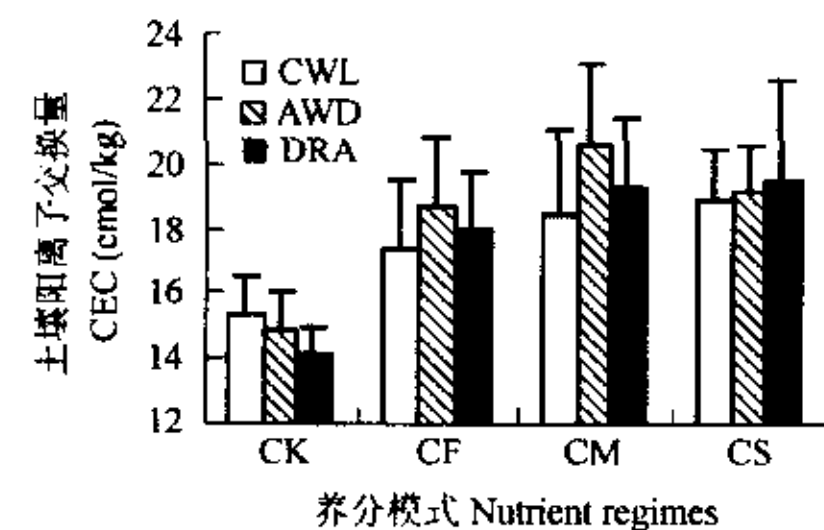


图 2 不同养分和水分模式对水稻土 CEC 的影响

Fig. 2 Effect of different nutrient and water regimes on paddy soil CEC

2.2.2 不同养分和水分模式对水稻土 N、P、K 养分含量的影响 与原土相比(见表 3),除对照 CK 外,各养分和水分模式均不同程度提高土壤全 N、P 和速效 P、K 的含量,但不同养分和水分模式间增加幅度有明显差异,有机无机肥配施的养分模式对土壤养分,特别是有效养分的提高幅度要明显高于单施化肥(CF)($P<0.01$ 或 $P<0.05$),其中以干湿交替(AWD)和连续淹水(CWL)下差异更为明显。相比较,对土壤速效 P 的提高效果要优于秸秆+化肥配施(CS)的养分模式。而对土壤速效 K 的增加效果,秸秆+化肥配施(CS)却明显优于厩肥+化肥配施(CM)的处理。连续淹水下(CWL),特别是在有机无机肥配施的养分模式下,土壤速效 P 的含量明显高于干湿交替和控水灌溉模式($P<0.01$),这可能有两方面原因,首先主要是持续淹水造成土壤长期处于还原状态,加上有机物料分解释放的有机酸,活化了土壤 P 素,提高了土壤 P 的有效性,另一方面由于长期淹水不利于根系的生长,降低了其对土壤有效 P 的吸收。由表 3 还可发现,干湿交替(AWD)有助于提高土壤速效 K 的含量,特别是在秸秆+化肥配施(CS)养分模式下的土壤速效 K 含量较原土壤增加了 36.3%。

表 3 不同养分水分模式对水稻土主要养分含量的影响 *

Table 3 Effect of soil nutrient and water regimes on contents of N, P, K of paddy soil

养分模式 Nutrient regimes	全氮 (g/kg) Total N			全磷 (g/kg) Total P			速效磷 (mg/kg) Avail. P			速效钾 (mg/kg) Avail. K		
	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA
CK	1.82 ± 0.11	1.74 ± 0.15	1.78 ± 0.13	0.85 ± 0.12	0.73 ± 0.05	0.81 ± 0.04	7.11 ± 1.12	6.45 ± 0.55	6.12 ± 0.67	86.2 ± 10.7	91.4 ± 8.75	81.6 ± 6.79
CF	2.01 ± 0.21	1.91 ± 0.11	1.95 ± 0.17	1.13 ± 0.14	1.09 ± 0.08	1.11 ± 0.10	9.12 ± 1.78	8.57 ± 0.45	8.82 ± 0.59	125.7 ± 15.7	131.2 ± 9.75	123.2 ± 10.8
CM	2.12 ± 0.19	2.01 ± 0.12	2.05 ± 0.17	1.17 ± 0.13	1.13 ± 0.07	1.15 ± 0.09	13.12 ± 2.02	11.89 ± 0.74	10.32 ± 1.20	138.9 ± 23.2	143.2 ± 11.5	133.7 ± 15.9
CS	2.18 ± 0.33	2.09 ± 0.17	2.11 ± 0.24	1.16 ± 0.22	1.15 ± 0.09	1.14 ± 0.15	11.78 ± 2.89	10.59 ± 0.87	9.82 ± 1.33	149.7 ± 21.7	163.2 ± 22.4	137.9 ± 10.8

* 平均值±标准误 The data in table were expressed as means $\pm$ SE

2.2.3 不同养分和水分模式对水稻土 Eh 和活性还原物质总量的影响 不同养分和水分模式下的土壤 Eh 存在显著或极显著差异($P<0.05$ 或 $P<0.01$)(见图 3),与单施化肥(CF)相比,有机无机肥配施,特别是厩肥与化肥配合施用(CM)可明显降低土壤 Eh,尤其是在连续淹水(CWL)下降低更为明显,这表明,在连续淹水下,有机肥施入土壤加剧了土壤的还原过程。这可能是

由于施入到土壤中的有机物料分解产生有机酸和有机还原物质。同时,有机物料的分解产物使土壤中无机还原物质 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等浓度增加,活性增强^[20~22]。

水稻土中的活性还原物质(如 Fe^{2+} 、 Mn^{2+})的变化涉及土壤的生物化学变化和化学变化^[24],其高低反映了水稻土潜育化(Soil gleization)和质量退化程度。图4为不同养分和水分模式下活性还原物质总量的比较,由图4可看出,不同养分和水分模式下活性还原物质总量的变化趋势与土壤 Eh 正好相反,在连续淹水模式(CWL)下,各养分模式处理的土壤活性还原物质总量大大高于干湿交替(AWD)和控水灌溉(DRA)的养分模式。不同养分模式比较可发现,有机无机肥配施的土壤活性还原物质总量要明显高于单施化肥的养分模式(CF)($P<0.01$ 或 $P<0.05$),其中以厩肥与化肥配施(CM)的土壤活性还原物质平均总量与单施化肥的养分模式(CF)的土壤差异最大($P<0.01$)。特别是在连续淹水下,厩肥与化肥配施的土壤活性还原物质总量较单施化肥的土壤高达 66.3%,这是由于在连续淹水下施用有机肥,特别是厩肥,加重了土壤的还原过程,从而使得土壤中活性还原物质总量显著增加。

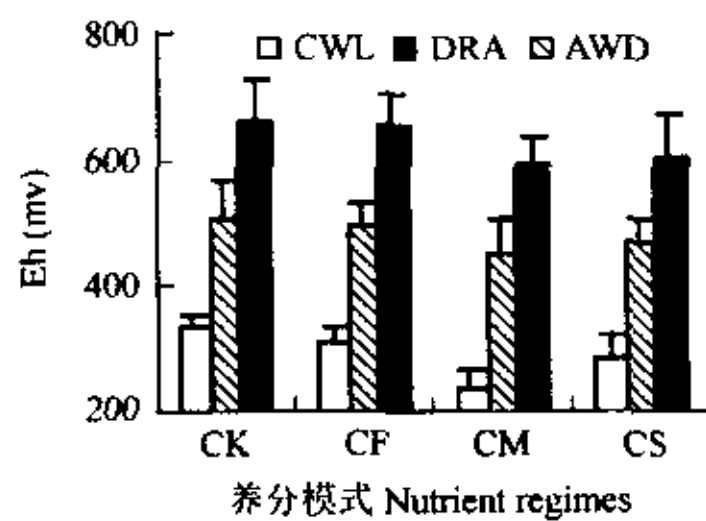


图3 不同养分和水分模式对水稻土 Eh 的影响

Fig. 3 Effect of different nutrient and water regimes on Eh of paddy soil

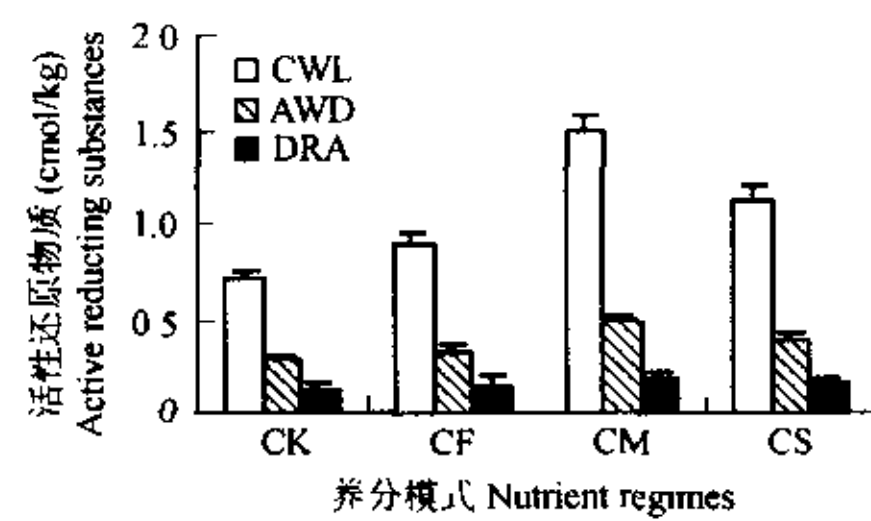


图4 不同养分和水分模式对水稻土还原物质总量的影响

Fig. 4 Effect of different nutrient and water regimes on total active reducing substances in paddy soil

2.3 不同养分和水分模式对水稻土关键酶的活性和微生物生物量的影响

2.3.1 不同养分和水分模式对土壤关键酶的活性的影响 土壤酶参与土壤中许多重要的生物化学过程—腐殖质的合成与分解,有机化合物、高等植物和微生物残体的分解及其转化等,与土壤肥力质量密切相关^[19]。表4表明不同养分和水分模式下土壤酶的活性有明显差异($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。有机无机肥配施的土壤磷酸酶、过氧化氢酶、转化酶和脲酶的活性皆高于单施化肥(CF)的处理,其中以控水(DRA)模式和干湿交替(AWD)模式下相差最为明显,分别达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$),由表4还可看出,在不同水分管理模式下,不同有机物料对土壤酶活性提高的效果明显不同,除连续淹水(CWL)的水分模式下外,厩肥与化肥配施的养分模式(CM)对土壤酶提高效果均优于秸秆与化肥(CS)配施的养分模式,特别是在干湿交替(AWD)模式下,两种有机无机配施的土壤磷酸酶、过氧化氢酶、转化酶和脲酶的活性差异均达到极显著水平($P<0.01$)。其原因还有待于进一步研究。

表4 不同养分水分模式对土壤酶活性的影响*

Table 4 Effect of soil nutrient and moisture regimes on enzymatic of activities paddy soil

养分模式 Nutrient regimes	磷酸酶 Phosphatase Phenol($\mu\text{g/g}$), 24h, 37 C			过氧化氢酶 Catalase KMnO ₄ (ml/g), 24h, 37 C			转化酶 Ivertase (mg/g), 24h, 37 C			脲酶 Urease NH ₃ (mg/g), 24h, 37 C		
	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA
CK	0.68 ± 0.12	0.73 ± 0.05	0.72 ± 0.10	6.12 ± 0.82	6.98 ± 0.72	6.64 ± 0.47	4.21 ± 0.64	5.12 ± 0.38	5.07 ± 0.59	0.58 ± 0.11	0.64 ± 0.07	0.65 ± 0.12
CF	0.72 ± 0.14	0.87 ± 0.09	0.78 ± 0.05	6.98 ± 0.07	8.02 ± 1.25	7.23 ± 0.87	4.43 ± 0.59	5.87 ± 0.42	5.57 ± 0.77	0.67 ± 0.10	0.72 ± 0.08	0.69 ± 0.06
CM	0.81 ± 0.12	2.01 ± 0.15	1.65 ± 0.18	8.12 ± 1.44	14.5 ± 2.05	8.87 ± 0.04	6.74 ± 1.12	9.15 ± 0.55	8.23 ± 0.67	0.84 ± 0.11	1.33 ± 0.07	1.19 ± 0.09
CS	0.98 ± 0.11	1.49 ± 0.17	1.35 ± 0.09	9.28 ± 1.31	11.2 ± 1.37	11.8 ± 0.98	5.33 ± 0.89	7.23 ± 0.67	7.01 ± 0.57	0.79 ± 0.10	0.98 ± 0.07	0.92 ± 0.13

* 平均值 $\pm$ 标准误 The data in table were expressed as Means $\pm$ SE

2.3.2 不同养分和水分模式对土壤微生物生物量 C、N、P 的影响 土壤微生物生物量是土壤生物活性和土壤质量的一个重要指标,它既是土壤有机质和土壤养分转化与循环的动力,也是土壤中的活性有效养分库^[12,23,24]。对不同养分和水分模式下土壤微生物生物量 C、N、P 的测定结果表明(见表5),有机无机肥配施的土壤微生物 C、N、P 皆高于单施化肥(CF)的养分模式。在连续淹水(CWL)下,秸秆与化肥(CS)配施的土壤微生物生物量高于厩肥与化肥配施(CM)的养分模式;厩肥与化肥配施(CM)养

分模式在控水灌溉(DRA)和干湿交替(AWD)模式下,更有利于提高土壤微生物生物量,特别是微生物P量,其中以在干湿交替(AWD)的水分模式下效果更为明显($P<0.01$),测定结果表明,在干湿交替(AWD)的水分模式下,厩肥与化肥配施的土壤微生物C、N、P量比单施化肥(CF)分别高62.8%、86.1%和111.7%。这可能是由于干湿交替的灌溉模式大大改善了土壤理化环境,从而有利于土壤微生物量增加^[12,14]。

表5 不同养分和水分模式对土壤微生物生物量C、N、P的影响(mg/kg)*

Table 5 Effect of different nutrient and water regimes on microbial biomass C, N, P in paddy soil

养分模式 Nutrient regimes	微生物量 C Microbial biomass C			微生物量 N Microbial biomass N			微生物量 P Microbial biomass P		
	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA	CWL	AWD	DRA
CK	412.3g	523.7ef	488.7f	23.7g	31.7ef	28.7fg	19.8f	22.1f	21.6f
CF	454.6fg	587.1d	537.1e	29.6f	38.9d	34.8e	31.9e	35.9e	33.6e
CM	585.5de	955.9a	853.7b	35.5de	72.4a	63.6a	53.3d	70.0b	79.8a
CS	643.2cd	778.7b	676.4c	42.8c	50.1b	45.7bc	52.6d	58.7c	51.7d

* 字母相同表示差异不显著,字母不同表示 $P<0.05$ 水平的显著差异 Means followed the same letter are not significantly different at 5% level by Duncan's multiple range test

2.4 不同养分和水分模式下水稻土质量的综合评价

基于土壤系统的复杂性和构成土壤质量的土壤物理、化学和生物特性指标变化连续性和渐变性,故在本次水稻土质量评价中采用模糊综合评判^[25]的方法对9种养分和水分模式组合,即:MG1,单施化肥+连续淹水;MG2,单施化肥+干湿交替;MG3,单施化肥+控水灌溉;MG4,厩肥与化肥配施+连续淹水;MG5,厩肥与化肥配施+干湿交替;MG6,厩肥与化肥配施+控水灌溉;MG7,秸秆与化肥配施+连续淹水;MG8,秸秆与化肥配施+干湿交替;MG9,秸秆与化肥配施+控水灌溉下的土壤质量进行评价。

2.4.1 评价指标的选取及其权重的确定 土壤质量评价指标体系应包括土壤物理、化学和生物学指标。本文根据前人研究,并结合水稻土本身的特性,现将土壤有机质(X_1)、土壤CEC(X_2)、全氮(X_3)、土壤Olsen-P(X_4)、速效K(X_5)、土壤还原物质总量(X_6)、土壤容重(X_7)、土壤1~0.01mm微团聚体的含量(X_8)、磷酸酶(X_9)和转化酶活性(X_{10})、微生物量C(X_{11})、微生物量N(X_{12})等指标作为水稻土质量的评价指标。运用层次分析法(AHP^[26])和专家打分的方法,确定各评价指标的相对权重,即得到指标权重的模糊向量(B), $B=(0.124,0.043,0.132,0.092,0.082,0.049,0.055,0.078,0.089,0.073,0.101,0.082)$ 。

2.4.2 评价指标隶属函数 $A(X)$ 的选择和隶属度的计算 根据各评价指标的模糊分布特点,土壤养分和CEC、土壤微团聚体含量、土壤酶活性和微生物生物量C、N指标采用升半梯形分布的隶属函数;土壤还原物质总量和土壤容重指标采用降半梯形分布的隶属函数。在此基础上,依据太湖地区水稻的生态需求确定各评价指标的隶属函数(表6)。由表6所列的分布函数来确定各评价指标的隶属度(表7)。

表6 不同评价指标的隶属函数

Table 6 Subordinate functions for different evaluation indexes

$X_1 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 15 \\ (x-15)/20 & 15<x<35 \\ 1 & x\geq 35 \end{cases}$	$X_2 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 10 \\ (x-10)/20 & 10<x<30 \\ 1 & x\geq 30 \end{cases}$
$X_3 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 1 \\ (x-1)/3 & 1<x<4 \\ 1 & x\geq 4 \end{cases}$	$X_4 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 5 \\ (x-5)/15 & 5<x<20 \\ 1 & x\geq 20 \end{cases}$
$X_5 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 30 \\ (x-30)/100 & 30<x<130 \\ 1 & x\geq 100 \end{cases}$	$X_6 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\geq 1.0 \\ (1.0-x)/0.85 & 0.15<x<1.0 \\ 1 & x\leq 0.15 \end{cases}$
$X_7 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\geq 1.35 \\ (1.35-x)/0.15 & 1.20<x<1.35 \\ 1 & x\leq 1.20 \end{cases}$	$X_8 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 30 \\ (x-30)/45 & 30<x<75 \\ 1 & x\geq 75 \end{cases}$
$X_9 \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 0.5 \\ (x-0.5)/2.5 & 0.5<x<3.0 \\ 1 & x\geq 3.0 \end{cases}$	$X_{10} \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 3 \\ (x-3)/9 & 3<x<12 \\ 1 & x\geq 12 \end{cases}$
$X_{11} \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 300 \\ (x-300)/600 & 300<x<900 \\ 1 & x\geq 900 \end{cases}$	$X_{12} \mu(X)=\begin{cases} 0 & x\leq 10 \\ (x-10)/70 & 10<x<80 \\ 1 & x\geq 80 \end{cases}$

表 7 各评价指标的隶属度

Table 7 Subordinative degree of indexes

模式组合	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
MG1	0.909	0.370	0.337	0.275	0.957	0.129	0.000	0.696	0.088	0.159	0.258	0.280
MG2	0.877	0.435	0.303	0.238	1.000	0.788	0.467	0.798	0.148	0.319	0.479	0.413
MG3	0.886	0.395	0.317	0.255	0.932	1.000	0.533	0.738	0.112	0.286	0.395	0.354
MG4	1.000	0.420	0.373	0.541	1.000	0.000	0.533	0.980	0.124	0.416	0.476	0.364
MG5	0.962	0.530	0.337	0.459	1.000	0.612	0.933	1.000	0.604	0.683	1.000	0.891
MG6	0.979	0.465	0.350	0.355	1.000	0.965	1.000	1.000	0.640	0.581	0.923	0.766
MG7	0.981	0.445	0.360	0.452	1.000	0.000	1.000	1.000	0.192	0.259	0.572	0.469
MG8	0.943	0.455	0.393	0.373	1.000	0.729	1.000	1.000	0.396	0.470	0.798	0.573
MG9	0.956	0.475	0.370	0.321	1.000	0.988	1.000	1.000	0.340	0.446	0.627	0.510

以不同评价指标和处理组合分别作为矩阵的行与列,得到模糊关系矩阵(R):

$$R = \begin{pmatrix} 0.909 & 0.877 & 0.866 & 1.000 & 0.962 & 0.979 & 0.981 & 0.943 & 0.956 \\ 0.370 & 0.435 & 0.395 & 0.420 & 0.530 & 0.466 & 0.445 & 0.455 & 0.475 \\ 0.337 & 0.303 & 0.317 & 0.373 & 0.337 & 0.350 & 0.360 & 0.393 & 0.370 \\ 0.275 & 0.238 & 0.255 & 0.541 & 0.459 & 0.355 & 0.452 & 0.373 & 0.321 \\ 0.957 & 1.000 & 0.932 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.129 & 0.788 & 1.000 & 0.000 & 0.612 & 0.965 & 0.000 & 0.729 & 0.988 \\ 0.000 & 0.467 & 0.533 & 0.533 & 0.933 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.696 & 0.798 & 0.738 & 0.980 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.088 & 0.148 & 0.112 & 0.124 & 0.604 & 0.640 & 0.192 & 0.396 & 0.340 \\ 0.159 & 0.319 & 0.286 & 0.416 & 0.683 & 0.581 & 0.259 & 0.470 & 0.446 \\ 0.258 & 0.479 & 0.395 & 0.476 & 1.000 & 0.923 & 0.572 & 0.798 & 0.627 \\ 0.280 & 0.413 & 0.354 & 0.364 & 0.891 & 0.766 & 0.469 & 0.573 & 0.510 \end{pmatrix}$$

2.4.3 综合评判 按线形变换方法,即矩阵按乘法运算:

$$C = B \cdot R$$

$$C = (B_1, B_2, \dots, B_m) \quad (1)$$

其中, $B_j = \sum W_i \cdot r_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$, B_j 是处理组合的隶属度。根据隶属度的大小,可确定不同养分和水分模式对土壤质量的综合效应位次,将各评价指标权重的模糊向量和模糊关系矩阵代入公式(1),得 $C = (0.4112, 0.5166, 0.5042, 0.5486, 0.7478, 0.7387, 0.5772, 0.6705, 0.6487)$, 便可知各养分和水分模式组合的隶属度,根据隶属度大小所确定各养分和水分模式组合的综合评判位次为: $MG5 > MG6 > MG8 > MG9 > MG7 > MG4 > MG2 > MG3 > MG1$ 。由评判位次表明,有机无机肥配合施用的养分模式的总体隶属度大于单施化肥的养分模式,同一养分模式下,干湿交替和控水灌溉模式的隶属度要大于连续淹水模式,其中以干湿交替和厩肥与化肥配施的模式组合(MG5)的隶属度最大,为 0.7478, 即该养分和水分模式组合下的土壤肥力质量指标的综合表现最好,控水灌溉模式次之,厩肥与化肥配施的模式和连续淹水模式组合(MG4)隶属度较另两种水分模式组合为小,即该模式组合下土壤质量劣于 MG5 和 MG6, 表明有机无机肥配施只有在合理的水分管理模式下才能在改善土壤质量中发挥更大的效应;单施化肥和连续淹水的模式组合的隶属度是 0.1633, 为最小,说明该养分和水分模式组合下的土壤质量指标的综合表现最差。

3 结语

不同养分和水分管理模式组合对水稻土质量的影响有着明显的差异,本研究结果表明,有机无机肥配施,特别是厩肥与化肥配合施用与干湿交替的养分和水分模式配置可明显改善土壤物理、化学环境和提高土壤生物学活性,从而大大提高了土壤的综合质量。而连续淹水的灌溉模式却削弱了有机物料对土壤的物理环境和生物学特性的改善效果。这也进一步说明有机无机肥配合施用只有在合理的水分管理模式下才能在改善和提高水稻土质量中发挥更大的效应。

氧化还原体系是决定水田土壤性质的主要因子^[21]。在连续淹水下,土壤中加入有机物料,特别是厩肥,虽在某种程度上可以提高土壤有机质和养分含量,但由于厩肥在渍水条件下分解产生许多有机还原物质,如有机酸,同时分解产物还使 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等无机还原物质活度增强^[22],改变了土壤的原有的氧化还原体系,导致了土壤还原物质总量的迅速增加,恶化了土壤的理化环境,不利于土壤质量的改善与提高^[22, 27]。由于土壤质量指标本身的复杂性,有关不同有机无机肥配施(有机肥种类和比例)和水分管理模式的配置对水稻土质量,特别是对土壤化学与生物学特性的影响机理还有待于进一步研究和探讨。这将对该

地区的水稻土的培育和实现可持续利用具有重要意义。

References:

- [1] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, *et al.* Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 1997, **61**: 4~10.
- [2] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality. In: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 1994.
- [3] Seybold C A, Mausbach M J, Karlen D L, *et al.* Quantification of soil quality. In: R. Lal, J. M. Kimble, R. F. Follett, and B. A. Stewart, eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press, Boca Raton, 1998. 387~404.
- [4] Becker M, Johnson D E. Cropping intensity effects on upland rice yield and sustainability in West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **59**(2): 107~117.
- [5] Gewin V L, Veseth R, Miller B C, *et al.* Soil quality changes in eastern Washington with Conservation Reserve Program (CRP) take out. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, **54**(1): 432~438.
- [6] Herrick J E, Brown J R, Tugel A J, *et al.* Application of soil quality to monitoring and management: Paradigms from rangeland ecology. *Agronomy Journal*, 2002, **94**(1): 3~11.
- [7] Sun B, Zhao Q G. Evaluation indexes and methods of soil quality concerning red soil degradation. *Progress in Geography*, 1999, **18**(2): 118~128.
- [8] Jeffrey E, Herrick. Soil quality: an indicator of sustainable land management? *Applied Soil Ecology*, 2000, **15**(1): 75~83.
- [9] Kong Z H, Zhang X S, Zhou G S. Review on sustainable agriculture and some key indicators. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(4): 577~585.
- [10] Chakrabarti K, Sarkar B, Chakraborty A, *et al.* Organic recycling for soil quality conservation in a sub-tropical plateau region. *Journal of agronomy and crop science*, 2000, **184**(2): 137~142.
- [11] Motta A C, Reeves D W, Touchton J T, *et al.* Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in two coastal plain soils. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2002, **33**(5~6): 913~932.
- [12] Li S Q, Li S X. Effects of organic materials on maintaining soil microbial biomass nitrogen. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1): 136~142.
- [13] Schjonning P, Elmholt S, Munkholm L J, *et al.* Soil quality aspects of humid sandy loams as influenced by organic and conventional long-term management. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, **88**(3): 195~214.
- [14] Stamatiadis S, Werner M, Buchanan M. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). *Applied Soil Ecology*, 1999, **12**(3): 217~225.
- [15] Muneshwar Singh, Singh V P, Reddy K S, *et al.* Effect of integrated use of fertilizer nitrogen and farmyard manure or green manure on transformation of N, K and S and productivity of rice-wheat system on a vertisol. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 2001, **49**(34): 430~435.
- [16] Bhushan L, Sharma P K. Long-term effects of lantana (*Lantana* spp. L.) residue additions on soil physical properties under rice-wheat cropping I. soil consistency, surface cracking and clodformation. *Soil & Tillage Research*, 2002, **65**(2): 157~167.
- [17] Xu Q. Evolution of soil fertility in relation to its quality in paddy field of the Taihu Lake area. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, **10**(4): 323~328.
- [18] Lu R K. *Method of analysis in soil and agrochemistry*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999. 146~196, 266~288.
- [19] Guan S Y. *Soil enzyme and research method*. Beijing: Agriculture Press, 1986. 274~276, 294~298, 323.
- [20] Navas A, Bermúdez F, Machi J. Influence of sewage sludge application on physical and chemical properties of Gypsisols. *Geoderma*, 1998, **87**(1~2): 123~135.
- [21] Gao S, Tanji K K, Scardaci S C, Chow A T. Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice-growing season. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(3): 805~817.
- [22] Imbellone P A, Guichon B A, Gimenez J E. Dynamics of physical-chemical properties in soils with anthropic flooding, Buenos Aires Province, Argentina. *Soil Science*, 2001, **166**(12): 930~939.
- [23] Shi Y X, Tang K L. Changes of Biological Characteristics of Soil Quality Under Man made Accelerated Erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, **4**(1): 28~34.
- [24] Jimenez M D, de la Horra A M, Pruzzo L, *et al.* Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, **35**(4): 302~306.
- [25] Deng J L. *The Basic Methods of Grey System*. Wuhan: Huadong Science-Engineering University Press, 1996.
- [26] Saaty T L. *The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGrawHill, 1980.
- [27] Yang C M, Yang L Z, Yan T M. Effects of nutrient and water regimes on paddy soil eco-environment. *Rural Eco-Environment*, 2002, **18**(3): 11~15.

参考文献:

- [7] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法. *地理科学进展*, 1999, **18**(2): 118~128.
- [9] 孔正红, 张新时, 周广胜. 可持续农业及其指示因子研究进展. *生态学报*, 2002, **22**(4): 577~585.
- [12] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用. *生态学报*, 2001, **21**(1): 136~142.
- [17] 徐琪. 论水稻土肥力进化与土壤质量——以太湖地区为例. *长江流域资源与环境*, 2001, **10**(4): 323~328.
- [18] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学出版社, 1999. 146~196, 266~288.
- [19] 关松荫. *土壤酶及其研究法*. 北京: 农业出版社, 1986. 274~276, 294~298, 323.
- [23] 史衍玺, 唐克丽. 人为加速侵蚀下土壤质量的生物学特性变化. *水土保持学报*, 1998, **4**(1): 28~34.
- [25] 邓聚龙. *灰色系统基本方法*. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [27] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅. 不同养分和水分管理模式对土壤生态环境影响. *农村生态环境*, 2002, **18**(3): 11~15.