

中亚热带红壤地区稻-稻-草轮作系统 稻田土壤质量评价

王 华¹, 黄 宇^{1,2*}, 阳柏苏³, 黄 璜¹, 张 芬⁴

(1. 湖南农业大学生态研究所, 长沙 410128; 2. 湖南省科技厅, 长沙 410001;
3. 中南林学院, 长沙 410004; 4. 湖南农业大学教务处, 长沙 410128)

摘要: 在中亚热带红壤地区, 利用定位研究方法, 比较了 5 种不同的轮作模式, 即早稻-晚稻-黑麦草、早稻-晚稻-黑麦草-早稻-晚稻-冬闲、早稻-晚稻-3/4 黑麦草-1/4 紫云英、早稻-晚稻-紫云英、早稻-晚稻-冬闲, 对稻田土壤质量的影响。研究结果表明, 与常规稻作系统相比较, 在稻-草轮作模式下, 稻田土壤养分含量增加, 物理性状改善, 土壤生物活性提高, 土壤动物数量增加。在对土壤功能评价的基础上利用土壤质量评价体系定量地评价了 5 种轮作模式的土壤质量状况。“水分贮存功能”(AW E)、“土壤结构退化抑制功能”(RSSD)、“稻田作物品质和产量维持功能”(SCQP) 其评价价值以及最终的土壤质量指数(SQ I) 都是稻-稻-3/4 黑麦草-1/4 紫云英、稻-稻-黑麦草、稻-稻-紫云英 3 种轮作模式大于常规稻作模式, 其中以稻-稻-3/4 黑麦草-1/4 紫云英表现最优;“促使水分运移、提高水分有效性功能”(FWMA) 功能在 5 种轮作模式中其评价价值相等。结果还表明, 土壤质量指数(SQ I)、土壤退化指数(SD I) 和生物肥力指数(BIF) 之间具有良好的线性关系, 说明此 3 种评价方法都能有效地评价研究试区稻田土壤质量。土壤退化指数(SD I) 表明, 稻-草轮作模式稻田土壤质量都有不同程度的提高, 而常规稻作系统稻田土壤质量有轻微下降。稻田土壤蚯蚓丰富度与土壤质量指数(SQ I)、土壤退化指数(SD I) 和生物肥力指数(BIF) 都成显著的正相关, 蚯蚓的丰富度可指示本研究试区稻田土壤质量。

关键词: 稻-草轮作; 黑麦草; 土壤质量评价; 土壤功能; 红壤地区

文章编号: 1000-0933(2005)12-3271-11 中图分类号: X53 文献标识码: A

Paddy soil quality assessment under rice-ryegrass rotation system in red soil region of mid-subtropics

WANG Hua¹, HUANG Yu^{1,2*}, YANG Bo-Su³, HUANG Huang¹, ZHANG Fen⁴ (1. Research Institute of Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Science and Technology Department of Hunan Province, Changsha 410001, China; 2. Central South Forestry University, Changsha 410004, China; 4. Academic Affairs Office, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3271~3281

Abstract Five different rotation systems, viz. early rice-late rice-ryegrass (*Lolium multiflorum*), early rice-late rice-ryegrass-early rice-late rice-winter fallow, early rice-late rice-3/4ryegrass-1/4Chinese milk vetch (*Stragalus sinicus*), early rice-late rice-Chinese milk vetch and early rice-late rice-winter fallow, were established in red soil region of mid-subtropics. Five rotation models effects on soil characteristics were evaluated by measuring different physico-chemical, microbiological, biochemical parameters and soil animal. The results showed that, compared with conventional cropping system, rice (*Oryza sativa*)-ryegrass rotation systems improved paddy soil physico-chemical and biological properties as well as increased soil animal. Soil functions and soil quality assessment showed that, soil functions, viz. accommodate water entry (AW E), resist surface structure degradation (RSSD), sustain fieldcrop quality and productivity (SCQP) and soil quality index (SQ I) were all

基金项目: 湖南省重点资助项目(No. 04NK3062)

收稿日期: 2005-05-19; 修订日期: 2005-10-19

作者简介: 王华(1975~), 女, 博士, 主要从事环境生态学以及生态系统评价与管理研究。E-mail: wangchina926@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence

Foundation item: Key Research Program of Hunan Province (No. 04NK3062)

Received date: 2005-05-19; Accepted date: 2005-10-19

Biography: WANG Hua, Ph. D., mainly engaged in environment ecology, ecosystem assessment and management

higher under early rice-late rice-3/4ryegrass 1/4Chinese milk vetch, early rice-late rice-ryegrass and early rice-late rice-Chinese milk vetch than under early rice-late rice-winter fallow, the assessment values being greater under early rice-late rice-3/4ryegrass 1/4Chinese milk vetch; facilitate water movement and availability (FWMA) was equal among five rotation models. The results also showed that, highly correlations between soil quality index (SQI), soil degeneration index (SDI) and biological index of fertility (BIF) were also detected, suggesting these three methods were all feasible to assess paddy soil quality in this study area. In addition, soil degeneration index (SDI) also suggested that, compared to the waster land in this study area, paddy field increased to varying degree under all rice-ryegrass rotation systems and decreased slightly under conventional cropping system in the present study. There were also positive correlations between earthworm abundance of paddy soil and soil quality index (SQI), soil degeneration index (SDI), biological index of fertility (BIF), indicating earthworm abundance can be used as indicator of paddy soil quality in this study area.

Key words: rice-ryegrass rotation system; ryegrass; paddy soil quality assessment; soil function; red soil region

由于我国人多地少,形成了人畜争粮、粮饲争地的矛盾,这些矛盾随着人口的增加和人们物质生活水平的提高以及对肉、蛋、奶、皮毛等需求的增加而愈发激烈。这种状况在我国的南方地区尤为突出。我国亚热带地区饲养业和养殖业由于缺乏青饲料,使得青饲料供应远不能满足畜牧业发展的要求,导致生产者不得不使用大量的粮食做精饲料,造成饲养成本增加,也提高了粮食的消耗量。一方面,由于人口和建设用地等的不断增加,饲料生产用地也在逐渐减少;另外一方面,长期的粮食-经济作物二元结构造成作物生产时空搭配上的协调,浪费了大量的耕地和光、热、水等资源,土地的利用率和利用效率不高。据不完全统计,每年全国仅冬(夏秋)闲田就达到 2000 万 hm^2 ,而且因外出务工人员的增多,近年来农田闲置面积也随之大量增加^[1,2]。这显然是一项极有价值的可利用土地资源,但往往为人们所忽视而未加以开发利用。自从我国加入世贸组织后,湖南省就提出了要大力发展畜牧业,并将其列为农业六大支柱产业之一,所以在湖南省利用冬闲田发展青饲料具有非常广阔的前景。

20 世纪 90 年代以来,许多科研工作者探讨了在我国亚热带区域建立“草-水稻”草田轮作系统的可行性^[1-3],并研究了草田轮作的方法以及草田轮作对水稻和牧草产量、品质、土壤性质的影响^[4-11]。研究发现,草田轮作系统能增加后作水稻的总生物量、提高有效分蘖数、成穗率和结实率,土壤理化性质和生物学性质也得到了不同程度的改善^[4-11]。因此已有研究表明草田轮作系统具有很好的经济效益、生态效益和社会效益^[11]。

本研究本文采用 Glover 等人介绍的土壤质量评价体系^[12],将土壤功能划分为“水分贮存功能(AWE accommodate water entry)”、“促使水分运移、提高水分有效性功能(FWMA facilitate water movement and availability)”、“土壤结构退化抑制功能(RSSD resist surface structure degradation)”、“稻田作物品质和产量维持功能(SCOP sustain fieldcrop quality and productivity)”4类,在对土壤功能评价的基础上直观定量地评价稻田土壤质量,以了解不同轮作模式对土壤的影响程度。这既可以为农业的高效持续发展提供依据,同时还可以为亚热带区域稻田生态系统土壤质量指标的选定和系土壤质量的评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究选在湖南省桃江县桃花江镇进行,该地区属典型的亚热带湿润气候,年平均气温 16.7℃,年降水量 1500~1700 mm,稻田土壤是由第四纪红壤发育而成的黄泥田。

试验设 5 个处理:A 早稻-晚稻-黑麦草;B 早稻-晚稻-黑麦草 早稻-晚稻-冬闲;C 早稻-晚稻-3/4 黑麦草 1/4 紫云英;D 早稻-晚稻-紫云英;E 早稻-晚稻-冬闲。

A、B、D 3 个处理黑麦草或紫云英均按 15000 kg/hm^2 翻压作肥料还田,C 按 7500 kg/hm^2 黑麦草+ 250 kg/hm^2 紫云英翻压作肥料还田,其余作饲料。草套播前施复合肥 375 kg/hm^2 (N P K = 1 1 1),在 10 月上中旬散播与稻田中,水稻收割后 10~15d 结合田间灌水施尿素 150 kg/hm^2 ,草 30 cm 左右收割 1 次,每次留茬 5~6cm。稻草不还田(稻茬除外)。

5 个处理的施肥、耕作以及有关农田管理均相同。单季水稻 (*Oryza sativa*) 按每公顷施 N 150 kg, P_2O_5 82.5 kg, K_2O 12.0 kg,黑麦草 (*Lolium multiflorum*) 和紫云英 (*Astragalus sinicus*) 生长期间不施肥。小区面积 60 m^2 ,小区间用田埂隔开,每个处理设 3 个重复,随机排列。

1.2 土样采集与测定

本试验从 1999 年开始,2004 年在收割晚稻之后分别在各处理采用多点法取 0~10 cm 表层土壤,混合制样供室内分析。用于测定土壤酶和呼吸强度的土样同期采取,放置于 4℃ 的冰箱中备分析。蚯蚓测定采用手捡法,样方大小为 20m × 20m^[13]。

全氮含量采用凯氏法,全磷含量采用氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法,全钾含量采用火焰光度法;有机质含量采用重铬酸钾

法; 水解 N 含量测定采用扩散法; 速效 P 含量测定采用碳酸氢钠法; 速效 K 含量测定采用醋酸铵提取——火焰光度法; 阳离子交换量(CEC)采用醋酸铵法; pH 值采用酸度计测定; 土壤容重、孔隙度测定采用环刀法; 水稳性团聚体采用湿筛法^[14]。土壤脲酶(U R)采用扩散法; 土壤蛋白酶(PR)、酸性磷酸酶(A P)和脱氢酶(DH)采用比色法; 土壤过氧化氢酶(CA)、转化酶采用滴定法; 土壤呼吸强度采用碱石灰吸收法^[15]。

土壤微生物量 C (C_{mic})、N (N_{mic})、P (P_{mic})采用熏蒸法^[16]。代谢熵或呼吸熵(qCO_2)是土壤呼吸强度与微生物-C 的比值, 用 $mg CO_2-C/(h \cdot g)$ 微生物-C 表示; 微生物熵(C_{mic} / C_{org})是微生物-C 与总有机-C 的比值。

1.3 土壤质量评价

土壤质量到目前为止在国际上还没有一个全面的、系统的、权威的评价体系使其精确量化, 事实上对土壤质量的界定是非常复杂的, 涉及到很多方面, 诸如土壤类型、土地利用方式, 还有作物或植被的自身特性等等。另外, 土壤质量评价参数也是非常之多, 包括物理的、化学的、生物的, 所以这些都要影响到对土壤质量的界定。现在不管是国内还是国外都有大量的科研工作者在不断地探索, 土壤质量的评价体系也在不断地完善。本研究采用 Glover 等人介绍的土壤质量评价体系^[12], 参照赵其国等^[17]对整个红壤地区不同利用方式下土壤状况的调查, 本评价体系将土壤功能划分为“水分贮存功能”(AW E)、“促使水分运移、提高水分有效性功能”(FWMA)、“土壤结构退化抑制功能”(RSSD)、“稻田作物品质和产量维持功能”(SCOP)4 类, 在对土壤功能评价的基础上直观定量地评价稻田土壤质量。

土壤质量评价指标标准化的标准评分方程(Standard Scoring Function 即 SSF)可参见文献^[18, 19], 土壤质量评价体系中的土壤功能和指标权重、土壤质量指标中各土壤性质的相对重要值以及土壤质量评价指标的阈值分别见表 1、表 2 和表 3。

表 1 土壤质量评价体系中的土壤功能和指标权重

Table 1 Weights of soil functions and indicators in soil quality assessment

土壤功能	Soil function	权重	第 1 层次指标	权重	第 2 层次指标	权重	
		Weight	Indicator of level 1	Weight	Indicator of level 1	Weight	
贮存水分 water entry (AW E)	Accommodate	0.25	水稳性团聚体	Water-stable microaggregate	0.40		
			容重	Bulk density	0.40		
			蚯蚓	Earthworms	0.20		
促使水分运移、 提高水分 有效性 Facilitate water movement and availability (FWMA)	0.25	0.25	毛管水含量	Capillary moisture content	0.40		
			总孔隙度	Total porosity	0.25		
			总有机 C	Total organic C	0.25		
			蚯蚓	Earthworms	0.10		
抑制土壤结构退化 Resist surface structure degradation (RSSD)	0.25	0.25	水稳性团聚体	Water-stable microaggregate	0.40		
			总有机 C	Total organic C	0.40		
			微生物过程	Microbial processes	0.20	微生物 C Microbial biomass-C	0.40
						微生物 N Microbial biomass-N	0.40
						毛管水含量 capillary moisture content	0.20
维持稻田作物品质 和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity (SCQP)	0.25	0.25	CEC		0.20		
			总有机 C	Total organic C	0.20		
			pH		0.10		
			微生物过程	Microbial processes	0.10	微生物 C Microbial biomass-C	0.40
						微生物 N Microbial biomass-N	0.40
						毛管水含量 capillary moisture content	0.20
			全 N	Total N	0.10		
			水解 N	Hydrolyzable N	0.10		
有效 P	Available P	0.10					
电导率	Electrical conductivity	0.10					

表 2 土壤质量指标中各土壤性质的相对重要值

Table 2 Relative importance of soil properties in the soil quality index

土壤性质 Soil property	权重 Weight	土壤功能 Soil functions effected
总有机 C Total organic C	0.2125	贮存水分 Accommodate water entry 促使水分运移, 提高水分有效性 Facilitate water movement and availability 抑制土壤结构退化 Resist surface structure degradation
水稳性团聚体 Water-stable microaggregate	0.200	贮存水分 Accommodate water entry 抑制土壤结构退化 Resist surface structure degradation
毛管水含量 Capillary moisture content	0.1150	促使水分运移, 提高水分有效性 Facilitate water movement and availability 抑制土壤结构退化 Resist surface structure degradation 维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
容重 Bulk density	0.1000	贮存水分 Accommodate water entry
蚯蚓 Earthworms	0.0750	贮存水分 Accommodate water entry 促使水分运移, 提高水分有效性 Facilitate water movement and availability
总孔隙度 Total porosity	0.0625	促使水分运移, 提高水分有效性 Facilitate water movement and availability
CEC	0.0500	维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
微生物 C Microbial biomass-C	0.0300	抑制土壤结构退化 Resist surface structure degradation 维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
微生物 N Microbial biomass-N	0.0300	抑制土壤结构退化 Resist surface structure degradation 维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
全 N Total N	0.0250	维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
水解 N Hydrolyzable N	0.0250	维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
有效 P Available P	0.0250	维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
电导率 Electrical conductivity	0.0250	维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
pH	0.0250	维持稻田作物品质和产量 Sustain fieldcrop quality and productivity
总计 Total	1.000	

表 3 土壤质量评价指标的阈值和标准评分方程*

Table 3 Threshold limits and standard scoring function (SSF) for soil quality indicators

指标 Indicator	SSF	LT ^a	UT ^a	LB ^a	UB ^a	O ^a	资料来源 Source
容重 Bulk density (g/m ³)	3	1.0	2.0	1.5			Hussain ^[20]
水稳性团聚体 Aggregate stability (%)	1	5	20	10			Glover ^[12]
毛管水含量 capillary moisture content (%)	2	15	90	30	60	45	Karlen ^[21, 22]
总孔隙度 Total porosity (%)	2	20	80	40	60	50	Glover ^[12]
全 N Total N (g/kg)	1	0.5	3.0	1.5			王效举 ^[23]
水解 N Hydrolyzable N (mg/kg)	2	50	300	100	200	150	王效举 ^[23]
有效 P Available P (mg/kg)	2	5	150	15	30	100	张华 ^[24]
电导率 Electrical conductivity (dS/m)	2	0.25	2.0	0.5	1.75	1.0	Smith ^[25]
pH	2	4.5	9.5	6.5	7.7	5.3	Karlen ^[21, 22]
CEC (cmol/kg)	1	3	20	10			Glover ^[12]
总有机 C Total organic C	1	5	30	15			Hussain ^[20]
微生物 C Microbial biomass-C (mg/kg)	1	100	500	300			Glover ^[12]
微生物 N Microbial biomass-N (mg/kg)	1	20	70	50			Glover ^[12]
蚯蚓 Earthworms (ind/m ²)	1	20	100	50			Werner ^[26]

LT 为下限 LT lower threshold; LB 为较低基准值 LB lower baseline; UB 为较高基准值 UB upper baseline; UT 为上限 UT upper threshold; O 为最适值 O optimal; * 标准评分方程可参见文献^[18, 19]

2 结果与讨论

2.1 土壤物理性状

不同轮作模式对土壤物理性状的影响见表 4。土壤容重是土壤紧实度的一个敏感性指标,也是表征土壤质量的一个重要参数^[27, 28]。同常规稻作模式相比,稻-草轮作系统稻田土壤容重都有不同程度的降低,其中以稻-稻-黑麦草-紫云英轮作模式降低幅度最大。土壤孔隙是土壤通气和水分渗透的一个重要指数,它能影响土壤与大气之间水和气体的交换以及植物体对土壤中水分和养分的吸收^[29]。在本研究中,稻-草轮作系统总孔隙度和非毛管孔隙度比常规稻作系统都要高,尽管它们之间的差异还没有达到显著水平。与常规稻作系统比较, > 0.25 mm 水稳性团聚体在稻-稻-黑麦草-紫云英与稻-稻-黑麦草两种模式下分别

提高 35.42% 和 32.29%。稻-草轮作系统土壤物理性状的改善可能主要与黑麦草自身发达而密集根系在土壤中的穿插及其新陈代谢作用以及土壤有机质含量的提高有关。统计分析结果也表明, 土壤有机质含量分别与土壤容重、总孔隙度、水稳性团聚体含量之间都有着密切的相关性($p < 0.01$)。

表 4 土壤物理性状

Table 4 Soil physical properties

	容重 Bulk density (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity (%)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	孔隙比 Porosity ratio	毛管水含量 Capillary moisture content (%)	> 0.25 mm 水稳性团聚体 > 0.25 mm Water-stable microaggregate
A	1.12 a (0.11)	58.64 a (3.28)	17.13 a (1.02)	41.51 a (3.96)	0.41 a (0.052)	53.54 a (4.02)	23.19 a (1.86)
B	1.15 a (0.13)	56.87 a (3.17)	13.96 a (0.98)	42.91 a (2.68)	0.33 a (0.021)	48.33 a (3.18)	19.01 ab (1.23)
C	1.05 a (0.10)	60.28 a (2.59)	20.83 a (1.21)	39.45 a (3.18)	0.53 a (0.037)	55.26 a (3.65)	23.74 a (1.64)
D	1.14 a (0.13)	57.39 a (2.45)	15.09 a (1.11)	42.30 a (3.83)	0.36 a (0.028)	51.64 a (2.89)	20.93 ab (2.01)
E	1.19 a (0.15)	56.17 a (2.31)	12.40 a (0.86)	43.77 a (3.04)	0.28 a (0.019)	45.29 a (3.01)	17.53 b (1.41)

括号内数字为标准方差 Standard deviation in parentheses; 表中同一栏数据带不同字母的表示达到了 5% 的显著水平 Values in the same columns with different letters are significantly different at the 5% level

2.2 土壤化学性状

稻-草轮作系统稻田土壤全 N、全 P、全 K 以及水解 N、有效 P 和速效 K 含量均高于常规稻田(表 5), 尽管差异并不都是很显著, 这与杨中艺等的研究结果不完全相同^[9], 但与辛国荣等的研究结果完全一致^[7]。杨中艺等研究发现, 在水稻生长初期种草区土壤有效 P 和有效 K 含量低于对照区土壤^[9]。从表 5 也可以看出, 稻-稻-紫云英轮作模式其土壤氮含量高于其它几种稻-草轮作模式, 主要原因可能是与紫云英固氮作用有关。稻-草轮作系统稻田土壤 pH 值稍低于常规稻作系统, 但差异并不显著, 这与杨中艺等的研究结果基本一致^[9]。稻-草轮作系统稻田土壤 pH 值的降低可能是牧草在翻埋以后有机酸增加而作用的结果。土壤 CEC 是土壤保肥性能的一个重要指标, 稻-稻-黑麦草-紫云英与稻-稻-黑麦草两种轮作系统稻田土壤 CEC 同常规稻作系统相比分别提高了 5.03% 和 3.69% ($p > 0.05$)。稻田土壤电导率也是稻-草轮作系统高于常规稻作系统, 但其差异没达到显著水平。

稻-草轮作系统稻田土壤养分含量的提高, 其主要原因可能是以下几个方面: 黑麦草发达而密集根系, 使养分在耕层富集; 黑麦草通过其根际活性, 包括根系的分泌物, 如有机酸等, 可促使土壤中有些缓效态或难溶性养分转化为速效态或易溶性养分; 大量黑麦草根系在土壤的中腐熟分解也有利于土壤肥力的提高; 给稻-草轮作系统的施肥也是一个不容忽视的因素。

表 5 土壤化学性状

Table 5 Soil chemical properties

	全 N Total N (g/kg)	pH	全 P Total P (g/kg)	有效 P A vailable P (m g/kg)	全 K Total K (g/kg)	速效 K A vailable K (m g/kg)	水解 N Hydrolyzable N (m g/kg)	CEC (cmol/kg)	电导率 Electrical conductivity (dS/m)
A	1.80 a (0.13)	6.16 a (0.38)	0.60 a (0.049)	14.74 a (1.13)	18.34 a (1.77)	91.35 a (7.96)	134.64 a (11.33)	14.63 a (1.29)	0.79 a (0.089)
B	1.78 a (0.15)	6.27 a (0.29)	0.61 a (0.037)	12.91 a (1.20)	17.92 a (1.42)	74.26 a (8.13)	123.05 a (13.09)	14.38 a (1.56)	0.65 a (0.073)
C	1.85 a (0.11)	6.24 a (0.44)	0.71 a (0.051)	15.95 a (1.33)	18.73 a (1.53)	101.67 a (10.02)	141.19 a (9.86)	14.82 a (1.37)	0.88 a (0.067)
D	1.82 a (0.16)	6.19 a (0.31)	0.64 a (0.043)	14.17 a (1.09)	18.17 a (1.69)	88.77 a (6.39)	157.81 a (12.45)	14.55 a (1.13)	0.74 a (0.091)
E	1.69 a (0.12)	6.31 a (0.30)	0.54 a (0.029)	9.63 b (0.86)	17.31 a (1.46)	59.44 b (4.87)	97.33 b (8.37)	14.11 a (1.27)	0.57 a (0.048)

括号内数字为标准方差 Standard deviation in parentheses; 表中同一栏数据带不同字母的表示达到了 5% 的显著水平 Values in the same columns with different letters are significantly different at the 5% level

2.3 土壤生物学性状

2.3.1 土壤微生物量、总有机C与呼吸强度 土壤有机质是土壤的重要组成部分,是植物的养分来源和土壤微生物生命活动的能量来源,并能改善土壤的物理和化学性状,促进土壤生物活动,因而被普遍认作土壤质量的一个指示指标^[30,31]。在本研究中,稻-草轮作系统总有机C含量高于常规稻作系统(表6),但它们之间没有显著差异。据研究发现^[32],黑麦草具有发达的须根,在土壤表层其数量可达到597~1148 g/m²,这些残留在土壤中的根系极大地丰富了土壤有机质。

土壤微生物是土壤有机质和养分循环和转化的动力,也是土壤养分的储存库,对土壤中养分的转化和供应起着极其重要的作用^[17,35-37]。从表6可以看出,不同轮作模式对土壤微生物量的影响极大。稻-草轮作系统稻田土壤微生物生物量C、N、P含量显著高于常规稻作系统($p < 0.01$),其主要原因可能是稻-草轮作系统有机质输入大且矿质养分含量也高。经统计分析表明,土壤微生物生物量C与土壤总有机C($R^2 = 0.6729, p < 0.01$)、微生物生物量N与土壤全N($R^2 = 0.5938, p < 0.01$)、微生物生物量P与土壤全P($R^2 = 0.6314, p < 0.01$)之间都有着密切的正相关,这同有关研究结果基本一致^[33,34]。

土壤呼吸强度常被用作土壤微生物活性的一个重要指标^[17,34,36]。稻-草轮作系统稻田土壤呼吸强度显著高于常规稻作系统($p < 0.01$),其原因可能是稻-草轮作系统存在一个相对较大的易分解的碳基库^[36]。微生物熵($C_{mic} : C_{org}$)是土壤有机质变化的一个指示指标,有的研究工作者甚至将它视为土壤质量的一个参数,如果土壤正在退化,微生物C库下降的速度将大于有机C的下降,因而微生物熵随之降低^[17,34,36]。本研究中稻-草轮作系统土壤微生物熵($C_{mic} : C_{org}$)大于常规稻作系统,表明常规稻作系统稻田土壤中易为生物降解的有机质含量相对较少。另外,稻-草轮作系统中不同的轮作模式土壤微生物熵也有差异,但并不显著。代谢熵(qCO_2)是表征土壤微生物生物活性的一个敏感指标,在一个较稳定和成熟的生态系统内往往表现出一个较低的值^[34,36]。代谢熵在5种稻-作模式中以常规稻作系统最高,稻-草轮作系统稍低,这可能与常规稻作系统土壤有机C含量处于较低水平有关。

表6 土壤微生物量、总有机C与呼吸强度

Table 6 Microbial biomass, total organic C and basal respiration

处理 Treatment	微生物C Microbial biomass-C (mg/kg dry weight soil)	微生物N Microbial biomass-N (mg/kg dry weight soil)	微生物P Microbial biomass-P (mg/kg dry weight soil)	总有机C Total organic C (g/kg)	呼吸强度 Basal respiration ($\mu\text{g CO}_2\text{-C}/(\text{g dry}$ $\text{weight soil h})$)	微生物商 ($C_{mic} : C_{org}$) Microbial quotient	代谢商 (qCO_2) Metabolic quotient
A	629 a (123)	71 a (14)	22 a (4)	24.79 a (1.67)	0.52 a (0.12)	2.54 ab (0.14)	0.83 a (0.021)
B	523 bab (107)	48 b (8)	16 ab (3)	23.87 a (1.43)	0.41 b (0.078)	2.19 ab (0.11)	0.78 a (0.022)
C	698 a (141)	83 a (11)	26 a (4)	25.45 a (1.53)	0.57 a (0.13)	2.74 a (0.17)	0.82 a (0.031)
D	593 a (118)	59 a (9)	21 a (5)	24.31 a (1.61)	0.46 a (0.089)	2.46 ab (0.13)	0.77 a (0.024)
E	402 b (102)	32 b (5)	12 b (3)	21.36 a (1.34)	0.35 b (0.081)	1.88 b (0.086)	0.87 a (0.031)

括号内数字为标准方差 Standard deviation in parentheses; 表中同一栏数据带不同字母的表示达到了5%的显著水平 Values in the same columns with different letters are significantly different at the 5% level

2.3.2 土壤酶活性和土壤动物 土壤酶活性是维持土壤肥力的一个潜在性指标^[34,37]。脱氢酶活性能够较全面反映土壤微生物的氧化特性,是土壤微生物生物活性的一个指示指标^[37];脲酶、蛋白酶直接参与土壤中含N有机化合物的转化,其活性强度常用来表征土壤N素供应程度^[34,36];酸性磷酸酶能加速土壤有机磷的脱磷速度,从而提高磷的有效性^[34];过氧化氢酶,是细胞内的一种氧化还原酶,在微生物细胞体外仍然能保持其活性,所以也常用来作为土壤生物活性的一个评定指标^[38]。在5种稻-作模式中,稻-草轮作系统稻田土壤五种酶活性都高于常规稻作系统(表7),而且它们之间的差异都达到了显著水平($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$),这与辛国荣等的研究结果基本一致^[7]。酶活性的提高表明稻-草轮作系统稻田土壤中C、N和P营养物质循环强度比常规稻作系统大,有机残体分解速度亦比常规稻作系统的快。稻-草轮作系统稻田土壤酶活性的增强可能与其土壤中相对较高的矿质养分含量的有着紧密的联系,众多研究结果也表明,土壤中大多数酶活性与土壤中养分元素含量存在密切的相关性^[17,34]。另有研究结果表明,冬种黑麦草对稻田土壤酶活性以及水稻自身生长的影响在水稻生长期前期与水稻成熟期并不完全一致,冬种黑麦草对后作水稻的前期生长有较为明显的抑制作用,对根系生长发育的影响尤为明显,对脲酶活性的抑制也比较大^[6]。其原因可能主要是黑麦草在水田土壤中残留的大量根系不利于水稻根系在插植后恢复和定植,另外黑麦草根系的腐熟分

解也有一定的负面影响。所以, 应选择好黑麦草收割期与水稻插植期之间的时间间隔, 以保证黑麦草根成分腐熟分解。

土壤动物是稻田生态系统物质循环中重要的参与者, 其组成、数量、生物量在很大程度上影响稻田生态系统的物质循环与转化。众多研究结果已表明, 蚯蚓在评价农田土壤污染以及农业的可持续性中可作为一个重要的生物指标^[39~41]。从表 7 可以看出, 稻-稻-黑麦草-紫云英与稻-稻-黑麦草两种轮作模式稻田土壤蚯蚓数量显著高于常规稻作模式 ($p < 0.01$)。其它几种轮作模式稻田土壤蚯蚓数量一般也是常规稻作的 2~3 倍, 虽然它们之间的差异并不显著(主要是数据变异较大)。稻-草轮作系统蚯蚓数量大幅度增加主要是其稻田土壤环境改善所致。统计分析表明, 蚯蚓数量与土壤有机质和其它养分含量以及土壤容重、孔隙度都有显著的相关性 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。

表 7 土壤酶活性和土壤动物

Table 7 Enzyme activities and animal of soils

处理 Treatment	脱氢酶 (DH) ($\mu\text{l TPF}/(\text{g dry weight soil } 24\text{h})$)	脲酶 (UR) ($\text{mg NH}_3/(\text{g dry weight soil } 24\text{h})$)	蛋白酶 (PR) ($\mu\text{mol NH}_3/(\text{g dry weight soil h})$)	过氧化氢酶 (CA) ($\mu\text{mol KMnO}_4/(\text{g dry weight soil h})$)	酸性磷酸酶 (AP) ($\mu\text{g P-nitrophenol}/(\text{g dry weight soil h})$)	蚯蚓 Earthworms (ind / m^2)
A	363.0 a (42.3)	0.92 a (0.13)	1.83 ab (0.18)	80.3 a (6.7)	65.1 ab (8.1)	42 ac (6)
B	320.4 ab (29.6)	0.75 ab (0.11)	1.56 b (0.17)	56.5 b (4.3)	47.6 b (3.7)	17 bc (4)
C	387.2 a (50.1)	0.99 a (0.15)	2.18 a (0.21)	92.7 a (8.1)	79.7 a (9.3)	56 a (8)
D	351.8 a (29.8)	0.88 a (0.10)	1.72 ab (0.19)	74.4 a (6.4)	56.4 ab (4.6)	31 ac (4)
E	271.7 b (24.7)	0.61 b (0.079)	1.34 b (0.14)	40.7 b (5.6)	38.3 b (4.5)	9 bc (3)

括号内数字为标准方差 Standard deviation in parentheses; 表中同一栏数据带不同字母的表示达到了 5% 的显著水平 Values in the same columns with different letters are significantly different at the 5% level

2.4 稻田土壤质量评价

2.4.1 土壤质量指数 图 1 是几种不同轮作模式土壤功能和土壤质量的评价。从图 1 可以看出, AWE、RSSD 和 SCQP 3 项土壤功能其评价价值都是稻-稻-黑麦草-紫云英、稻-稻-黑麦草、稻-稻-紫云英 3 种轮作模式大于常规稻作模式, FWMA 在 5 种轮作模式中其值相等 (都为 0.5); 稻-稻-黑麦草-稻-稻-冬闲轮作模式 RSSD 和 SCQP 两项土壤功能其评价价值也都大于常规稻作模式。此评价结果与各土壤功能所对应的土壤性质基本一致 (可从土壤各性质的测定值反映出来), 同时也说明了此土壤质量评价体系的可行性。从最终的土壤质量指数看, 稻-稻-黑麦草-紫云英 (0.6275) = 稻-稻-黑麦草 (0.6275) > 稻-稻-紫云英 (0.6150) > 稻-稻-黑麦草-稻-稻-冬闲 (0.5150) > 稻-稻-冬闲 (0.5000)。

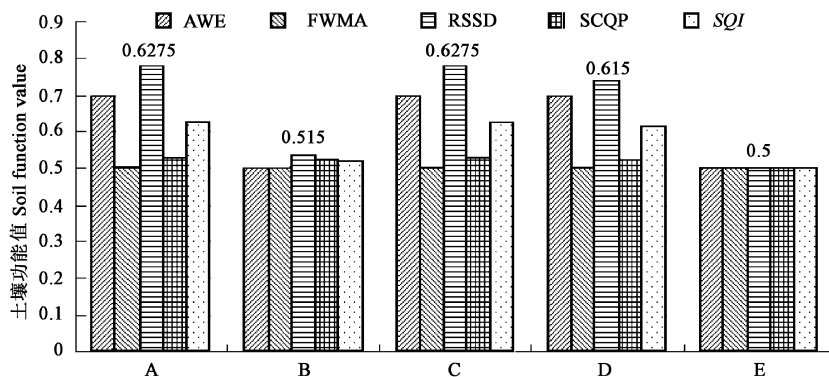


图 1 不同轮作系统稻田土壤功能和土壤质量指数

Fig. 1 Soil function and soil quality index (SQI) under different cropping systems

2.4.2 土壤退化指数 土壤退化指数 (SDI, soil degeneration index) 根据 A dejuwon & Ekanade^[42] 提出的计算公式计算, 它是根据某种土地利用类型为基准, 假设其它的土地利用类型都是由作为基准的土地利用类型转变而来, 然后比较土壤各个属性在其它土地利用类型与基准土地利用类型之间的差异 (以百分数表示), 最后将各个属性的差异求和平均, 起计算公式如下:

$$SDI = ((X_i - X'_i) / X'_i) \times 100\% / n$$

式中, SDI 为土壤退化指数, X_i 为土壤质量参数值, X'_i 是基准土地利用类型土壤参数值。但因土壤容重数值越高表示退化越严重, 所以计算时取其差值的相反数。土壤退化指数负数表明土壤退化, 正数说明土壤质量提高。本研究 SDI 的计算采用了 14 个土壤指标, 选用的基准土地利用类型为试验地附近的荒草地。

表 8 不同轮作系统 $(X_i - X'_i) / X'_i$ 值

Table 8 Values of $(X_i - X'_i) / X'_i$ under different cropping systems

项目 Item	A	B	C	D	E
容重 Bulk density	0.09677	0.07258	0.1532	0.08065	0.04032
CEC	0.07891	0.06047	0.09292	0.07301	0.04056
总有机 C Total organic C	0.1172	0.07571	0.1469	0.09554	- 0.03740
全 N Total N	0.1304	0.1056	0.1491	0.1180	0.04969
全 P Total P	- 0.04762	- 0.03175	0.1270	0.01587	- 0.1429
全 K Total K	0.1122	0.08672	0.1358	0.1019	0.04973
水解 N Hydrolyzable N	0.9700	0.6400	0.7945	0.8818	0.2972
有效 P A available	0.1453	0.003108	0.2393	0.1010	- 0.2518
有效 K A available K	1.2049	0.7924	1.4540	1.1427	0.4347
微生物 C Microbial biomass-C	0.09582	- 0.08885	0.2160	0.03310	- 0.2997
微生物 N Microbial biomass-N	0.6512	0.1163	0.9302	0.3721	- 0.2558
微生物 P Microbial biomass-P	1.2000	0.6000	1.6000	1.1000	0.2000
脲酶 UR	0.01099	- 0.1758	0.08791	- 0.03297	- 0.3297
蛋白酶 PR	0.1227	- 0.04294	0.3374	0.05522	- 0.1779

通过表 8 的结果, 利用公式可直接计算出不同轮作模式土壤的退化指数(图 2)。土壤退化指数可定量地反映土壤退化或改善的程度, 正值表明土壤质量有所改善, 而负值表明土壤质量有退化的趋势。从图 2 可以看出, 除常规稻作系统外, 其它 4 种轮作模式稻田土壤质量都有所改善, 其中以稻-稻-黑麦草-紫云英轮作模式增加幅度最大。而常规稻作系统稻田土壤质量有退化的趋势, 但其退化幅度很小, 主要可能是施肥的缘故。土壤退化指数与土壤质量指数所得出的研究结果趋于一致。

经统计分析可以看出, 土壤退化指数(SDI)和土壤质量指数(SQI) ($R^2 = 0.8537, p < 0.05$)之间具有良好的线性关系, 该关系表明, 土壤退化指数同土壤质量指数一样也能有效地评价研究试区稻田土壤质量, 而且过程简化, 评价指标也不受限制, 但基准土地利用类型的选择对其影响很大。

2.4.3 生物肥力指数 根据生物肥力指数(BIF : biological index of fertility)表达式^[43]:

$$BIF = (1.5 \times DH + CA) / 2$$

式中, DH 为脱氢酶, CA 为过氧化氢酶, 计算出 5 种轮作模式稻田土壤的生物肥力指数 BIF (图 3)。

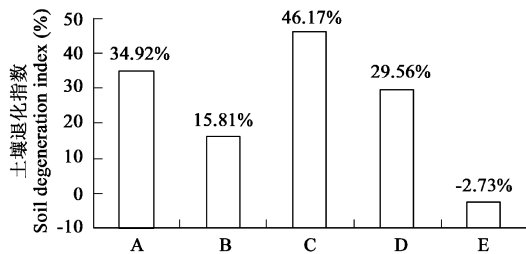


图 2 不同轮作系统稻田土壤退化指数

Fig 2 Soil degeneration index (SDI) under different cropping systems

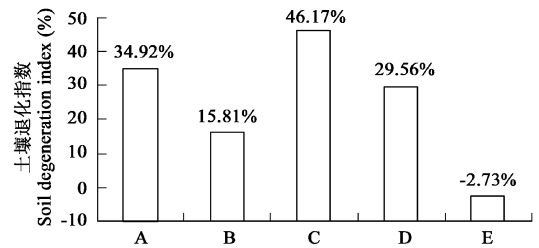


图 3 不同轮作系统稻田土壤生物肥力指数

Fig 3 Soil biological index of fertility (BIF) under different cropping systems

从图 3 可以看出, 稻-草轮作系统稻田土壤生物肥力指数大于常规稻作系统, 其中以稻-稻-黑麦草-紫云英轮作模式其生物肥力指数最高, 其次是稻-稻-黑麦草模式, 这与稻田土壤质量指数趋势基本一致。经统计分析表明, 土壤生物肥力指数(BIF)分别与土壤退化指数(SDI) ($y = 0.0043x - 0.9998, R^2 = 0.9993, p < 0.01$)和土壤质量指数(SQI) ($y = 632.1x - 76.145, R^2 = 0.858, p < 0.05$)都有良好的线性关系, 说明生物肥力指数在一定程度上可反映出稻田土壤质量的高低。

2.4.4 SQI, SDI, BIF 与蚯蚓丰富度之间的相关性 统计分析表明, 稻田土壤蚯蚓丰富度分别与 SQI ($y = 0.0031x + 0.4818,$

$R^2 = 0.8245, p < 0.05$), $SDI (y = 0.0097x - 0.0519, R^2 = 0.9362, p < 0.01)$ 、 $BF (y = 2.2193x + 219.78, R^2 = 0.9243, p < 0.01)$ 都呈显著正相关, 说明蚯蚓的丰富度可指示本研究试区稻田土壤质量, 另外也因蚯蚓丰富度受耕作制度的影响很大^[41], 所以, 在构建稻田土壤质量评价体系时, 可将土壤动物作为重要的参数来考虑。

3 结论

(1) 稻-稻-草轮作制能增加土壤养分含量, 改善土壤物理性状, 提高土壤生物活性, 增加土壤动物数量, 从而维持或提高稻田土壤质量, 达到农田生态系统可持续经营的目的。

(2) 在四项土壤功能评价的基础上, 利用土壤质量评价体系直观地评价了稻田土壤质量状况。AWE (贮存水分)、RSSD (抑制土壤结构退化) 和 SCOP (维持稻田作物品质和产量) 3 项土壤功能其评价价值都是稻-稻-黑麦草-紫云英、稻-稻-黑麦草-稻-紫云英 3 种轮作模式大于常规稻作模式, FWMA (促使水分运移, 提高水分有效性) 在 5 种轮作模式中其评价价值相等, 稻-稻-黑麦草-稻-稻-冬闲轮作模式 RSSD 和 SCOP 两项土壤功能其评价价值也都大于常规稻作模式。评价结果与实地观测基本一致, 说明此土壤质量评价体系在评价研究试区稻田土壤质量的可行性。土壤质量指数、土壤退化指数和生物肥力指数之间具有良好的线性关系, 说明此 3 种评价方法都能有效地评价研究试区稻田土壤质量。土壤退化指数表明, 稻-草轮作模式稻田土壤质量都有不同程度的提高, 而常规稻作系统稻田土壤质量有轻微下降。

(3) 稻田土壤蚯蚓丰富度与土壤质量指数、土壤退化指数和生物肥力指数都成显著的正相关, 蚯蚓的丰富度可指示本研究试区稻田土壤质量。在构建稻田土壤质量评价体系时, 可将土壤动物作为重要的参数来考虑。

(4) 稻-稻-草轮作制与常规稻作制比较能提高稻田土壤质量, 为发展农业多种经营提供了重要的物质基础, 同时也能改善区域农业结构, 促进“三元结构”农业和节粮型畜牧业的发展。稻-稻-草轮作制还为农业种植业和畜牧业之间提供了一个结合点, 从而启动连接土、草、粮、畜等多个环节的生态农业系统。另外, 稻-稻-草轮作制的应用与推广, 也提高了土地的利用率和利用效率。

References

- [1] Yang Z Y, Yu Y L, Chen H Z. A study on Italian ryegrass-rice rotation system 1. Productivity of Italian ryegrass cultivars under intensive cultivation in subtropics of South China. *Acta Prataculturae Sinica*, 1994, 3(4): 20~ 26
- [2] Yang Z Y, Pan Z X. A study on Italian ryegrass-rice rotation system 3. Productivity of introduced varieties of Italian ryegrass when seeded into late rice population in the southern subtropics of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 1995, 4(4): 52~ 57.
- [3] Xin G R, Yang Z Y, Xu Y X, et al. A study on Italian ryegrass-rice rotation system 5. Cultivation technology for high yield and quality ryegrass fodder in a ryegrass-rice rotation system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2000, 9(2): 17~ 23
- [4] Chen S Y, Yang Z Y, Xin G R. Study and application of Italian ryegrass-rice rotation system. *Grassland and Turf*, 2000, 1: 32~ 34.
- [5] Yang Z Y, Xin G R, Yue C Y, et al. A case study on benefits of Italian ryegrass-rice rotation system. *Pratacultural Science*, 1997, 14(6): 35~ 39.
- [6] Xin G R, Yue C Y, Li X M, et al. Rhizosphere effects in ryegrass-rice rotation system 3. The effects of the root of ryegrass on soil biological characters. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, 37(6): 94~ 96
- [7] Xin G R, Yue C Y, Li X M, et al. Rhizosphere effects in ryegrass-rice rotation system 2. Effects of ryegrass winter cropping on soil chemical and physical characters. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, 37(5): 78~ 82.
- [8] Xin G R, Zheng Z W, Xu Y X, et al. A study on Italian ryegrass-rice rotationsystem 6. The effects of fertilization during ryegrass winter cropping on succeeding rice production. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(4): 21~ 27.
- [9] Yang Z Y. A study on Italian ryegrass-rice rotation system 4. Effects of Italian ryegrass winter cropping in paddy on growth, development and yield of subsequent rice. *Acta Prataculturae Sinica*, 1996, 5(2): 38~ 42
- [10] Yang Z Y, Yue C Y, Xin G R, et al. Effect of winter cropping *Lolium multiflorum* in rice field on growth of succeeding rice and a preliminary approach to its mechanism. *Pratacultural Science*, 1997, 14(4): 20~ 24.
- [11] Li Y Y, Zhang G R. Study on benefits of grassland agriculture. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2000, 19(1): 59~ 63
- [12] Glover J D, Reganold J P, Andrews P K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 80: 29~ 45.
- [13] Huang C, Guo J Y, Meng W X, et al. The influence of different fertilizing measures on the soil animal communities of the farmland under exempt ploughing and the rotation of dry and paddy conditions. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1996, 32(2): 354~ 359.
- [14] Liu G S. *Observation and standard analysis method of Chinese Ecosystem Research Network: Physiochemical analysis and profile*. © 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

- description of soil* Beijing: China Standard Press, 1996
- [15] Guan S Y. Soil enzyme and its analysis method Beijing: Agriculture Press, 1986
- [16] Liu S L, Xiao H A, Tong C L, *et al* Microbial biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils. *Research of Agricultural Modernization*, 2003, **24** (4): 278~ 283
- [17] Zhao Q G. Matter cycling and its regulation and control of red soil Beijing: Science Press, 2002
- [18] Huang Y, Wang S L, Feng Z W, *et al* Soil quality assessment of forest stand in different plantation ecosystems. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(12): 2199~ 2205
- [19] Huang Y, Wang S L, Feng Z W. Comparative study of selected soil properties following introduction of broad-leaf trees into clear-felled Chinese fir forest. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2005, **36** (11-12): 1385~ 1403
- [20] Hussain I, Olson K R, Wender M M, *et al* Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil and Tillage Research*, 1999, **50**: 237~ 249
- [21] Karlen D L, Wollenhaupt N C, Erbach D C, *et al* Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil tillage and Research*, 1994a, **31**: 149~ 167
- [22] Karlen D L, Wollenhaupt N C, Erbach D C, *et al* Long-term tillage effects on soil quality. *Soil tillage and Research*, 1994b, **32**: 313~ 327
- [23] Wang X J, Gong Z T. Quantitative evaluation of soil quality changes in time and space at a small area level in subtropical China. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1996, **5**(4): 229~ 231
- [24] Zhang H, Zhang G L, Qi Z P, *et al* Systematic assessment of soil quality at farm level in tropical area of China. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40** (2): 186~ 193
- [25] Smith J K, Halvorson J J, Papendick R I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Science Society of American Journal*, 1993, **57**: 743~ 749
- [26] Werner M R. Inoculative release of anecic earthworms in a California orchard. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1996, **11**: 176~ 181
- [27] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 1995, **35**: 53~ 68
- [28] Acosta-Martinez V, Reicher Z, Bischoff M, *et al* The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **29**: 55~ 61
- [29] Zheng Y S, Ding Y X. Effect of mixed forests of Chinese-fir and Tsong's tree on soil properties. *Pedosphere*, 1998, **8** (2): 161~ 168
- [30] Campbell C A, McConkey B G, Zentner R P, *et al* Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse-textured Typic Haploboroll in southwestern Saskatchewan. *Soil and Tillage Research*, 1996, **37**: 3~ 14
- [31] Moria de la Paz J. Soil quality: a new index based on microbiological and biochemical parameters. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **35**: 302~ 306
- [32] Yang Z Y, Pan J L. A study on Italian ryegrass-rice rotation system: 2 Productivity of introduced Italian ryegrass varieties under no-tillage cultivation in the southern subtropics of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 1995, **4**(4): 46~ 51
- [33] Huang Y, Wang H, Zou D S, *et al* Effects of planting *Eulaliopsis binata* on soil quality in red soil region of southern China. *Soil Use & Management*, 2004, **20**(2): 150~ 156
- [34] Huang Y, Wang S L, Feng Z W, *et al* Changes in soil quality due to introduction of broad-leaf trees into clear felled Chinese-fir forest in the mid-subtropics of China. *Soil Use & Management*, 2004, **20** (4): 418~ 425
- [35] Huang Y, Wang H, Feng Z W, *et al* Effects of *Eulaliopsis binata* plantation on soil quality in red soil region of southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(12): 2599~ 2606
- [36] Hernandez T, Garcia C, Reinhardt I. Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **25**: 109~ 116
- [37] Moscatelli M C, Fonck M, Angelis P D, *et al* Mediterranean natural forest living at elevated carbon dioxide: soil biological properties and plant biomass growth. *Soil Use & Management*, 2001, **17**: 195~ 202
- [38] Perucci P, Bonciarelli U, Bianchi A A, *et al* Effect of rotation, nitrogen fertility and management of crop residues on some chemical, microbiological and biochemical activity of soils under cultivation. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **13**: 242~ 247
- [39] Buckerfield J C, Lee K E, Davoren C W, *et al* Earthworms as indicators of sustainable production in dryland cropping in southern Australia. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**(3, 4): 547~ 554
- [40] Clapperton J M, Miller J J, Larney F J. Earthworm populations as affected by long-term tillage practices in southern Alberta, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, **29**(3, 4): 631~ 633

- [41] Paoletti M G. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, **74**: 137~ 155.
- [42] Adejwon J O, Ekanade O A. A comparison of soil properties under different land use types in a part of the Nigerian cocoa belt. *Catana*, 1988, **15**: 319~ 331.
- [43] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi M inzi R, et al. Biochemical properties of a Mediterranean soil as affected by long-term crop management systems. *Soil Tillage and Research*, 2002, **67**: 109~ 114.

参考文献:

- [1] 杨中艺, 余玉林, 陈会智. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究. 1. 意大利黑麦草引进品种在南亚热带地区集约栽培条件下的生产能力. *草业学报*, 1994, **3**(4): 20~ 26.
- [2] 杨中艺, 潘哲祥. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究. 3. 意大利黑麦草引进品种在南亚热带地区稻底撒播条件下的生产能力. *草业学报*, 1995, **4**(4): 52~ 57.
- [3] 辛国荣, 杨中艺, 徐亚幸, 等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究. 5. 冬种黑麦草的优质高产栽培技术. *草业学报*, 2000, **9**(2): 17~ 23.
- [4] 陈三有, 杨中艺, 辛国荣. 黑麦草-水稻草田轮作系统研究与应用. *草原与草坪*, 2000, **1**: 32~ 34.
- [5] 杨中艺, 辛国荣, 岳朝阳, 等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统应用效益初探(案例研究). *草业科学*, 1997, **14**(6): 35~ 39.
- [6] 辛国荣, 岳朝阳, 李雪梅, 等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的根际效应. 3. 黑麦草根对土壤生物性状的影响. *中山大学学报(自然科学版)*, 1998, **37**(6): 94~ 96.
- [7] 辛国荣, 岳朝阳, 李雪梅, 等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的根际效应. 2. 冬种黑麦草对土壤物理化学性质的影响. *中山大学学报(自然科学版)*, 1998, **37**(5): 78~ 82.
- [8] 辛国荣, 郑政伟, 徐亚幸, 等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究. 6. 冬种黑麦草期间施肥对后作水稻生产的影响. *草业学报*, 2002, **11**(4): 21~ 27.
- [9] 杨中艺. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究. 4. 冬种意大利黑麦草对后作水稻生长和产量的影响. *草业学报*, 1996, **5**(2): 38~ 42.
- [10] 杨中艺, 岳朝阳, 辛国荣, 等. 稻田冬种黑麦草对后作水稻生长的影响及其机理初探. *草业科学*, 1997, **14**(4): 20~ 24.
- [11] 李玉元, 张桂荣. 草地农业效益研究. *广西农业生物科学*, 2000, **19**(1): 59~ 63.
- [13] 黄诚, 郭建英, 孟文新, 等. 水旱轮作条件下免耕农田土壤动物群落与施肥措施的关系. *南京大学学报*, 1996, **32**(2): 354~ 359.
- [14] 刘光崧主编. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法——土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 等. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点. *农业现代化研究*, 2003, **24**(4): 278~ 283.
- [17] 赵其国. 红壤物质循环及其调控. 北京: 科学出版社, 2002.
- [18] 黄宇, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 不同人工林生态系统林地土壤质量评价. *应用生态学报*, 2004, **15**(12): 2199~ 2205.
- [23] 王效举, 龚子同. 亚热带小区域水平上土壤质量时空变化的定量评价. *热带亚热带土壤科学*, 1996, **5**(4): 229~ 231.
- [24] 张华, 张甘林, 漆智平, 等. 热带地区农场尺度土壤质量现状的系统评价. *土壤学报*, 2003, **40**(2): 186~ 193.
- [32] 杨中艺, 潘静澜. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究. 2. 意大利黑麦草引进品种在南亚热带地区免耕栽培条件下的生产能力. *草业学报*, 1995, **4**(4): 46~ 51.
- [35] 黄宇, 王华, 冯宗炜, 等. 南方红壤地区种植龙须草对土壤质量的影响. *生态学报*, 2003, **23**(12): 2599~ 2606.