

# 不同节水稻作模式对土壤微生物数量和微生物量碳氮的影响

肖新<sup>1,2</sup>, 邓艳萍<sup>1</sup>, 汪建飞<sup>1</sup>, 胡锋<sup>2</sup>, 赵言文<sup>2</sup>

(1. 安徽科技学院 城建与环境学院, 安徽 凤阳 233100; 2. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 针对南方丘陵区季节性干旱这一区域问题, 以节水稻作模式为研究对象, 以常规稻作模式为对照, 通过田间定位试验, 研究了稻基农田土壤微生物数量和土壤微生物量碳氮的变化规律。结果表明, 与该区常规稻作模式相比, 节水稻作模式的土壤微生物数量和土壤微生物量碳氮差异显著; 节水稻作模式有利于土壤细菌和放线菌的增殖, 但抑制了真菌的增殖; 土壤微生物量碳和微生物量氮的显著增加, 以水旱轮作双季稻模式最佳, 说明采用节水稻作模式可有效提升土壤细菌数量、放线菌数量、微生物量碳和微生物量氮含量。因此, 在南方丘陵季节性干旱区, 采用节水稻作模式, 可促进稻田生态系统健康持续发展。

**关键词:** 节水稻作模式; 土壤微生物数量; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0062-04

中图分类号: S154.3

## Effects of Water-saving Modes for Rice Cultivation on Soil Microbial Quantity and Microbial Biomass C and N Contents

XIAO Xin<sup>1,2</sup>, DENG Yan-ping<sup>1</sup>, WANG Jian-fei<sup>1</sup>, HU Feng<sup>2</sup>, ZHAO Yan-wen<sup>2</sup>

(1. College of Urban Construction and Environmental Science, Anhui Science and Technology University, Fengyang, Anhui 233100, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** The water-saving rice cultivation (WSRC) modes are good strategies dealing with the seasonal drought problem in the hilly region of southern China. Few studies were conducted to address the effects of these practices on soil microbial communities. This study aims to assess the effect of WSRC practice on soil microbial quantity, soil microbial biomass C (SMB-C) and soil microbial biomass N (SMB-N) in a field experiment. The results showed that significantly differences were observed between water-saving cultivation and conventional double cropping in terms of both soil microbial quantity and soil microbial biomasses. Compared with conventional practice, the implementation of WSRC accelerated the proliferation of soil bacteria and actinomycetes, reduced the proliferation of fungi, and increased SMB-C and SMB-N. The greatest number of soil bacteria and actinomycetes and the highest contents of SMB-C and SMB-N were found in double cropping with flood-drought rotation in comparison of other WSRC practices. We concluded that WSRC practices are of great significance for the sustainability of rice cultivation by stimulating soil microbial activities.

**Keywords:** water-saving rice cultivation patterns; soil microbial quantity; soil microbial biomass C; soil microbial biomass N

南方丘陵区属亚热带季风气候区, 降雨丰沛、热量充足, 但自然降雨时空分布不均, 与蒸发量分布不同步, 常出现季节性干旱, 致使水稻生产用水供给不足, 迫切需要开展节水稻作研究, 这要求人们不断深

入研究不同节水稻作措施对土壤肥力与生态环境的影响<sup>[1]</sup>。土壤微生物作为土壤有机物质转化的执行者, 其数量及其周转对植物有效养分起着“库”和“源”的作用, 对土壤微生物量碳氮和主要养分的植物有效

收稿日期: 2012-03-27

修回日期: 2012-05-11

资助项目: 国家高新技术研究发展计划(863)项目“南方季节性缺水灌区(江西省鹰潭)节水农业综合技术体系集式与示范”(2002AA2Z4331); 安徽省青年科学基金项目(10040606Q12)

作者简介: 肖新(1980—), 男(汉族), 安徽省利辛县人, 博士, 副教授, 主要从事环境生态研究。E-mail: xiaoxin8088@126.com。

通信作者: 赵言文(1965—), 男(汉族), 江苏省睢宁县人, 博士, 教授, 主要从事环境生态与农业生态研究。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn。

性及在陆地生态系统中的循环有着深刻的影响<sup>[2]</sup>。

随着我国节水农业的迅速发展,水稻控制灌溉、间歇灌溉、旱作等模式也逐渐在生产中应用推广<sup>[3-4]</sup>。基于此,以节水灌溉技术核心,以水稻节水生产为主体,构建几种综合效益较高、节水、省肥、省药以及控制农业面源污染的节水稻作模式<sup>[5]</sup>。研究表明<sup>[1,6]</sup>,节水稻作模式对调节作物的土壤水分环境和水分利用效率的提高有重要作用,能够影响稻田土壤环境的变化和水稻生长特性,而这些变化势必会影响到稻田土壤微生物特性的改变。但目前有关节水稻作模式对土壤微生物数量与微生物量碳氮的影响研究报道较少。为此,本研究对长期采取节水稻作模式下的土壤微生物数量与微生物量碳氮变化特征进行分析,以探索节水稻作模式下土壤微生物的变化规律,为该水稻作结构合理调整提供理论依据和技术支撑。

表 1 研究区供试土壤主要性状

pH 值	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
5.6	27.31	1.61	1.05	5.89	125.82	12.84	34.92

### 1.2 试验设计

试验共设置 4 个处理,即 4 种稻作模式。(1) 常规双季稻模式(对照模式,CK)。该区常规的稻作模式,采用早稻与晚稻轮作,冬季田块休闲,水分管理上均采用常规灌溉。(2) 节水灌溉双季稻模式(T<sub>1</sub> 模式)。采用早稻与晚稻轮作,冬季闲田,在水分管理上早稻采用间歇灌溉,晚稻进行控制灌溉。(3) 水旱轮作双季稻模式(T<sub>2</sub> 模式)。主要采用早稻与晚稻轮

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点基本情况

试验在江西省余江县的邓家埠水稻原种场进行。该区位于江西省东北部武夷山区向鄱阳湖平原的过渡地段,地理位置为东经 116°41′—117°09′,北纬 28°04′—28°37′,是我国中亚热带低丘岗地红壤的典型地区。该区水、光、热资源丰富,年均气温 16.1~18.9℃,≥10℃积温 5 527.6℃,年均日照 1 852.4 h,无霜期 262 d,年降雨量 1 200~2 000 mm,但降水年度和季节分布极为不均,降水量的季节变化超前于潜在蒸发量变化 2.16~2.67 个月,一旦春夏雨季结束,随即进入伏秋高温和蒸发高峰期,蒸发量明显高于降水量,常出现季节性干旱<sup>[5]</sup>。供试土壤属于河流冲积土发育而成的潜育型水稻土,土壤主要性状详见表 1。

作,冬季闲田,在水分管理上早稻采用间歇灌溉,晚稻进行覆草(秸秆)旱作。(4) 稻油轮作模式(T<sub>3</sub> 模式)。主要采用稻油轮作,一季稻在水分管理上采用控制灌溉,冬季种植油菜。

采用随机区组设计,每个处理 3 次重复,共 12 个小区,小区面积 60 m<sup>2</sup>(6 m×10 m),小区间用塑料薄膜包埂,单灌单排。不同模式各生育时期的水分管理情况详见表 2。

表 2 水稻不同灌溉模式的土壤水分调节标准

灌溉模式	返青期	分蘖前期	分蘖后期	拔节孕穗期	抽穗扬花期	乳熟期	黄熟期
间歇灌溉	10~20 mm	80%~20 mm	60%~0 mm	80%~20 mm	80%~20 mm	70%~20 mm	自然落干
控制灌溉	10~20 mm	80%~100%	60%~0 mm	80%~100%	80%~100%	70%~100%	自然落干
常规灌溉	10~60 mm	10~60 mm	60%~0 mm	10~60 mm	10~60 mm	10~60 mm	自然落干

注:表中连续 2 个数据分别为适宜水层下限和适宜水层上限,用土壤饱和含水量(%)或水层厚度(mm)表示。如:“80%~20 mm”代表“80%土壤饱和含水量~20 mm 厚度水层”,即适宜水层下限为 80%土壤饱和含水量,适宜水层上限为 20 mm 厚度的水层,其他依次类推。水层厚度为 0 mm 表示不灌水。

### 1.3 测定方法

在水稻收获后采集土壤样品,将取土工具在采样点旁土壤中擦拭数次,除去土壤表面的枯叶,铲除表面 1 cm 左右的表土,以避免地面微生物与土样混杂,每个样区用 5 点取样法采 0—20 cm 表土,混匀过 2 mm 筛,当日测定,否则在 4℃下保存。

土壤微生物数量采用固体平板法进行分离测定,其中,细菌数量采用牛肉膏蛋白胨琼脂平板表面涂布法,真菌数量采用马丁氏(Martin)培养基平板表面涂布法,放线菌数量采用改良高氏一号合成培养基平板

表面涂布法<sup>[7]</sup>。

土样微生物量碳氮采用 Joergensen 等<sup>[8]</sup>和 Vance 等<sup>[9]</sup>的氯仿熏蒸—K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法,浸提液中的微生物量碳采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 加热氧化,FeSO<sub>4</sub> 滴定法;微生物量氮采用开氏定氮法。每个土样重复 3 次测定。采用 Excel 2003 和 DPS 7.05 软件对试验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 节水稻作模式对土壤微生物数量

在所有栽培模式处理土壤中均以细菌数量最多,

放线菌次之,真菌再次之,藻类、原生动物等依次排列,它们对土壤中有机的分解、氮和磷等营养元素及其化合物的转化具有重要作用。

2.1.1 对细菌的影响 在适当的通气土壤中,细菌占有一定的优势。从表 3 中可以看出,本试验研究中的土壤中可培养细菌数量所占比例为 94.68%~95.44%。所有节水稻作模式,秋季水稻收获期土壤细菌数量显著高于常规稻作模式。 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  模式的土壤细菌数量分别较 CK 模式增加了 132.42%、248.63%和 123.90%。常规稻作模式在水稻生育期间长期有水层存在,土壤含水量高,过量的水分限制了气体交换,降低了可利用态氧气的供应,造成了厌氧环境,加之长期采用此模式,土壤的 pH 值减低,以上因素均不利于细菌的生长,因此细菌的数目明显低于其它模式。与此相反,3 种节水稻作模式,在水稻生育时期采用节水灌溉技术,实现了土壤水分轻度亏缺,不仅可以提供生命所必需的水分,而且可以有效改善土壤的通气状况,为细菌的生命活动提供了良好环境。3 种节水稻作模式相比,以  $T_2$  模式中细菌数量增加幅度最大,可能是由于秸秆的施入,增加土壤中可利用 C 的含量,提高土壤中细菌的比例与含量。

表 3 节水稻作模式对土壤微生物数量的影响

处 理	细菌/ ( $10^6$ cfu·g <sup>-1</sup> )	真菌/ ( $10^4$ cfu·g <sup>-1</sup> )	放线菌/ ( $10^5$ cfu·g <sup>-1</sup> )	3 大菌总数/ ( $10^6$ cfu·g <sup>-1</sup> )
CK	3.64 <sup>c</sup>	4.26 <sup>b</sup>	1.62 <sup>c</sup>	3.84 <sup>c</sup>
$T_1$	8.46 <sup>b</sup>	4.02 <sup>b</sup>	3.64 <sup>b</sup>	8.86 <sup>b</sup>
$T_2$	12.69 <sup>a</sup>	5.65 <sup>a</sup>	5.58 <sup>a</sup>	13.30 <sup>a</sup>
$T_3$	8.15 <sup>b</sup>	1.71 <sup>c</sup>	3.84 <sup>b</sup>	8.55 <sup>b</sup>

注:CK 常规双季稻模式(对照模式); $T_1$  节水灌溉双季稻模式; $T_2$  水旱轮作双季稻模式; $T_3$  稻油轮作模式。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同。

2.1.2 对真菌的影响 从表 3 可以看出,与细菌相比,真菌占土壤微生物的比例较小,仅达 0.20%~

1.11%,其不是主要的土壤微生物类群。但实际上由于真菌的菌丝体粗大并能扩展成网状物,它构成了微生物量的很大一部分,同时环境水分状况的改善有利于真菌数量的增加。与常规稻作模式相比,节水稻作模式的真菌数量变化有所不同。与 CK 模式相比, $T_1$  和  $T_3$  模式的土壤真菌数量分别减少了 5.63%和 59.86%, $T_2$  模式的土壤真菌数量增加了 32.63%(表 3)。试验结果表明,节水稻作模式对土壤真菌影响存在不同效应,与常规稻作模式相比, $T_1$  和  $T_3$  模式的真菌数量降低,这可能与采取节水稻作模式后,土壤的 pH 值升高,不利于真菌生长,而常规稻作模式的土壤 pH 值却下降,有利于真菌的生长有关。因此,节水稻作模式和常规稻作模式相比,土壤真菌数量有下降的趋势。与常规稻作模式相比, $T_2$  模式的土壤真菌数量的升高,这可能由于秸秆施入和土壤水分状况改善,提高了土壤中可利用 C 的含量,有利于真菌生长,在一定程度上弥补了土壤 pH 值上升对真菌造成的影响。

2.1.3 对放线菌的影响 放线菌是处于细菌和真菌之间的过渡类群,其占土壤微生物的比例 4.11%~4.49%(表 3)。节水稻作模式对放线菌影响与对细菌的影响表现出一致的趋势,供试的 3 种节水稻作模式的土壤放线菌数量均高于常规稻作模式。 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  模式的土壤放线菌量分别较 CK 模式提高了 124.69%、244.44%和 137.04%。

## 2.2 节水稻作模式对土壤微生物碳氮的影响

土壤微生物量碳是组成土壤腐殖质的重要碳源,微生物量碳的增加可以促进土壤形成活性较高的新生腐殖质,对改善土壤质量具有重要意义<sup>[10]</sup>。土壤微生物量氮反映土壤氮素的有效性,是土壤微生物对氮素矿化与固持作用的综合体现,对土壤氮的供应和循环具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。节水稻作模式下的土壤微生物量碳、氮的结果详见表 4。

表 4 节水稻作模式对土壤微生物量碳氮的影响

处理	土壤微生物量 C/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤微生物量 N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤微生物 熵/%	微生物量氮与土壤 全氮的比值/%	土壤微生物 C/ 土壤微生物 N
CK	134.56 <sup>c</sup>	27.47 <sup>c</sup>	1.98 <sup>c</sup>	2.86 <sup>c</sup>	4.90 <sup>b</sup>
$T_1$	172.23 <sup>b</sup>	29.79 <sup>c</sup>	2.43 <sup>b</sup>	3.57 <sup>b</sup>	5.78 <sup>a</sup>
$T_2$	226.78 <sup>a</sup>	46.17 <sup>a</sup>	3.16 <sup>a</sup>	4.88 <sup>a</sup>	4.91 <sup>b</sup>
$T_3$	221.89 <sup>a</sup>	40.91 <sup>b</sup>	2.72 <sup>ab</sup>	3.86 <sup>b</sup>	5.42 <sup>a</sup>

供试土壤微生物量碳的变化介于 134.56~226.78 mg/kg,而微生物量氮的变化介于 12.21~20.52 mg/kg。与 CK 模式相比, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  模式的土壤微生物量 C 分别增加了 27.99%、68.53%和

64.90%, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  模式的土壤微生物量 N 分别增加了 8.44%、68.06%和 48.89%,表明采用节水稻作模式能够显著提高土壤的微生物量碳、氮的含量。产生这种差异的原因是由于节水灌溉改变了土壤微生

物区系结构,加速了有机质分解,促进土壤腐殖质的形成,同时节水灌溉减少了化学肥料的渗漏,土壤肥力高于淹灌条件,满足微生物生长对养分的需求。在节水稻作模式中,以  $T_2$  模式和  $T_3$  模式增加幅度较大。究其原因,可能是由于土壤微生物以异养型种群为主,其生命活动过程需要消耗一定的能量,水旱轮作模式中的秸秆覆盖和稻油轮作模式中的植物残体和根系增加为土壤为微生物提供了丰富的有机物,加剧了土壤微生物的繁衍,使其生命活动旺盛。

微生物熵(SMB—C/SOC)变化反映了土壤中输入的有机质向微生物量碳的转化效率、土壤中碳损失和土壤矿物对有机质的固定<sup>[13-14]</sup>。由表 4 可见,微生物熵的变化趋势与土壤微生物量碳的变化趋势基本相一致,与 CK 模式相比, $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  模式的土壤微生物量 C 分别增加了 22.73%, 59.60% 和 37.37%。节水稻作模式土壤微生物熵显著高于常规稻作(CK)模式,这可能是由于节水灌溉能够有效改善土壤环境,使其有利于土壤有机质的降解和微生物量碳的增加。

土壤微生物量氮与土壤全氮的比值表征微生物对土壤有效氮素的利用效率<sup>[15]</sup>。从表 4 可以看出,节水稻作模式均高于常规稻作模式,以  $T_2$  模式最高,达到 4.88。这是由于采用节水灌溉和秸秆覆盖等措施,改善了土壤物理性状,促进了土壤微生物的繁衍,使其生命活动旺盛,从而被微生物固持了一部分氮素。

土壤微生物量 C/N 比可反映微生物群落结构信息,其显著的变化喻示着微生物群落结构变化可能是微生物量较高的首要原因<sup>[14]</sup>。从表 4 可以看出,节水稻作模式对土壤微生物量碳/土壤微生物量氮比的影响达到显著差异,以  $T_1$  模式土壤微生物量碳/土壤微生物量氮的比值最高,其次为  $T_3$  模式,均显著高于  $T_2$  模式,最低为 CK 模式。

### 3 结论

(1) 就土壤微生物数量而言,与 CK 模式相比, $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  模式的土壤细菌数量分别增加了 132.42%, 248.63% 和 123.90%;  $T_1$  和  $T_3$  模式的土壤真菌数量分别减少了 5.63% 和 59.86%;  $T_2$  模式的土壤真菌数量增加了 32.63%;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  模式的土壤放线菌量分别提高 124.69%, 244.44% 和 137.04%; 以水旱轮作双季稻模式效应最佳。表明采用节水稻作模式有利于土壤细菌和放线菌的增殖,但抑制了真菌的增殖。

(2) 节水稻作模式的土壤微生物量碳、土壤微生物量氮、微生物熵、土壤微生物量氮与土壤全氮的比

值、土壤微生物量 C/N 比均显著高于常规稻作模式,表明节水稻作模式通过采用节水灌溉和秸秆覆盖等措施,极大改善了土壤物理性状,使其生命活动旺盛,促进了土壤微生物的繁衍。

(3) 采用节水稻作模式形成土壤水分轻度亏缺,这种轻度水分亏缺提供生命所必需的水分,有效地改善土壤的通气状况,为微生物创造了良好的生活环境,土壤微生物菌落总数和土壤微生物量碳氮显著增加。因此,采取节水稻作模式有利于保持土壤中旺盛的微生物活动,使得土壤生物活性不断发展,促进土壤健康状态形成。

(4) 土壤微生物数量和土壤微生物量碳氮只是影响土壤质量的生物学的部分指标,在以后的研究工作中应该将土壤理化性质、土壤微生物群落、土壤微生物量、土壤酶活性与土壤微生物多样性等指标联系起来进行系统研究,以期对南方丘陵季节性干旱区的水稻产业健康发展和培肥土壤提供科学依据。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王波,邓艳萍,肖新,等. 不同节水稻作模式对土壤理化特性和土壤酶活性影响研究[J]. 水土保持学报,2009,23(5):219-222.
- [2] 彭佩钦,吴金水,黄道友,等. 洞庭湖区不同利用方式对土壤微生物量碳氮磷的影响[J]. 应用生态学报,2006,26(7):2261-2267.
- [3] 展茗,曹凑贵,江洋,等. 不同稻作模式下稻田土壤活性有机碳变化动态[J]. 应用生态学报,2010,21(8):2010-2016.
- [4] 潘圣刚,曹凑贵,蔡明历,等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):283-289.
- [5] Xiao Xin, Zhao Yanwen, Hu Feng. The comparison on the function of different water-saving rice cultivation ecosystems in seasonal drought hilly region of Southern China[J]. Journal of sustainable agriculture, 2008, 32(3):463-482.
- [6] 肖新,赵言文,胡锋,等. 节水稻基农田作物轮作与灌溉模式需水规律研究[J]. 水科学进展,2008,19(4):567-573.
- [7] 姚占芳,吴云汉. 微生物学实验技术[M]. 北京:气象出版社,1998.
- [8] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987,19(6):703-707.
- [9] Joergensen R G, Mueller T. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the  $k_{EC}$  value[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1996, 28(1):3-37.

(下转第 71 页)

(2) 土壤淋滤液的磷含量随着土壤淋溶量的增加总体呈下降趋势,但磷的累积淋失量会持续增加,长期的淋溶会造成土壤磷的持续释放,1 200 mm 酸雨侵蚀可使 3 种土壤中的磷分别产生 0.19、0.81 和 1.58% 的淋失率。土壤的磷元素的淋失量在酸雨 pH 值为 5.0 时达到最高,即弱酸性的酸雨对土壤磷的侵蚀作用更强;弱酸性降雨不仅能使土壤酸化,还会造成营养元素磷的大量淋失使土壤贫瘠,应该做好防护措施减少损失。

(3) 3 种土壤磷的淋失率和累积淋失量为:腐殖质层>黏化层>母质层。从磷的淋失量与酸雨 pH 值的拟合关系来看,相关系数大小为:腐殖质层>母质层>黏化层,酸雨对腐殖质层的磷具有最强的侵蚀效应。

(4) 母质层和黏化层的酸化主要发生在土壤表层,而腐殖质层酸化主要发生在土壤底层,酸雨侵蚀后腐殖质层酸化最严重。最易被酸化和淋失营养元素磷的腐殖质层覆盖在植被下方,其营养供给与农业生产能力密切相关,研究土壤受酸雨侵蚀的能力对农业生产意义重大。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 杨珏,阮晓红. 土壤磷素循环及其对土壤磷流失的影响[J]. 土壤与环境,2001,10(3):256-258.
- [2] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究,2010,23(5):527-532.
- [3] Gorham E. Acid deposition and its ecological effects: A brief history of research[J]. Environmental Science and Policy, 1998,1(3):153-165.
- [4] 刘俐,宋存义,李发生. 模拟酸雨对红壤中硅铝铁释放的影响[J]. 环境科学,2007,28(10):2376-2382.
- [5] 刘莉,李晓红. 模拟酸雨对三峡库区 4 种典型土壤酸化及盐基离子淋溶释放的影响[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(8):63-69.
- [6] Galloway J N. Acidic deposition: perspectives in time and space[J]. Water, Air and Soil Pollutant, 1995, 85(1):15-24.
- [7] 鲁如坤,时正元. 磷在土壤中有有效性的衰减[J]. 土壤学报,2000,37(3):323-329.
- [8] 贾兴永,李菊梅. 土壤磷有效性及其与土壤性质关系的研究[J]. 中国土壤与肥料,2011(6):76-82.
- [9] 雷波,王定勇,包维楷. 模拟酸雨对土壤磷元素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报,2004,23(3):516-519.
- [10] 高太忠,戚鹏. 酸雨对土壤营养元素迁移转化的影响[J]. 生态环境,2004,13(1):23-26.
- [11] 张华,杨永奎. 酸雨对紫色土氮磷淋失的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(1):22-25.
- [12] 许中坚,刘广深,刘维屏. 酸雨对旱地红壤磷素释放的影响研究[J]. 环境科学学报,2004,24(1):134-138.
- [13] 曾曙才,吴启堂. 模拟酸雨对施肥条件下赤红壤氮磷淋失特征的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(6):16-21.
- [14] 玮娜. 中国北方城市与东亚区域降水化学组成对比分析[D]. 江苏南京:南京信息工程大学,2010.
- [15] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- biological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 92(1/2):18-29.
- [14] 刘恩科,赵秉强,李秀英,等. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16SrDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析[J]. 生态学报,2007, 27(3):1079-1085.
- [15] 马星竹,武志杰,陈利军,等. 长期施肥对黑土、棕壤微生物量的影响[J]. 土壤通报,2011,42(1):60-64.

(上接第 65 页)

- [10] 张明,白震. 长期施肥农田黑土微生物量碳、氮季节性变化[J]. 生态环境,2007,16(5):1498-1503.
- [11] 王光华,金剑. 不同土地管理方式对黑土土壤微生物量碳和酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(6):1275-1280.
- [12] 单鸿宾,梁智,王纯利,等. 连作及灌溉方式对棉田土壤微生物量碳氮的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010, 28(4):202-205.
- [13] Franchini J C, Crispino C C, Souza R A, et al. Micro-