水稻秸秆的腐熟剂筛选研究

王琼瑶[1,2],赵 源[1,2],朱艳婷[1,2],肖 炜[2],常 青[2],岳 钧[2],刘 理[2]
(1. 四川省自然资源科学研究院,四川成都 610015;2. 四川省生产力促进中心,四川成都 610015)

摘要 [目的]为解决水稻秸秆自然腐熟过程慢、影响农耕等问题,开展水稻秸秆的最佳腐熟剂筛选研究。[方法]采用室内对比试验,观察不同时间秸秆腐熟的颜色变化,测定腐熟过程中 pH、温度、种子发芽指数等指标,对比分析不同腐熟剂对水稻秸秆的腐熟效果,从而筛选出水稻秸秆的最佳腐熟剂。[结果]添加腐熟剂可缩短水稻秸秆的腐熟时间,提前 7 ~ 14 d 达到腐熟效果。宜春强微生物科技有限公司的强微堆肥快速腐熟剂处理后,在 42 d 时腐熟液 pH 达 7.5,84 d 种子发芽率达到 85%,发芽指数为 0.83,达到完全腐熟效果。[结论]相比其他处理,宜春强微生物科技有限公司的强微堆肥快速腐熟剂对水稻秸秆的腐熟效果最佳,可作为试验材料进行田间应用技术的研究与推广,从而为水稻秸秆的资源化利用和农业的可持续发展提供科学依据。

关键词 水稻秸秆;腐熟剂;发芽指数;pH
中图分类号 S216.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517 - 6611(2018)14 - 0068 - 03

Research on Selecting of Decomposition Agent of Rice Straw

WANG Qiong-yao[1,2], ZHAO Yuan[1,2], ZHU Yan-ting[1,2] et al (1. Sichuan Province Natural Resources Science Academy, Chengdu, Sichuan 610015; 2. Sichuan Productivity Promoting Centre, Chengdu, Sichuan 610015)

Abstract [Objective] In order to solve the problem of slow natural maturation of rice straw and the influence of farming, the experiment was conducted to select the best decomposing agent of rice straw. [Method] The laboratory contrast experiment was to observe the color change of straw maturity at different times and determine the pH, temperature, seed germination rate, seed germination index and other indicators of decomposition process, compare and analyze of the effect of different decomposing agents on straw, then select the best decomposing agent of rice straw. [Result] Adding decomposing agent could shorten the maturity time of rice straw about 7 - 14 days in advance. Under the treatment of the strong compost rapid maturity agent of Yichun Strong Microbial Technology Co., Ltd., the pH of rice straw reached 7.5 on 42 days, the germination rate was 85%, the germination index was 0.83 on 84 days and it achieved maturation effect. [Conclusion] Comparing to other treatments, the strong compost rapid maturity agent of Yichun Strong Microbial Technology Co., Ltd. is the best decomposing agent for the rice straw. It can be used as experimental material to study and promote field application technology, in order to provide scientific basis for the resource utilization of rice straw and the sustainable development of agriculture.

Key words Rice straw; Decomposition agent; Germination index; pH

四川是我国产生秸秆的大省,秸秆资源丰富且产生量趋于稳定,主要集中在成都平原地区、川东北和川南丘陵区域。其中成都平原地区秸秆资源年总量达 1 482 万 t,占秸秆资源总量的 31.9%。全省常年农作物秸秆理论资源量 4 641.09 万 t 左右,约占全国的 4.46%,其中水稻秸秆约 1 638.08 万 t,占总量的 35.3%[1]。水稻秸秆作为重要的农业资源,国内外大多采用秸秆还田作为资源化利用的主要方式[2],我国每年产生农作物秸秆 7 亿 t 左右,有超过 2 亿 t 的秸秆白白腐烂或焚烧,使资源变成了污染源[3-4]。秸秆的焚烧不仅加重了气候变暖和环境污染,而且造成巨大的生物资源浪费[5]。研究表明,秸秆中含有丰富的有机质、氮磷钾和微量元素,是农作物重要的有机肥源[6-8]。秸秆还田不仅减少了无机化肥的施用,降低成本,且降低氮磷元素随水土流失引起水体富营养化的潜在风险,有利于保护水资源,秸秆还田可以增加耕地有机物料的归还量,保持提高地力[9]。

成都平原的水稻秸秆大多作为农户基本燃料利用,但季节性过剩的秸秆处置成了农户的一大问题[10-11]。秸秆就地还田是传统的秸秆资源利用法之一,但是秸秆自然腐熟速度缓慢,制约了秸秆就地还田的发展。成都平原大多是两季或者两季以上作物轮作,前季作物秸秆还田后来不及腐解,在一定程度上影响后季作物的正常播种或者生长。应用秸秆腐熟菌剂,可以加快秸秆还田速度,实现水稻秸秆全量直接还田[12]。有研究表明,在堆肥过程中,温度、颜色等物理指标可以较为直观地反映腐熟度[13],而化学指标中 pH、有机碳、全氮、水溶性铵态氮等可以作为测定指标来观察堆肥腐熟度[14],种子发芽指数(GI)作为生物学指标也常用于评价粪便堆肥腐熟度[15]。笔者通过腐熟模拟试验,筛选出腐熟效果较好的微生物腐熟剂,为成都平原地区水稻秸秆还田技术研究奠定基础,也为提高农业废弃物循环利用率、减少环境污染、实现农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 水稻秸秆(品种为川香 9838);小白菜(品种为上海青);腐熟剂 1(莱特微生物催腐剂,成都合成生物科技有限公司)、腐熟剂 2(强微堆肥快速腐熟剂,宜春强微生物科技有限公司)、腐熟 3(高活性秸秆腐熟剂,山东省潍坊市君德生物科技公司)、腐熟剂 4(益富农秸秆发酵剂,河南益富农农业科技有限公司)、腐熟剂 5(农富康秸秆发酵剂,郑州农富康生物科技有限公司);W_1 和 W_2(四川农业大学自主培养的秸秆分解微生物)。

1.2 试验处理设置

1.2.1 腐熟剂控制试验。试验处理:CK(秸秆 + 水);T_1(秸秆 + 腐熟剂 1 + 水);T_2(秸秆 + 腐熟剂 2 + 水);T_3(秸秆 + 腐熟剂 3 + 水);T_4(秸秆 + 腐熟剂 4 + 水);T_5(秸秆 + 腐熟剂 5 + 水);W_1(秸秆 + W_1 + 水);W_2(秸秆 + W_2 + 水);W_1 + W_2

基金项目 2017 年四川省基本科研业务费项目"成都平原秸秆还田的腐熟剂应用技术研究"。
作者简介 王琼瑶(1986—),女,四川雅安人,助理研究员,硕士,从事农业资源利用与环境保护研究。
收稿日期 2017 - 12 - 21

(秸秆 + W_1 + W_2 + 水)。每个处理设置 3 个重复。

1.2.2 试验处理。将秸秆剪成 2 ~ 3 cm 的小段,称取10 g 将其放入白色塑料瓶中。将 5 种腐熟剂和 2 种微生物分别按照每杯 5 亿微生物活菌,加水 500 mL 溶解活化,倒入塑料瓶中淹没秸秆,用封口膜和滤纸密封,放置在室内进行腐解试验,室温 20 ℃。

1.3 观察与测定 每周观察秸秆腐熟颜色变化,测定腐熟过程中的 pH、种子发芽率、发芽种子根长、温度变化,计算种子发芽指数等指标。

吸取腐熟液体 2 mL 于铺有滤纸的培养皿中,同时设空白对照(蒸馏水),每个培养皿内放 20 粒饱满的小白菜种子,将其放置在 30 ℃恒温培养箱中避光培养 48 h 后取出,测定种子发芽率及其根长。

1.4 统计分析 采用 SPSS、DPS 等统计工具对试验数据进行处理。种子发芽指数(GI)的计算方法为:

$$GI = \frac{\text{堆肥处理种子的发芽率} \times \text{堆肥种子根长}}{\text{对照种子发芽率} \times \text{对照种子根长}} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 水稻秸秆腐熟过程中颜色变化 腐熟堆肥的颜色接近褐色或黑色,将水稻秸秆腐熟的过程分为前、中、后 3 个时期,统计 3 个时期的秸秆和溶液的颜色,结果见表 1。从秸秆腐熟颜色来看,腐熟前期,T_1 和 W_1 的颜色变化较为明显,溶液和秸秆变为黄色,其余处理颜色均为微黄色。腐熟到中期时,各处理颜色变化程度较大,其秸秆颜色加深至黄褐色和灰黄褐色,溶液颜色变化程度不如秸秆大;其中 T_4、T_5 颜色变化程度最为明显,秸秆由微黄变为灰黄褐色,溶液由微黄色变为深黄棕色。而到了后期,除了 T_4 和 CK 的溶液颜色为深黄褐色,其余秸秆颜色和溶液颜色均达到了灰黄褐色。从秸秆腐熟的硬度来看,秸秆腐熟过程中,秸秆越来越软,各处理之间的软硬度变化差异较为显著,秸秆腐熟前期都处于较硬等级,在中期时,T_2、T_3 和 3 个 W 处理达到微软,后期则已经软化,其中 T_2、T_3 软化程度最深,CK 秸秆后期较软,但是较 T_2、T_3 来说不易扯断。

表 1 秸秆腐熟过程中颜色变化

Table 1 The color change of rice straw maturity at different times

处理 Treatment	前期 Early period		中期 Mid-term		后期 Late period	
	秸秆颜色 Straw color	溶液颜色 Solution color	秸秆颜色 Straw color	溶液颜色 Solution color	秸秆颜色 Straw color	溶液颜色 Solution color
CK	微黄	微黄	黄褐	棕黄	灰黄褐	深黄褐
T_1	黄	黄	黄褐	黄棕	灰黄褐	灰黄褐
T_2	微黄	微黄	黄褐	棕黄	灰黄褐	灰黄褐
T_3	微黄	微黄	黄褐	深黄棕	灰黄褐	灰黄褐
T_4	微黄	微黄	灰黄褐	深黄棕	灰黄褐	深黄褐
T_5	微黄	微黄	灰黄褐	深黄棕	灰黄褐	灰黄褐
W_1	黄	黄	深黄褐	深黄棕	灰黄褐	灰黄褐
W_2	微黄	微黄	灰黄褐	棕黄	灰黄褐	灰黄褐
$W_1 + W_2$	微黄	微黄	黄褐	棕黄	灰黄褐	灰黄褐

2.2 水稻秸秆腐熟过程中 pH 变化 秸秆腐熟初期,多为弱酸性到中性,pH 一般为 6.5 ~ 7.5,腐熟的堆肥一般呈弱碱性,故能作为堆肥腐熟度的一项参考指标。pH 在 7.5 ~ 8.5 时,可以作为初步判断堆肥已达到腐熟要求之一[16-17]。

从图 1 可看出,在室内条件下,pH 变化整体呈先降后升的趋势,最终各处理均达到微碱性环境(pH 为 7.5 ~ 9.0),腐熟结束后所有处理的秸秆溶液 pH 提高明显,最终 pH 均高于 CK 的 pH(7.5),且所有添加腐熟剂处理的 pH 均比 CK 先达到 7.5。T_2、T_3 在第 42 天时,pH 就达 7.5,比 CK 提前了 28 d。在整个腐熟期里,所有处理在 0 ~ 21 d pH 呈下降趋势,其中 T_2 下降至6.6,T_3 下降至 6.5。第 28 ~ 84 天,pH 整体呈上升趋势,且 49 d 后上升趋势减小逐渐趋于稳定,最终 T_2 达 8.0,T_3 达 8.1。相比 CK 和添加四川农业大学自主培养的秸秆分解微生物的处理,添加微生物腐熟剂的处理 pH 提升明显。以上数据表明添加腐熟剂可以加快秸秆的腐熟,且从 pH 变化效果来看 T_3 的腐熟效果较好,最高 pH 达 8.1,其次是 T_2 达 8.0。

2.3 水稻秸秆腐熟过程中温度变化 温度变化是反映腐熟度和腐熟效果的常用指标,温度与堆肥中微生物活性密切相关,有机物质被微生物氧化分解越快,释热越多,堆肥温度就越高。此次室内试验研究,由于试验所用容器存在较大的热传导,试验所测温度远低于秸秆腐熟所放出的热量,各处理之间的温度变化高低差异不显著,不能直接作为判断腐熟效果的指标,但其变化趋势仍然可以反映整体腐熟过程的进度。

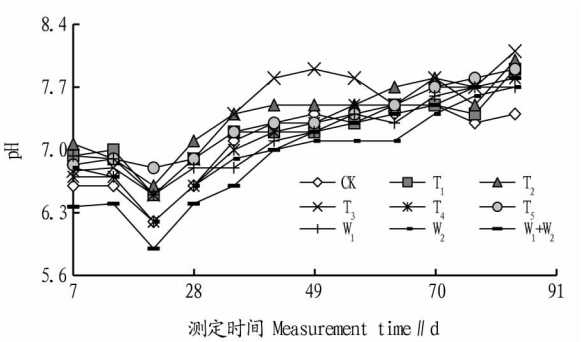

图 1 水稻秸秆腐熟过程中 pH 变化

Fig. 1 The change of pH in the process of rice straw maturity

从图 2 可看出,室温 20 ℃条件下,在第 84 天后,整个水稻秸秆腐熟过程基本结束。9 个处理秸秆腐熟过程中,温度均大于室温,温度变化明显,不同处理间温度变化规律存在差异,但是差异性并不显著。在第 21 天时,出现短暂的高温期,温度迅速上升为 26.5 ℃左右,第 28 天温度快速下降,

CK、T_2 温度下降至接近室温。28 ~ 63 d,温度呈上升趋势,63 d温度达到整个腐熟过程中后期的高峰,除 T_2 外均大于等于 27.0 ℃,CK 最高温度为 27.9 ℃。腐熟后期,秸秆温度基本稳定,其中 T_3 温度最高,为 25.0 ℃。

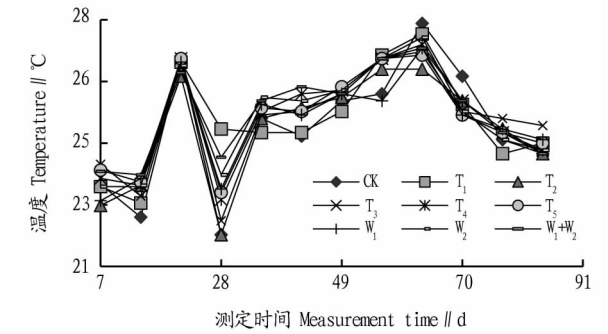

图 2 水稻秸秆腐熟过程中温度变化

Fig. 2 The change of temperture in the process of rice straw maturity

2.4 水稻秸秆腐熟过程中种子发芽指数变化 种子发芽试验是测试植物毒性直接快速可靠的生物测试方法,反映了堆肥的植物毒性,是一个综合性的参数。该试验各处理的种子发芽率基本呈现先降低后升高的趋势,随着秸秆腐熟,有机质逐步分解,产生对种子有害的物质影响发芽,后期腐熟基本完成,种子发芽率逐渐升高。种子发芽指数是根据种子发芽率和根长计算所得,是检验堆肥有机质腐熟度的最精确、最有效的方法和最具说服力的判断堆肥腐熟度的指标,目前被广泛接受和应用。一般情况下发芽指数大于 50% 可认为堆肥对种子基本无毒性。GI > 50%,则可认为基本腐熟,当 GI 达 80% ~85% 时,这种堆肥就可以认为已经完全腐熟,对植物没有毒性[18]。

从图 3 可看出,秸秆腐熟前中期,种子的发芽指数较低,整体在 0.1 ~ 0.3 波动;7 ~ 21 d 种子发芽指数出现短暂的下降趋势;21 ~ 70 d 发芽指数较为稳定,呈微弱的上升趋势;70 d后种子发芽指数迅速增长,所有处理(T_4 除外)的发芽指数均大于 0.50,腐熟结束后,各处理(T_4 除外)的发芽指数均超过了 0.60,T_4、T_5 的最终发芽指数为 0.55、0.60,低于 CK 的发芽指数(0.63),T_1、T_2、T_3、W_1、W_2、$W_1 + W_2$ 的发芽指数则高于 CK,其中 T_2 最高,为 0.83,T_3 次之,为 0.76。

3 结论与讨论

研究结果表明,添加秸秆腐熟剂可以加快秸秆的腐熟,由于添加的腐熟剂不同,各处理的 pH、温度、发芽指数等指标的整体变化趋势相似,但各处理之间的变化时间、速度和幅度存在差异。从 pH 变化的综合情况来看,各处理的 pH 均呈上升趋势,T_2 的 pH 在 28 d 达 7.1,比 CK 提前了 7 d;T_3 的 pH 在 35 d 达 7.4,比 CK 提前 14 d;在 84 d,T_3 的 pH 为最高(8.1),各处理 pH 平均为 7.9,平均高出 CK 0.5,说明添加腐熟剂的水稻秸秆在微生物的作用下,腐熟速度更快,且腐熟效果较 CK 更好。从温度指标来看,各处理都在 21 d 达到了一个小高峰,平均温度为达 26.8 ℃,随后 63 d 又出现一次峰值,平均温度 27.3 ℃,说明在这 2 个时期水稻秸秆进入腐熟高峰期;腐熟后期温度逐渐降低至室温,平均温度为 24.4 ℃,说明可降解有机质的分解接近完全,秸秆腐熟基本完成。从秸秆的腐熟表观特征来看,T_2、T_3 的秸秆和溶液颜色最终变为灰黄褐色,且比其他处理更软,更易拉扯断;从发芽指数来看,84 d 各处理的发芽指数平均为 0.70,高出 CK 0.07,其中 T_2 最高(0.83),高出 CK 0.20,水稻秸秆基本腐熟。根据腐熟效果的判断指标综合评价,分析得出腐熟剂 2 的腐熟效果最佳,腐熟剂 3 次之。

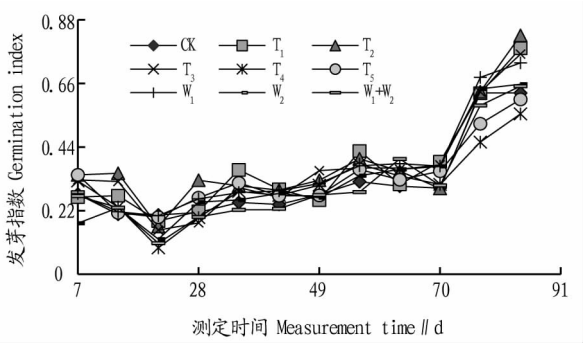

图 3 水稻秸秆腐熟过程中发芽指数变化

Fig. 3 The change of germination index in the process of rice straw maturity

综上所述,添加了腐熟剂的水稻秸秆腐熟进程较对照提前 7 ~ 14 d,综合各项指标,最终筛选出宜春强微生物科技有限公司的强微堆肥快速腐熟剂对水稻秸秆的腐熟效果最好,在 42 d 时腐熟液 pH 达 7.5,84 d 种子发芽率达 85%,发芽指数为 0.83,相比其他处理腐熟效果更好。因此建议宜春强微生物科技有限公司的强微堆肥快速腐熟剂作为水稻秸秆还田的腐熟剂应用技术研究首选试验材料,为田间腐熟剂应用技术研究奠定基础。

腐熟剂筛选试验是在可控环境条件下进行的,影响水稻秸秆腐熟的因素除了温度、pH、腐熟剂的用量等,还有秸秆的水分含量、碳氮比以及本身所携的微生物等。对于田间复杂多变的自然环境,该试验筛选出的效果较好的腐熟剂在应用于田间时,其应用技术和腐熟效果还需要进一步研究。秸秆作为一种产量大的农业资源,可利用空间巨大,目前我国的秸秆资源利用途径多,对于水稻秸秆的全量还田施用腐熟剂技术仍需进一步的探究。

参考文献

[1] 四川省发改委,农业厅等. 四川省秸秆综合利用规划(2016 - 2020)[A]. 2017.
[2] 彭春艳,罗怀良,孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划,2016,35(3):14 - 20.
[3] 靳贞来,靳宇恒. 国外秸秆利用经验借鉴与中国发展路径选择[J]. 世界农业,2015(5):129 - 132.
[4] 翁伟,杨继涛,赵青玲,等. 我国秸秆资源化技术现状及其发展方向[J]. 中国资源综合利用,2004(7):18 - 21.
[5] 张国,逯非,赵红,等. 我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J]. 农业环境科学学报,2017,36(5):981 - 988.
[6] 苗相伟,王国东,曹珅,等. 刍议秸秆还田对土壤生态特性及作物生长发育的影响[J]. 辽宁农业科学,2015(2):54 - 57.
[7] 魏赛金,李昆太,涂晓嵘,等. 稻草还田配施化肥与腐秆菌剂下的土壤微生物及有机碳组分特征[J]. 核农学报,2012,26(9):1317 - 1321.

(下转第 77 页)

表 4　湖区 Ⅱ 特征值、贡献率和累积贡献率

Table 4　Characteristics, contribution rates, and cumulative contribution rates of Lake Area Ⅱ

因子 Factor	合计 Total	方差 Variance//%	累积方差 Cumulative variance//%
1	7.606	69.148	69.148
2	1.600	14.544	83.692
3	0.986	8.966	92.657
4	0.808	7.343	100.000
5	3.602E－16	3.274E－15	100.000
6	1.800E－16	1.637E－15	100.000
7	9.288E－17	8.443E－16	100.000
8	3.350E－17	3.046E－16	100.000
9	－2.170E－16	－1.973E－15	100.000
10	－2.732E－16	－2.483E－15	100.000
11	－4.323E－16	－3.930E－15	100.000

从经旋转后的载荷矩阵(表 5)可以看出,影响第 1 主成分的主要因子为 Ni、B、Zn、Ti 元素。从贡献率来看,第 1 主成分占 69.1%,大于其他主成分贡献率,所以 Ni、B、Zn、Ti 元素是湖区 Ⅱ 的决定性元素。出现这一现象的原因是这些采样点位于十五里河、派河和南淝河入湖区。经查阅同期这 3 条河流数据,Ni 和 B 元素数据均大于其他元素。河流输入 Ni 和 B 元素是造成湖体水质中 Ni 和 B 元素偏高的主因。Zn、Ti 元素与湖区 Ⅰ 相类似,且已经呈现出含量偏高的状态。

表 5　湖区 Ⅱ 旋转后载荷矩阵

Table 5　Rotated load matrix of Lake Area Ⅱ

元素 Element	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2
B	0.914	0.379
V	0.850	0.409
Co	0.811	0.569
Ni	0.945	0.224
Ba	0.907	0.075
Cu	－0.127	0.825
Zn	0.906	－0.379
Pb	0.336	0.507
Ti	0.883	0.449
Mo	0.568	0.625
Sb	0.718	0.584

2.2.3　湖区Ⅲ分析。被聚类为湖区Ⅲ的只有 5 和 14,这 2 点采样位于新河入湖区和兆河入湖区。在 11 项参与分析的项目中,大多数元素监测数据均低于其他点位。究其原因是新河和兆河与其他河流数据相比较,也均处于低水平状态,受人类活动干扰较少。

3　结论与讨论

(1)利用聚类分析方法将全湖区分为 3 类,且河口区金属含量明显高于湖区其他点位且南部湖区金属含量最低。聚类分析结论与程杰等[6]、王永华等[7]研究巢湖东区底泥污染物分布特征的结论(河口区重金属含量相对较高)大体一致,表明底泥与水质中金属含量具有高度相关性。

(2)不同水域金属污染状况水平不一致,经分析湖区Ⅰ、Ⅱ金属含量明显高于湖区Ⅲ。

(3)不同水域有不同的首要污染元素,对 3 个湖区分别进行主成分分析。Ti、Mo、Ni、B 元素是湖水金属含量水平的决定性元素。湖水受西北部入湖河流带来的金属污染较明显。这与陈洁[8]研究巢湖及其主要出入湖河流表层沉积物污染状况得出巢湖重金属污染较轻,主要的重金属元素呈现西北部浓度高、东北部其次、南部最低的分布趋势这一结论相似。

参考文献

[1] 张绪美,董元华,石浚哲,等. 聚类－因子分析在太湖水质参数评价中的应用[J]. 安全与环境学报,2006,6(6):58－62.

[2] 顾红燕,李宏,陈希曙,等. iCAP Q 电感耦合等离子体质谱仪进阶培训教材[Z]. 赛默飞世尔科技(中国)有限公司技术培训中心,2016.

[3] 李艳红,葛刚,胡春华,等. 基于聚类分析和因子分析的鄱阳湖流域水质时空变化特征及污染源分析[J]. 南昌大学学报(理科版),2016,40(4):360－365.

[4] 郝黎仁,樊元,郝哲欧,等. SPSS 实用统计分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[5] 杜臣昌,刘恩峰,羊向东,等. 巢湖沉积物重金属富集特征和人为污染评价[J]. 湖泊科学,2012,24(1):59－66.

[6] 程杰,李学德,花日茂,等. 巢湖水体沉积物重金属的分布及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报,2008,27(4):1403－1408.

[7] 王永华,钱少猛,徐南妮,等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究,2004,17(6):22－26.

[8] 陈洁. 巢湖及其主要出入湖河流表层沉积物污染状况分析[D]. 南京:南京大学,2007.

(上接第 70 页)

[8] 安丰华,王志春,杨帆,等. 秸秆还田研究进展[J]. 土壤与作物,2015,4(2):57－63.

[9] 陈裕兴. 稻草还田应用秸秆腐熟剂效果研究[J]. 福建农业科技,2013(12):36－37.

[10] 李向东,汤永禄,隋鹏,等. 四川盆地稻田保护性耕作制可持续性评价研究[J]. 作物学报,2007,33(6):942－948.

[11] 袁亚章,沈超,蔡俊良. 成都市农作物秸秆综合利用现状与途经分析[J]. 现代农业科技,2015(6):251－252.

[12] 谢柱存,何伟松. 三种秸秆腐熟菌剂在稻田上的对比试验[J]. 广西农学报,2008,23(6):17－19.

[13] 李国学,张福锁. 固定废物堆肥化与有机复混肥生产[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

[14] 唐珠. 猪粪堆肥的理化特征及腐熟度评价研究[D]. 南京:南京农业大学,2011.

[15] ZUCCONI F,PERA A,FORTE M,et al. Evaluating toxicity of immature compost[J]. Biocycle,1981,22(2):54－57.

[16] 于子旋,杨静静,王语嫣,等. 畜禽粪便堆肥的理化腐熟指标及其红外光谱[J]. 应用生态学报,2016,27(6):2015－2023.

[17] 朱凤香,王卫平,杨友坤,等. 固体废弃物堆肥的腐熟度评价指标[J]. 浙江农业科学,2010(1):159－163.

[18] 胡克伟,贾冬艳,郝长红,等. 猪粪堆腐对不同种子发芽指数的影响[J]. 北方园艺,2011(7):45－47.