

## 不同碳氮比下猪粪高温堆肥腐熟进程研究

朱磊<sup>1</sup>, 关文义<sup>1</sup>, 程谦勋<sup>1</sup>, 朱佳<sup>1</sup>, 李孝良<sup>2</sup>, 乔策策<sup>2</sup>, 刘健健<sup>2</sup>, 赵建荣<sup>2</sup>, 武艳<sup>1\*</sup>

(1. 安徽国祯环保科技有限公司, 安徽合肥 230000; 2. 安徽科技学院, 安徽凤阳 233100)

**摘要** [目的]有效处理养猪场养殖粪污,建立高效猪粪堆肥工艺。[方法]通过工厂原位高温好氧堆肥试验,以猪粪为主料,以蘑菇渣、木屑为辅料,设置C/N分别为15.0(堆体1)、25.5(堆体2)、34.9(堆体3)的堆肥处理,研究不同碳氮比高温好氧堆肥过程中关键理化指标的变化。[结果]堆体2的温度最高。堆肥结束时各处理pH均符合国家有机肥标准,且堆体2和堆体3显著大于堆体1。堆肥起始C/N逐步减小,至堆肥结束时,各处理C/N分别13.3、16.6和20.5。堆肥结束时各处理总磷、总钾含量比堆肥初始分别增加。3个堆体中,堆体2和堆体3的发芽指数高于堆体1,表明其具有更高的腐熟度。[结论]猪粪与蘑菇渣、木屑高温堆肥能有效处理猪场养殖废弃物,且C/N为25.5时堆肥效果最佳。

**关键词** 猪粪;碳氮比;高温好氧堆肥;堆肥腐熟度

中图分类号 S141.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)22-0062-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.22.016



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on the Decomposing Process of Pig Manure High Temperature Composting under Different Carbon and Nitrogen Ratios

ZHU Lei, GUAN Wen-yi, CHENG Qian-xun et al (Anhui Guozhen Sanitation Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230000)

**Abstract** [Objective] To effectively treat pig farm manure and establish a high-efficiency pig manure composting process. [Method] Through the factory in-situ high-temperature aerobic composting test, pig manure was used as the main material, mushroom residue and sawdust were used as auxiliary materials, and the C/N values were set at 15.0 (pile 1), 25.5 (pile 2) and 34.9 (pile 3), respectively. The changes of key physical and chemical indicators during high-temperature aerobic composting with different carbon-nitrogen ratios were studied. [Result] Pile 2 had the highest temperature. At the end of composting, the pH of each treatment conformed to the national organic fertilizer standard, and the pile 2 and pile 3 were significantly larger than pile 1. The initial C/N of composting gradually decreased, and at the end of composting, the C/N of each treatment was 13.3, 16.6 and 20.5 respectively. At the end of composting, the contents of total phosphorus and total potassium in each treatment were higher than those at the beginning of composting. Among the three piles, the germination index of piles 2 and 3 was higher than that of piles 1, indicating that they had higher maturity. [Conclusion] High temperature composting of pig manure, mushroom residue and sawdust can effectively treat pig farm waste, and the composting effect was the best when C/N was 25.5.

**Key words** Pig manure; C/N; High-temperature aerobic composting; Composting maturity

目前,畜禽养殖业的发展给环境造成不同程度的危害<sup>[1]</sup>。高温好氧堆肥由于发酵温度高和最终成品腐熟充分等优点<sup>[2]</sup>,是目前处理畜禽粪污使其转变为有机肥的常用方法。堆肥过程极其复杂,C/N、含氧量和堆体大小等均影响堆肥进程<sup>[3-5]</sup>。C/N为堆肥影响因素之一,C/N过低,有机物分解快易流失氮素;而C/N太高,则会限制微生物分解有机物料,导致发酵周期延长<sup>[6-7]</sup>。因此,调节C/N成为控制堆肥进程的重要方法,通常情况下,需要在堆肥原料中添加C/N较高的物料以调节C/N,如秸秆和木屑渣等。

肥料的腐熟度在一定程度上影响植物的生长潜力<sup>[8]</sup>,未腐熟的有机物料带有一定的有害物质<sup>[9]</sup>。因此,肥料安全性基本要求要保证腐熟度。但是由于不同堆肥物料理化性质差异巨大,且不同堆肥条件也会影响堆肥过程中物质的转化<sup>[10]</sup>。因此,如何加快堆肥腐熟成为研究的热点。

猪粪富含作物所需的各种营养元素及有机物质,可以作为一种重要的有机肥资源<sup>[11-13]</sup>。该研究基于不同的木屑添加比例与猪粪配制成不同碳氮比的原料,采用条垛式好氧堆肥,用具有代表性的理化指标监测堆肥进程,探究堆肥进程中关键理化性质和养分的变化,以研发猪粪和木屑为原料的

高温高效堆肥工艺,以期对有机肥料行业的发展提供有力的理论基础和依据。

## 1 材料与方法

**1.1 供试原料** 以新鲜猪粪为主料、蘑菇渣和木屑为辅料进行高温好氧堆肥。原料均由安徽鑫圣环保有限公司提供,堆肥过程在该公司工厂内(33°36'N,115°01'E)进行。堆肥原料的基本理化性质见表1。

表1 堆肥原料的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of composting raw materials

堆肥原料 Compost material	pH	总碳 TC g/kg	总氮 TN g/kg	碳氮比 C/N	含水率 Moisture content %
猪粪 Pig manure	8.2	316.1	18.6	16.9	72.2
蘑菇渣 Mushroom residue	6.5	226.2	17.3	13.0	61.8
木屑 Sawdust	7.3	419.4	1.7	239.6	38.9

## 1.2 试验方法

**1.2.1 试验设计。**试验按照猪粪、蘑菇渣和木屑质量比(DW)设置3个处理:堆体1,C/N=15.0,1:1:0;堆体2,C/N=25.5,1:1:1;堆体3,C/N=34.9,1:1:2。将新鲜的猪粪、蘑菇渣和木屑称重、混匀。3个处理分别建立长5.5 m、宽2.6 m、高1.4 m的条垛式堆体。初始含水量统一调整到60.0%左右。

**1.2.2 样品的采集与保存。**在堆肥过程中,样品的采集分别

**基金项目** 安徽省科技攻关重大专项(201903a06020001);安徽省自然科学基金项目(2108085QC126)。

**作者简介** 朱磊(1986—),男,安徽池州人,工程师,硕士,从事固废处置与资源化利用方面的研究。\*通信作者,高级工程师,硕士,从事固废污染控制工程方面的研究。

**收稿日期** 2021-08-11; **修回日期** 2021-12-22

于第 0、1、5、16、25 和 39 天进行。取完后一份保存于 4 °C 以测定含水量、pH、电导率 (EC) 和发芽指数,另一部分进行自然风干、粉碎、过筛用于测定总碳、总氮、总磷、总钾。

**1.2.3 理化性质的测定。**每天 14:00 使用水银温度计测定堆体温度,同时测定环境温度;含水量、pH、电导率 (EC)、发芽指数和总碳、总氮、总磷、总钾含量测定参考刘超等<sup>[5]</sup>的方法。

**1.3 数据分析** 使用 Microsoft Excel 对数据进行统计,用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析 (ANOVA) 分析样本之间的差异,用 Duncan 检验来比较处理间的差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

**2.1 堆肥过程中温度的变化** 从图 1 可以看出,堆体 1 的温度在 14 d 内升至 50 °C 以上,而堆体 2 和堆体 3 的温度在 5 d 内迅速升至 50 °C 以上,且其高温期持续时间更长。3 个处理在 50 °C 以上的高温期分别维持 11、29 和 29 d 后,温度开始下降。结果表明,C/N 为 25.5 和 34.9 的堆体温度上升更快且持续时间长、腐熟效果更好。

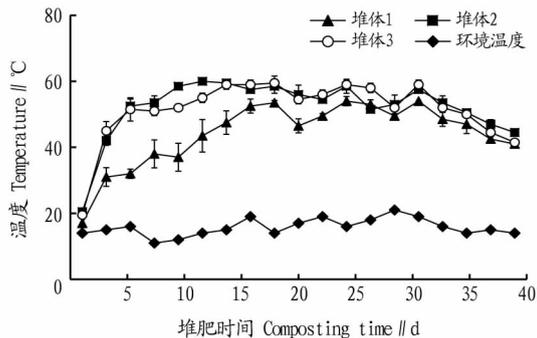


图 1 堆肥进程中温度的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of temperature during composting process

**2.2 堆肥过程中含水量的变化** 根据温度变化分别取升温

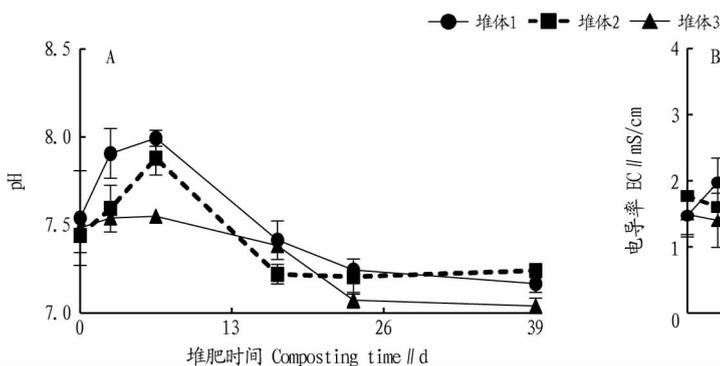


图 3 堆肥过程中 pH(A) 和电导率(B) 的动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of pH(A) and EC(B) during composting process

**2.4 堆肥过程中总碳含量、总氮含量和碳氮比的变化** 从图 4 可以看出,堆肥起始阶段 3 个堆体总碳含量分别为 27.7%、33.8% 和 36.5%,随后逐渐下降,至堆肥结束时,总碳含量分别减少至 18.3%、24.9% 和 27.3%。3 个堆体的总氮含量在堆肥升温期都呈下降趋势;各处理中,堆体 1 的下降幅度比堆体 2 和堆体 3 大;其中堆体 1 从堆肥初始的 1.73% 下降至第 25 天的 1.35%,随后继续下降至 1.32%;而堆体 2 和堆体 3 的

期(第 0 天、第 1 天)、高温期(第 5 天、第 16 天)和降温期(第 25 天、第 39 天)共 6 d 的样品。从图 2 可以看出,堆肥过程中各处理含水量均逐渐下降,水分的损失主要是发生在高温期和降温期(第 5~39 天),而升温期的损失较少。3 个堆体的初始含水量分别为 60.4%、56.1% 和 58.4%,至堆肥结束,3 个堆体的含水量分别减少了 35.1%、49.1% 和 50.0%,即堆体 2 和堆体 3 的水分蒸发量最大。

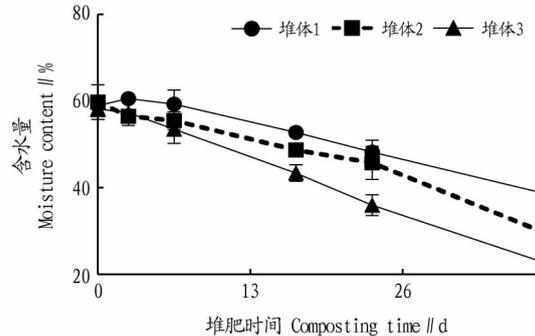


图 2 堆肥进程中含水量的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of moisture content during composting process

**2.3 堆肥过程中 pH 和 EC 的变化** 从图 3A 可以看出,堆肥进程中,3 个堆体的 pH 均呈先上升后下降的趋势,其中堆体 1 从初始的 7.54 在第 1 天迅速上升至 7.81,至堆肥结束时,下降至 7.16;而堆体 2 和堆体 3 的 pH 先缓慢上升后下降,堆肥结束时分别达到 7.26 和 7.03。

由图 3B 可知,堆肥进程中,各个处理的 EC 在堆肥升温期和高温期逐渐上升,随后趋于稳定。EC 逐渐升高可能是微生物分解有机物产生磷酸盐、铵盐等和堆体中含水量逐渐减少的结果。在堆肥后期,翻堆过程和含水量减少会造成氨的大量挥发,最终导致堆体的 EC 保持稳定。

总氮含量分别下降至第 16 天的 1.33% 和 1.19%,之后保持稳定。在堆肥后期,随着堆体中有机物的消耗和水分的散失,总干物质重量的下降幅度与总氮含量下降幅度保持平衡,从而出现总氮含量相对平衡的现象。

从图 5 可以看出,3 个堆体的 C/N 呈逐渐减小的趋势,其中在堆肥 16 d 前下降较多,而后逐渐保持稳定。由于在堆肥初始 2 个堆体添加了不同量的木屑,堆体 2 和堆体 3 的初

始 C/N 分别为 25.5 和 34.9。堆肥结束时 3 个堆体的 C/N 分别降至 14.3、18.4 和 21.3,且堆体 3 的下降幅度明显高于堆体

1 和堆体 2。

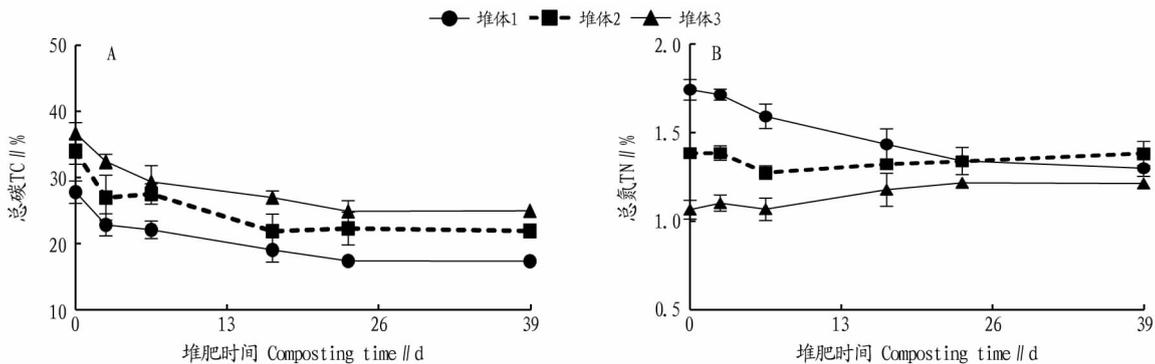


图4 堆肥进程中总碳和总氮的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of total carbon and total nitrogen during the composting process

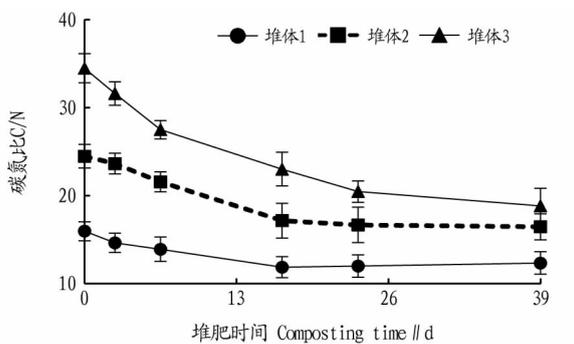


图5 堆肥过程中碳氮比的动态变化

Fig.5 Dynamic changes of C/N during the composting process

2.5 堆肥过程中总磷和总钾含量的变化 从图6可以看出, 3个堆体中总磷含量在堆肥进程中均呈上升趋势,堆体2

和堆体3的总磷含量分别由1.28%、1.21%升高至1.55%、1.46%;堆体1中总磷的初始含量为1.43%,随后出现波动,堆肥结束时总磷含量升至1.77%。总钾含量在堆肥过程中呈上升趋势;堆肥结束时,3个堆体的总钾含量相对初始含量分别增加了11.41%、15.53%和25.02%。由于堆肥效率不同,堆体2和堆体3总钾上升含量明显高于堆体1。

2.6 堆肥过程中发芽指数的变化 从图7可以看出,在堆肥初期发芽指数没有明显差异。堆肥进程中,各个处理的发芽指数呈上升的趋势,其中在堆肥初期上升缓慢,而进入高温期后则迅速升高。堆体2和堆体3在第25天后的发芽指数均为80%以上,表明达到腐熟标准;而堆体1至堆肥结束时才达到腐熟标准。3个堆体中,堆体2和堆体3比堆体1先达到腐熟,且发芽指数高于堆体1,表明其具有更高的腐熟度。

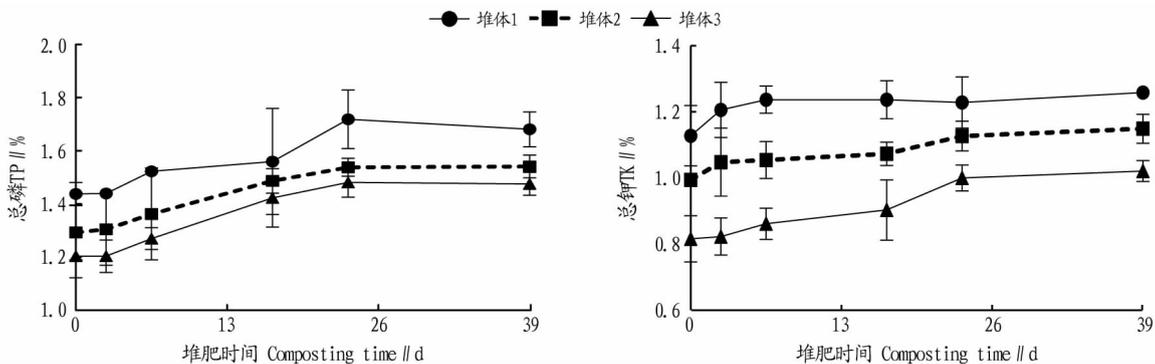


图6 堆肥过程中的总磷和总钾的动态变化

Fig.6 Dynamic changes of total phosphorus and total potassium during composting

### 3 讨论与结论

在畜禽粪便无害化处理中,高温是优质堆肥的一个必要条件。该试验中各处理温度均能达到50℃以上并维持超过10d,这说明3个堆体均达到腐熟和无害化处理的要求<sup>[14]</sup>。堆肥升温期,微生物首先利用堆体中的糖、蛋白质等易降解利用的物质产生热量使堆体升温<sup>[15]</sup>,堆体2和堆体3的升温速度快于堆体1,该试验的研究结果与何惠霞等<sup>[16]</sup>的研究结果类似。由此可见,高温好氧堆肥中,C/N为25.5和34.9的

堆体温度上升更高且持续时间长、腐熟效果更好。

水分的散失与温度和微生物代谢活动存在一定的正相关,说明堆体2和堆体3能让微生物更好地进行生理代谢活动<sup>[17]</sup>。堆肥结束时各处理的pH均在7.04~7.24,黄炎<sup>[18]</sup>研究表明pH为6.9~9.1时堆肥微生物活性较高。因此,各个处理均满足高温好氧堆肥对pH的要求<sup>[19]</sup>。堆肥过程中的电导率变化表明微生物在堆肥过程中同化利用了堆体中的离子,且堆体2的微生物活动更活跃。

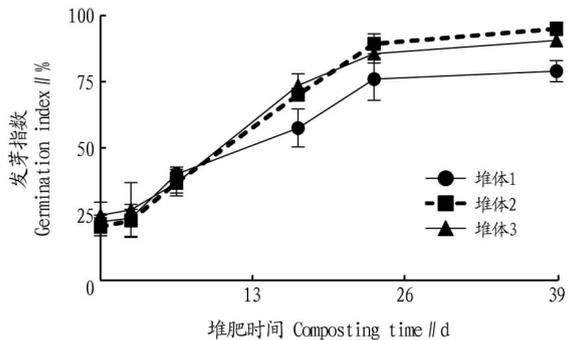


图7 堆肥进程中发芽指数的动态变化

Fig.7 Dynamic changes of germination index during composting process

该研究中,堆肥起始阶段3个堆体总碳含量逐渐下降至堆肥结束。这是因为堆肥是微生物利用碳源而使原料逐渐腐熟的过程,微生物能够利用堆体中蛋白质和糖等物质,产生 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 以及热量<sup>[20]</sup>。堆肥过程中,部分氮以 $\text{NH}_3$ 的形式挥发的速率高于总干物质损失的速率,从而使堆体总氮含量不断减少<sup>[21]</sup>。该试验中各处理的C/N均逐渐下降,这与赵建荣等<sup>[22]</sup>的研究结果一致,这是由于堆肥微生物代谢活动消耗大量碳水化合物所致。普遍认为堆肥腐熟标准要求堆肥产品C/N降为20以下。因此,3个堆体均达到腐熟条件。堆肥结束时,3个处理堆肥总磷和总钾含量比堆肥初始均有所增加,这是由于堆肥的总干物质质量下降所致。按照农业部行业标准NY 525—2021《有机肥料》,堆体1和堆体2处理符合养分标准。

有机肥料发芽指数大于70%是堆肥腐熟比较客观的标准<sup>[23]</sup>。该研究中3个堆体在堆肥结束时发芽指数均大于85%,说明3个堆体均已是腐熟状态,而相对于堆体1,堆体2的腐熟效果较好。综上所述,合适的碳氮比(25~35)可以提高堆肥效率。

## 参考文献

[1] 曹云,常志州,黄红英,等. 畜禽粪便堆肥前期理化及微生物性状研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2198-2207.

- [2] 石娜娜. 高温好氧堆肥腐熟度的评价体系[J]. 农业与技术, 2016, 36(14): 25.
- [3] 王秀红,李欣欣,史向远,等. 好氧堆肥微生物代谢多样性及其细菌群落结构[J]. 环境科学研究, 2018, 31(8): 1457-1463.
- [4] 刘佳,李婉,许修宏,等. 接种纤维素降解菌对牛粪堆肥微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3073-3081.
- [5] 刘超,王若斐,操一凡,等. 不同碳氮比下牛粪高温堆肥腐熟进程研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 662-668.
- [6] 马迪,赵兰坡. 禽畜粪便堆肥化过程中碳氮比的变化研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 193-197.
- [7] 秦莉,沈玉君,李国学,等. 不同C/N比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2668-2673.
- [8] 钱晓雅,沈根祥,黄丽华,等. 畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 549-554.
- [9] 冉祥春. 未腐熟有机肥料的危害[J]. 农业知识(致富与农资), 2015(11): 46.
- [10] 赵越,魏雨泉,李洋,等. 不同物料堆肥腐熟程度的紫外-可见光谱特性表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 961-965.
- [11] 沈中泉,袁家富. 商品性有机肥料工厂化生产研究动态[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 117-122.
- [12] 何随成,江志阳,尹微. 利用畜禽粪便生产生物有机肥、生物有机无机复混肥的研究[J]. 腐植酸, 2005(1): 16-22.
- [13] 李徽,张玉,王洪良,等. 有机肥生产与应用现状及发展建议[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(15): 122-125.
- [14] 李国学,李玉春,李彦富. 固体废物堆肥化及堆肥添加剂研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 252-256.
- [15] 谢宇新,徐凤花,王彦伟,等. 低温菌株的筛选及对堆肥温度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1436-1442.
- [16] 何惠霞,徐凤花,赵晓锋,等. 低温下牛粪接种发酵剂对堆肥温度与微生物的影响[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(1): 54-58.
- [17] 王永江,黄光群,韩鲁佳. 猪粪麦秸反应器好氧堆肥水分平衡模型研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 102-106.
- [18] 黄炎. 鸡粪生物有机肥的研制及其促生防病效果与机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [19] 李冰,王昌全,江连强,等. 有机辅料对猪粪堆肥中氨气挥发的抑制效应及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 987-993.
- [20] 王若斐,刘超,操一凡,等. 不同碳氮比猪粪堆肥及其产品肥效[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 127-134, 154.
- [21] 罗一鸣,李国学,FRANK SCHUCHARDT,等. 过磷酸钙添加剂对猪粪堆肥温室气体和氨气减排的作用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 235-242.
- [22] 赵建荣,高德才,汪建飞,等. 不同C/N下鸡粪麦秸高温堆肥腐熟过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 1014-1020.
- [23] 赵桂红,冯玉杰,李梓木,等. 通风速率对烟草废弃物好氧堆肥理化性质及种子发芽率的影响[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 177-180, 185.

(上接第61页)

区域今后应该在保护环境的基础上,充分发挥优势资源的牵引效应,提高水土资源的利用率,使之成为新的人口与经济集聚高地,发挥极化效应。

## 参考文献

- [1] CUADRA M, BJÖRKLUND J. Assessment of economic and ecological carrying capacity of agricultural crops in Nicaragua[J]. Ecological indicators, 2007, 7(1): 133-149.
- [2] SONG X M, KONG F Z, ZHAN C S. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China[J]. Water resource management, 2011, 25(3): 857-873.
- [3] 陆大道. 区域发展及其空间结构[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 54-60.
- [4] 黄宁生,匡耀求. 广东相对资源承载力与可持续发展问题[J]. 经济地理, 2000, 20(2): 52-56.
- [5] 何敏,刘友兆. 江苏省相对资源承载力与可持续发展问题研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(3): 81-85.
- [6] 孙慧,刘媛媛. 相对资源承载力模型的扩展与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 126-135.
- [7] 周文鑫,何隆华. 武汉城市圈相对资源承载力分析[J]. 国土资源科技管

- 理, 2010, 27(5): 101-107.
- [8] 桑秋,张平宇,韩凤. 辽西地区相对资源承载力与可持续发展研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(12): 21-26.
- [9] 宿学敏. 基于相对资源承载力的广东省可持续发展研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [10] 黄常锋,何伦志,刘凌. 基于相对资源承载力模型的研究[J]. 经济地理, 2010, 30(10): 1612-1618.
- [11] 周亮广,梁虹. 喀斯特地区相对水资源承载力研究: 以贵州省为例[J]. 资源科学, 2006, 28(2): 22-27.
- [12] YANG Q Y, ZHANG F W, JIANG Z C, et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China[J]. Environ earth sciences, 2015, 75(1): 1-8.
- [13] 曾红春,杨奇勇,李文军,等. 湖南省相对水资源承载力时空变化分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 69-74, 79.
- [14] 王少静. 岩溶地区土地人口承载力研究: 以百色市为例[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [15] 王海积,陈有存,石家华,等. 广西石漠化危害、治理模式与对策研究[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(15): 266-267.
- [16] 黄辛果. 贵州西部岩溶山区水土流失背景与生态环境治理对策分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2008.
- [17] 王长建,杜宏茹,张小雷,等. 塔里木河流域相对资源承载力[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2880-2893.