

# 气候变化对水稻生产影响的研究综述

曾志勇<sup>1,2</sup>

(1. 武汉学院金融与经济学院, 武汉 430212; 2. 华中农业大学经济管理学院, 武汉 430070)

**摘要:**在全球气候变化背景下,我国农业生产活动受到的影响越来越严重。本文以水稻为研究对象,从生产方式、种植制度、经营方式、结构布局等不同角度总结分析气候变化与农业活动之间的相互关系与作用机制。结果表明:现有的研究主要分析气候变化对水稻产量与水稻种植面积的影响,而水稻生产对气候变化的适应性与脆弱性几乎“无人问津”。鲜有的关于水稻生产对气候变化适应性与脆弱性的研究发现,研究时段长短的差异以及不同的区域水稻生产对气候变化的适应性与脆弱性不尽相同。因此,气候变化背景下水稻种植户的适应性行为研究将成为未来研究的主要方向,加强对这方面的研究将有助于深化与完善气候变化与水稻生产双向互动机制的研究。

**关键词:**气候变化;水稻生产;影响;研究进展

中图分类号:S511

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2021)01-0089-05

## Review on the Impact of Climate Change on Rice Production

ZENG Zhiyong<sup>1,2</sup>

(1. Department of Financial, Wuhan College, Wuhan 430212; 2. College of Economics & Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In the context of global climate change, the impact of China's agricultural production activities has been more and more serious. Taking rice as the research object, this paper summarizes and analyzes the interrelation and mechanism between climate change and agricultural activities from the perspectives of production mode, planting system, mode of operation, structure and layout. The results showed that: the existing studies mainly analyzes the impact of climate change on rice yield and rice acreage, in the field of adaptability and vulnerability of rice production to climate change, almost "nobody cares". Therefore, the research on adaptive behavior of rice growers in the context of climate change will be the main direction of future research. Strengthening research in these fields will help deepen and perfect the mechanism of two-way interaction between climate change and agriculture.

**Key words:** Climate change; Rice production; Influences; Research progress

自20世纪中后期以来,气候变化问题一直是全球的话题。关于气候变化的研究也越来越多,其研究已经远超出大气科学研究范畴,涉及到社会经济科学的方方面面。特别是在我国,气候变化与农业生产行为关系密切,彼此之间存在相互影响和相互作用的关系。一方面,气候变化的加剧给我国粮食生产带来严峻的挑战;另一方面,我国粮食生产也积极适应气候变化并对其产生积极影响。本文以水稻为研究对象,分析气候

变化对水稻总产量、种植面积、水稻单产的影响;总结气候变化对水稻生产影响的研究成果;关于水稻生产对气候变化的适应性与脆弱性分析,进行梳理与评价,为深入开展气候变化对农业生产影响的研究和制定我国应对气候变化的农业生产政策提供经验借鉴。

## 1 气候变化对水稻生产的影响

### 1.1 气候变化对水稻产量的影响

在国外,较早开展气候变化对水稻产量影响分析的是国际水稻研究所,他们利用1978~2004年的气象和粮食生产资料,分别研究日最高气温、日最低气温以及日气温差对水稻产量的作用。研究发现,日最低气温升高在很大程度上降低水稻产量,并且实证分析出水稻产量的气温弹

收稿日期:2019-01-04

基金项目:湖北省教育厅哲学社会科学项目(19G094);武汉学院校级科学研究重点项目(KYZ201907);武汉学院校级科研创新团队(KYT201807)

作者简介:曾志勇(1985-),男,副教授,在读博士,主要从事粮食安全研究。

性系数是-0.1,但日最高气温变化对水稻产量的影响并不明确<sup>[1]</sup>。后来有学者对全球范围内1962~2004年气温变化与水稻产量之间的关系进行了系统研究,认为最高气温升高对大多数国家水稻产量产生抑制作用,将使水稻减产0.2%,日气温差的变化将对水稻产量产生负向影响<sup>[2]</sup>。随后,学者们以印度为研究对象分析得出了与之前不太一致的结论。他们认为印度1978~2008年水稻产量与最高温度呈负相关,并且最高温度每升高1℃,水稻产量降低10.4%,与最低温度的相关性并不显著<sup>[3]</sup>。在国内,林而达等最早使用CERES-Wheat(crop environment resource synthesis-Wheat)、CERES-Maize(crop environment resource synthesis-Maize)模型以及荷兰的ORYZA水稻模型模拟气候变化对水稻生产的影响,结果表明水稻减产幅度在4.7%~11.5%;气候变化对水稻产量的影响存在阶段差异性,即对早稻产量与晚稻产量的影响不同<sup>[4]</sup>,华东、华北、西北、西南、中南五个地区在1959~2007年气温变化对水稻产量影响最严重的是西北地区,影响最小的是西南地区,水稻产量的气温弹性系数排序依次为-2.5%、-2.3%、-3.2%、-1.6%、-2.6%<sup>[5-6]</sup>。研究还发现导致水稻产量变化的关键气候因素是温度与降水量<sup>[7]</sup>,我国南方地区气温变化与水稻产量呈显著的负相关关系,平均温度上升1℃,水稻产量下降2.61%~3.57%<sup>[8]</sup>,这充分说明在生产函数模型中加入气候因子,可以提高模型研究假设的合理性和模拟结果的精确性。

## 1.2 气候变化对水稻种植布局的影响

### 1.2.1 气候变化对水稻种植面积的影响

气候变化对水稻种植布局的影响是通过水稻种植面积、种植时间、种植制度三个方面表现的。澳大利亚水稻种植面积的变化情况选用AP-SIM作物模拟模型作为量化工具,分析发现未来气候变化将使澳大利亚水稻种植面积增加约250千公顷,种植区域将由南向北移动<sup>[9]</sup>;研究表明气温升高对南半球水稻种植面积的影响比北半球更严重,从而导致在全球范围内水稻种植界限由南向北移动,并且气候变化对水稻种植制度的影响也存在区域差异性;陕西省近45年的气候与水稻产量变化资料表明,冬季气温变化对陕西省水稻种植面积的影响要大于夏季气温变化,总体而言水稻种植界限在气温升高的条件下将北移<sup>[10]</sup>,这也意味着气温升高对水稻种植面积的影响存在显著的区域差异性;此外,还有学者专门研究黑龙江省水稻种

植面积与气候变化的关系,结论基本上与国内外其他学者的观点不谋而合,即水稻种植面积的增加主要是气温升高的结果<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 气候变化对水稻种植制度的影响

我国南方地区气候变化对水稻种植制度界限的影响,与1981年以前对比发现,南方一年一熟和一年二熟地区界限变化不明显,但面积有所缩小,而一年三熟地区面积扩大,且气候变化使得南方地区多熟种植界限向北和向西推进<sup>[12]</sup>;我国华中地区水稻种植界限的变化情况表明,在未来气候情景下到2020年华中地区水稻种植区域将会向武汉-郑州-成都一线移动<sup>[13]</sup>;东北地区辽宁省气候变化对水稻种植制度的影响表明,导致水稻种植界限移动的气候因子不仅有气温的变化还有降水量的变动,气温升高与降水量增加将共同导致水稻种植界限的北移<sup>[14-15]</sup>,这一结论比前人的更新且更为精确。

## 1.3 气候变化对水稻单产的影响

在不同的气候变化情境下,利用农作物模拟模型,对我国水稻、玉米、小麦等主要粮食作物未来的产量状况进行预测分析,结果表明,如果考虑到气温升高的情况,到2030年、2040年、2070年三个不同时间段,三种主要粮食作物的单产水平都会上升,但是如果考虑气温升高的情形,三种主要粮食作物的单产水平将呈现下降的趋势<sup>[16]</sup>。福建省水稻生产在CERES-Rice模型预测中表明2030~2050年气候变化将会缩短水稻生长期,并且水稻单产水平也会降低;然而使用同样的方法对东北地区水稻生产进行分析时,却得到不一样的结论,东北地区水稻单产水平不仅没有降低反而提高,并且东北地区水稻单产的提升主要得益于气温上升<sup>[17]</sup>。

## 2 水稻生产对气候变化的适应性

### 2.1 不同方法下水稻生产对气候变化的适应性

国内外学者主要运用计量经济模型分析水稻生产对气候变化的适应性,运用最多的还是逐步回归模型<sup>[18]</sup>。最早研究水稻种植户气候变化适应行为的是Kurukulas和Mendelsohn,他们选用多元Logistic模型分析影响水稻种植户气候变化适应行为的因素;Nhernachena和Hassan通过多元Probit模型研究了这一问题。无论是多元Probit模型还是多元Logistic模型,都存在样本选择的时间偏差问题。因此,后来的学者都利用逐步回归模型分析农户的气候变化适应行为与措施。Maddison

以南非地区为研究样本,通过两步回归模型分析农户采取适应气候变化行为的决策过程。研究认为水稻种植户采取适应气候变化的措施不是一蹴而就的,而是循序渐进完成的,只有感知到气候变化的存在,才能采取相应的适应行为与措施,这是一个渐进的过程<sup>[19]</sup>。

研究发现水稻种植户主要通过加大投入力度、完善农业基础设施、改变传统的耕地利用方式、合理利用水资源、提高利用效率、更换水稻品种、改变水稻种植的管理模式等有效行为适应气候变化<sup>[20]</sup>。基于农户微观数据,运用 Heckman-Probit 两步模型对农户适应行为及影响因素进行实证分析,结果表明大部分水稻种植户都感知到气候变化的存在,但是实证数据分析显示只有一半的种植户在感知到气候变化后采取了相应的措施以适应水稻生产,并且指出水稻种植户是否采取气候变化适应行为受到诸多因素的制约,其中种植户年龄、文化程度等是主要影响因素,而种植户获取信息的便利程度、气象服务设施等与适应气候变化行为之间的关系并不太显著;通过空间面板数据模型实证分析我国水稻主产区种植户的气候变化适应行为与措施,研究发现水稻种植户都主动采取适应气候变化行为,特别是在极端气候事件发生之后,影响气候变化适应行为的不仅取决于种植户自身,还受到政府宏观管理的制约,但是目前政府管理这方面是气候变化适应行为效果的薄弱环节<sup>[21]</sup>。

## 2.2 不同时段水稻生产对气候变化的适应性

探讨水稻生产对气候变化适应性措施正成为当前学术界最为活跃的研究领域之一。无论是水稻生产者、经营管理者还是从事水稻研究的相关科研工作者,在全球范围内都已经展开了一场关于水稻生产适应气候变化行为的研究与争论。根

据研究时段长短的差异对主要的文献进行了归纳整理(见表1)。

由表1可知,关于水稻生产对气候变化适应性的研究时段长短并不一致,较短的研究时段得出的结论是“被动适应”,即水稻种植户是被动地接受气候变化所带来的结果;而较长的研究时段得出的结论是“主动适应”,即水稻种植户会主动采取适应性行为与措施以减少气候变化的影响。

以2000~2007年的气候变化与粮食生产资料为依据,就粮食生产系统对气候变化的响应性进行预测分析,表明在短期内粮食生产系统只能被动地适应气候变化,在长期内粮食生产系统对气候变化的适应能力将大大提高,即粮食生产系统对气候变化的响应性由于研究时段长短不一致而存在差异;通过构建经济-气候模型,实证分析1978~2007年我国南方地区水稻生产对气候变化的适应行为与措施,发现在研究时段足够长的前提条件下,水稻种植户会主动采取措施以适应气候变化,适应气候变化行为与措施的效果受到诸多因素的影响。分析进一步指出西南、华南、华东、华中等地区水稻生产对气候变化的适应能力并不一致,适应效果也存在差异。根据对相关文献的对比分析,发现水稻种植户对气候变化的适应行为是一个渐进的过程,在短期内首先感知到气候变化,在长期内才会主动采取措施适应气候变化,从短期感知气候变化到长期适应气候变化需要一段时期的转换,即水稻生产对气候变化的适应性由于研究时段长短不一致而存在差异。

通过分析1981~2007年水稻生育期气候变化对水稻产量的影响,评估水稻生产对气候变化的适应性与敏感性,结果表明我国水稻生产对气候变化的适应性与敏感性存在研究时段长短差异与区域位置差异,较长的研究时段适应气候变化能力要强于较短的研究时段,水稻生产对不同气候因子变化的适应性与敏感性也不尽相同,在此基础上,进一步分析发现不同区域水稻生产对气候变化的适应性也不一致,北方地区水稻生产对气候变化的适应性要优于南方地区。此外,水稻种植户采取适应气候变化的行为与措施受到诸多因素的影响,水稻品种差异是关键性的因素。

## 3 水稻生产对气候变化的脆弱性

当前学者们开始把脆弱性研究方法应用于农业生产活动中,现阶段主要通过神经网络模型、案例研究法、统计分析法、实地调查法等手段分

表1 不同研究时段水稻生产对气候变化的适应性

作者	研究起止时间	研究时段	研究区域	研究结论
张瑜洁 <sup>[22]</sup>	2007~2008	1年	江苏省	被动适应
谢立勇 <sup>[23]</sup>	2000~2007	7年	全国	被动适应
周文魁 <sup>[24]</sup>	1978~2005	27年	全国	主动适应
周曙东 <sup>[25]</sup>	1978~2007	29年	南方地区	主动适应
杨修 <sup>[26]</sup>	1961~1990	29年	全国	主动适应
朱珠 <sup>[27]</sup>	1980~2008	28年	江苏省	主动适应
朱红根	1978~2007	29年	江西省	主动适应
熊伟 <sup>[28]</sup>	1981~2007	26年	全国	主动适应
谢云 <sup>[29]</sup>	1949~1996	47年	全国	主动适应
张卫建 <sup>[30]</sup>	1970~2009	39年	东北地区	主动适应

析农业生产活动对于气候变化的脆弱性。在不同的历史时期,我国学者分析农业生产对气候变化的脆弱性所采取的研究方法不尽相同。在早期,实地调查法与统计分析法运用的比较普遍,后期随着作物模型与经济计量模型以及气候情景模型的出现,综合模型评估法成为当前研究水稻生产对气候变化脆弱性的主要方法<sup>[31-32]</sup>。我国陕北地区农业生产活动划分不同的层次,根据实际情况进行实地调查分析,发现陕甘宁地区以及黄土高原一带农业生产行为受气候变化的影响比较严重,即该地区属于气候变化敏感区与脆弱区。通过搜集大量的水稻生产与气象数据,根据统计回归函数模型,得出我国水稻生产对气候变化的敏感度与脆弱度,据此将我国水稻主产区对于气候变化脆弱程度的不同进行水稻脆弱区的划分;在此基础上借助GIS地理分析工具精确计算出不同水稻生产对气候变化脆弱性影响因子的权重<sup>[33]</sup>。

随着农作物模拟模型与气候情景模型的大量出现,对于水稻生产对气候变化脆弱性的分析逐渐开始采用模型模拟方法与案例相似分析法,比较典型的代表是朱红根、周曙东等人。他们选取江西省作为研究案例,将水稻产量与气温、降水量等气候变量作为技术参数,结合农作物模拟模型和气候情景模型构建水稻生产对气候变化脆弱性的综合分析模型,将江西省水稻生产区划分为不同的气候变化敏感区与脆弱区。结果表明,江西省水稻生产对气候变化的敏感性比较大,水稻生产对气候变化的脆弱性较高,处于高度气候变化脆弱区。现有文献研究结果表明水稻生产对气候变化的脆弱性主要是通过敏感性与适应性两方面体现的,并且水稻生产对气候变化的脆弱性同样存在时段差异性。

## 4 文献述评与启示

### 4.1 气候变化对农业生产影响的研究主要集中在自然科学领域,社会科学领域涉及较少

现有的关于气候变化与农业生产之间关系的研究大多数是在自然科学领域完成的,社会科学领域研究的不多,少有的研究也只是比较简单的定性分析。这主要是因为经济学家缺乏气候变化的概念,大部分学者在分析水稻产量的影响因素时,通常只将各种物质要素投入、制度因素及区域特征因素纳入经济计量模型,往往会忽略气候因子对水稻生产的影响。随着世界科技及研究水平的不断深入,气候变化对水稻生产影响的研究

方法也在不断进步,经济计量模型分析方法就是典型代表,经济计量分析模型规避了自然科学和经济学单独研究的缺陷,将气候变化研究和经济学研究相结合,能够较好地揭示出各影响因素之间的关系,从而有针对性地提出适应性对策建议。

### 4.2 水稻生产对气候变化的适应性存在研究时段长短差异性

研究表明由于研究时段较短,水稻种植户无法主动采取措施适应气候变化而只能被动适应,适应行为及其影响需要一段时期转换才能得以体现,转换期在26~30年之间,较长的研究时段水稻生产可以主动适应气候变化,在某种条件下不同区域水稻生产对气候变化的适应性也不相同。

关于水稻生产对气候变化适应性的研究,大多数学者未考虑农业的自适应能力,在运用作物模型进行模拟与评估时,由于未考虑今后品种、播期、种植制度等可能的变化,所得出的结论似乎过于悲观。整体而言,对于气候变化的适应性对策的研究尚处于分析、讨论和研制阶段,对策的分析无论是可行性还是科学性都尚显薄弱。因此,未来适应性对策的研究应以系统科学理论与科学发展观指导研究,充分考虑农业生物自适应与人工辅助适应两类适应行动的优化配置。

### 4.3 宏观层面关于水稻生产对气候变化脆弱性的研究较多,微观层面甚少涉及

现有研究发现水稻生产对气候变化的脆弱性主要通过敏感性与适应性两个方面体现,但是敏感性与适应性在分析脆弱性中所占的权重并不明确。另外,国内外学者关于水稻生产对气候变化脆弱性的研究采用了不同的研究方法,但是其研究成果却主要集中在宏观层面,甚少涉及区域层面以及微观层面。

总之,关于水稻生产对气候变化的脆弱性仍有很多疑问需要解答,比如水稻生产对气候变化的脆弱性是否存在区域差异性的特点?水稻生产对气候变化的脆弱性指标体系如何构建?如何降低水稻生产对气候变化的脆弱性?水稻种植农户将采取何种措施以适应气候变化?其影响因素有哪些?政府如何促进农户积极采取气候变化适应性行为?对这些方面问题的研究将成为未来气候变化与水稻生产互动研究的主要方向。

### 参考文献:

- [1] Rosenzweig C, Iglesias A. Implications of climate change for in-

ternational agriculture: crop modeling study[J]. Agency of US Environment Protection, 1994, 15(4): 66-73.

[ 2 ] Brown R A, Rosenberg N J. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climate factors and CO<sub>2</sub> concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 83(3-4): 171-203.

[ 3 ] Schlenker W, Roberts M J. Nonlinear effects of weather on corn yields[J]. review of Agricultural Economics, 2006, 28(3): 391-398.

[ 4 ] 韩芳玉,张俊彪,程琳琳,等.气候变化对中国水稻产量及其区域差异性的影响[J].生态与农村环境学报,2019,35(3):283-289.

[ 5 ] 周文魁.气候变化对我国水稻生产的影响及科技应对措施[J].江西农业学报,2014,26(9):75-79.

[ 6 ] 刘婷婷,王立群,王 辉,等.大气CO<sub>2</sub>浓度对水稻食味品质的影响[J].东北农业科学,2017,42(2):49-52.

[ 7 ] 吴海燕.东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应[J].农业资源与环境学报,2014,31(4):299-307.

[ 8 ] 朱红根,周曙东.南方水稻对气候变化的脆弱性分析—以江西为例[J].农业现代化研究,2010,31(2):208-211.

[ 9 ] Reyenga P J, oeden S M, Meinke H,et al. Global change impacts on wheat production along an environmental gradient in South Australia[J]. Environment International, 2001(27): 195-200.

[ 10 ] 王丽妍,杨成林,徐惠风.氮肥运筹对寒地水稻生长及产量的影响[J].东北农业科学,2017,42(5):15-19.

[ 11 ] 王 萍,李秀芬,姜丽霞,等.气候变化背景下黑龙江省主栽作物稳产类型区划[J].东北农业科学,2019,44(4):85-88.

[ 12 ] 赵 锦,杨晓光,刘志娟,等.全球气候变暖对中国种植制度可能影响II:南方地区气候要素变化特征及对种植制度界限可能影响[J].中国农业科学,2010,43(9):1860-1867.

[ 13 ] 金之庆,葛道阔,陈 华,等.全球气候变暖对我国南方水稻生产的影响[J].南京林业大学学报,1991,35(10):11-19.

[ 14 ] 郝志新,郑景云,陶向新.气候变暖背景下的冬小麦种植北界研究—以辽宁省为例[J].地理科学进展,2001,20(3):254-261.

[ 15 ] 纪瑞鹏,班显秀,张淑杰.辽宁冬小麦北移热量资源分析及区划[J].农业现代化研究,2003,24(4):264-266.

[ 16 ] 熊 伟,林而达.中国粮食生产的综合因素分析[J].地理学报,2010,65(4):11821-11827.

[ 17 ] 江 敏.基于自适应调整的福建省水稻生产气候变化影响研究[D].福州:福建农林大学,2012.

[ 18 ] 张 露.农业对气候变化响应研究的进展与前瞻:以水稻为例[J].中国农业大学学报,2016,21(8):150-158.

[ 19 ] 邱美娟,王冬妮,王美玉,等.近几十年吉林省水稻品质气候资源变化状况[J].东北农业科学,2018,43(2):54-59.

[ 20 ] 陈 帅.气候变化对中国粮食生产的影响—基于县级面板数据的实证分析[J].中国农村经济,2016,13(5):54-59.

[ 21 ] 周 力,周曙东.极端气候事件的灾后适应能力研究—以水稻为例[J].中国人口资源与环境,2012,22(4):167-174.

[ 22 ] 张瑜洁.气候变化对南方地区水稻生长影响的试验研究[D].北京:中国农业科学院,2014.

[ 23 ] 谢立勇,李 悦.粮食生产系统对气候变化的响应:敏感性与脆弱性[J].中国人口资源与环境,2014,24(5):28-37.

[ 24 ] 周文魁.气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D].南京:南京农业大学,2012.

[ 25 ] 周曙东,朱红根.气候变化对中国南方水稻产量的经济影响及其适应策略[J].中国人口资源与环境,2010,20(10):55-63.

[ 26 ] 杨 修,孙 芳,林而达,等.我国水稻对气候变化的敏感性和脆弱性[J].自然灾害学报,2004,10(5):88-92.

[ 27 ] 朱 珠,陶福祿,娄云生,等.江苏省水稻产量对气候变化的敏感性研究—基于县级和站点尺度[J].资源科学,2013,12(5):43-57.

[ 28 ] 熊 伟,杨 婕.中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性[J].生态学报,2013,17(9):76-83.

[ 29 ] 谢 云.中国粮食生产对气候资源波动响应的敏感性分析[J].资源科学,1999,8(11):39-51.

[ 30 ] 张卫建,陈 金,徐志宇,等.东北稻作系统对气候变暖的实际响应与适应[J].中国农业科学,2012,45(7):69-78.

[ 31 ] 付莲莲.江西省气候变化的特征及其对水稻产量的贡献—基于“气候-经济”模型[J].长江流域资源与环境,2016,25(4):591-598.

[ 32 ] 孙志超,郭 琦,刘小丹,等.基于综合气候因素聚类方法的吉林省种植区域简明划分探析[J].东北农业科学,2018,43(3):13-19.

[ 33 ] 赵跃龙.全球气候变化对美国农业经济影响的再评估[J].地理翻译报,1996,15(12):88-95.

(责任编辑:王 昱)



配比研究[J].四川农业大学学报,2018,36(2):138-144.

[ 17 ] 范肖龙,文素芸,陈 佳,等.碳氮比对白三叶和小麦秸秆堆肥的肥力影响[J].西北农业学报,2018,27(9):1322-1327.

[ 18 ] 黄国锋,吴启堂,孟庆强,等.猪粪堆肥化处理的物质变化及腐熟度评价[J].华南农业大学学报,2002(3):1-4.

[ 19 ] 刘 超,徐 谓,顾文文,等.典型畜禽粪便配伍食用菌菌渣堆肥研究[J].中国农学通报,2018,34(21):84-90.

[ 20 ] Aamlid T S, Landschoot P J. Effect of spent mushroom substrate on seed germination of cool-season turfgrasses[J]. HortScience, 2007, 42(1): 161-167.

[ 21 ] Ashrafi R, Rahman M M, Jahiruddin M, et al. Quality assessment of compost prepared from spent mushroom substrate[J]. Progressive Agriculture, 2014, 25: 1-8.

[ 22 ] Gao M C, Liang F Y, Yu A, et al. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios[J]. Chemosphere, 2010, 78: 614-619.

(责任编辑:王 昱)