

朱 珠,陶福禄,娄运生. 1980—2009 年江苏省气温变化特征及水稻高温热害变化规律[J]. 江苏农业科学,2013,41(6):311—315.

# 1980—2009 年江苏省气温变化特征 及水稻高温热害变化规律

朱 珠<sup>1,2</sup>, 陶福禄<sup>2</sup>, 娄运生<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学, 江苏南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**利用江苏省 7 个农业气象站 1980—2009 年的逐日气候资料以及水稻的物候资料,采用累积距平和 Mann-Kendall 检验的方法分析江苏省近 30 年的气温变化特征及水稻高温热害的发生规律。结果表明,近 30 年来江苏省的平均气温呈显著增长趋势,并且经历了 1 次显著的波动,1993 年以后的气温增长趋势更显著。气温的增长主要集中在苏南地区,苏北地区的最高气温和平均气温的变化趋势并不明显。近 30 年来江苏省水稻生长季及开花期前后 15 d 的高温热害发生的频次都有所增加,以轻度热害为主;高温热害主要集中在苏南地区,苏北地区发生高温热害的频次较少,并且程度较轻。

**关键词:**气候趋势;累积距平;Mann-Kendall 检验;高温热害

**中图分类号:** S164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)06-0311-04

近几十年来,以气候变暖为主要特征的气候变化及其对自然、经济和人类生活产生的影响已经成为各国政府、社会和科学界共同关注的问题。气候变化制约着农业生产的可持续发展,危及粮食安全、社会稳定以及经济的可持续发展。中国农业对气候变化十分敏感,相关研究表明,气候变化已经对中国农业生产产生影响,如不采取措施,到 2030 年,中国种植业的生产能力总体上可能会下降 5%~10%,到 20 世纪后半期,中国主要农作物的产量最大可下降 37%<sup>[1]</sup>。而 Cline 等在气候变化对农业影响的国别性报告中提出,未来气候变化对中国农业的影响可能是小幅度的增产<sup>[2-3]</sup>。由于不同的研究区域内的气候变化很不一致并且十分复杂,地区性差异十分明显<sup>[4]</sup>,因此探讨全球变化背景下的区域响应将成为研究热点<sup>[5-6]</sup>。水稻作为重要的粮食作物,其生长发育同样受到气候变化的影响,中国是世界最大的水稻生产国,而江苏省作为水稻主产区之一,其水稻生产占全省粮食生产总量的 56.2%,因此水稻的安全生产较大程度上决定了全省粮食的安全生产<sup>[7]</sup>。由于江苏省的水稻关键期处于该地区一年中温度最高的夏季,并且伴随着气候变暖的趋势,极端高温频率有所增加,高温热害已成为水稻生产的主要灾害之一。短期的相对极端气候事件如果发生在作物生长季内,会使作物受到高于或低于其适宜生长界限温度的影响,发生生理障碍而造成减产,往往会给农业生产带来巨大损失。Tao 等研究了

近几十年中国水稻灾害的时空变化特征,表明中国东南部的水稻高温热害频率有所增加,而在东部和西南部的一些地区却有所下降<sup>[8]</sup>。因此本研究选取江苏省的单季稻为研究对象,采用统计的方法,着重在站点尺度上分析江苏省 1980—2009 年近 30 年气温变化的时空特征以及伴随气温升高带来的极端高温事件的发生规律,旨在为江苏省水稻高产稳产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究站点

本研究采用江苏省 7 个农业气象观测站 1980—2009 年的气象资料和 1981—2009 年的水稻(单季稻)生产资料(国家气象信息中心提供),包括生育期、产量和田间管理等,研究江苏省近 30 年的气温变化特征以及水稻高温热害的发生规律。为提高数据可靠性,剔除了年份资料丢失和数据量太少的站点,最终选取江苏省赣榆、徐州、淮安、兴化、镇江、宜兴、昆山 7 个农业气象站的水稻资料和逐日气象资料作为研究对象,站点的选择代表了江苏省由北到南的不同地理纬度和气候条件。全省的年均气温约为  $(15.3 \pm 0.6)^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 气象因子的累积距平** 累积距平<sup>[9]</sup>是一种能够较直观判断变化趋势的方法。对于气候序列,其某一时刻的累积距平表示为:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}), t = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

式中:  $x_i$  表示第  $i$  年气象因子  $x$  所对应的值。累积距平曲线呈上升趋势,表示距平值增加;反之则表示距平值减小。

**1.2.2 Mann-Kendall (M-K) 检验** M-K 趋势检验法<sup>[9]</sup>常用于气候要素、水文数据的突变检验,是一种非参数统计检验方法,主要用来检验温度、降水等时间序列资料的长期变化

收稿日期:2012-12-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:41001057);中国科学院战略性先导科技专项(编号:XDA05090308)。

作者简介:朱 珠(1988—),女,江苏南京人,硕士,主要从事农业气象方面的研究。E-mail: zhuzzzhu@yeah.net。

通信作者:陶福禄,研究员,主要从事生态系统、全球变化生态学和农林气象方面的研究。E-mail: taofl@igsnrr.ac.cn。娄运生,男,教授,主要从事全球变化与农田生态系统碳氮循环方面的研究。E-mail: yslou@nuist.edu.cn。

趋势。主要检验方法是根据 2 个统计量 UFK 和 UBK。若 UFK 或 UBK 的值小于 0,则表明序列呈下降趋势;若 UFK 或 UBK 的值大于 0,则表明序列呈上升趋势。当序列值超过临界值时,则表明上升或下降趋势超过了显著性检验水平,超过临界值的范围表示为出现突变的时间区域。如果 UFK 和 UBK 2 条曲线有交点出现,且交点在临界线之间,那么交点所对应的时刻则是突变开始的时间。其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不会受到少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算较简便,因此在趋势分析中得到了较为广泛的应用。

1.2.3 高温热害的频次及程度 根据江苏省 7 个农业气象站在 1981—2009 年的逐日气象资料,分别选取水稻生长季及开花期前后 15 d 的逐日气象资料,将 3 d 日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为江苏省高温热害的气象学指标<sup>[10]</sup>,详见表 1,以此分析近 30 年来江苏省水稻生长季及开花期间高温热害发生的频次和程度。

表 1 高温热害程度指标			
高温热害程度	日最高气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	日平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	持续时间 (d)
轻	$\geq 35$	$\geq 30$	3~4
中	$\geq 35$	$\geq 30$	5~7
重	$\geq 35$	$\geq 30$	$\geq 8$

2 结果与分析

2.1 平均气温的累积距平及 M-K 检验

江苏省近 30 年的平均气温在  $14.1\sim 16.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,增长趋势显著,达到了  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$  ( $P<0.01$ ),其中最低气温的增长趋势较最高气温的增长趋势更显著,说明江苏省平均气温的升高主要是由于最低气温的升高。由图 1-a 看出,近 30 年来江苏省年平均气温的累积距平基本为负值,并且经历了一次显著的波动:从 1980—1993 年,平均气温呈下降趋势,1993 年左右开始又呈上升趋势。由图 1-b 的江苏省年平均气温的 M-K 检验图看出,UFK 曲线值 $>0$ ,所以近 30 年来江苏省的气温呈上升趋势,尤其在 1993 年左右以后上升趋势显

著,UFK 统计量超过了 0.05 的显著性水平;1993 年以前的变化趋势不显著,1993 年左右的 UFK 和 UBK 曲线出现交点并且在临界值之间,因此突变的时间在 1993 年左右,这与累积距平的分析结果一致。

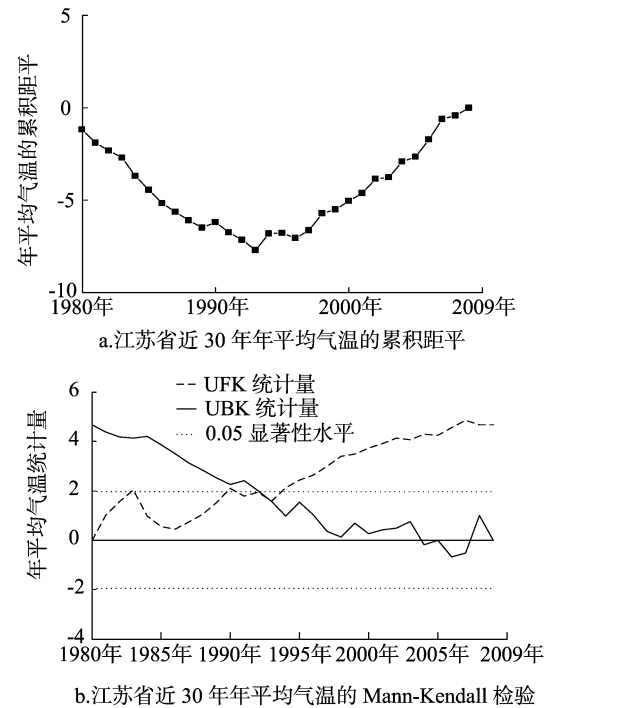


图1 江苏省近 30 年年平均气温的累积距平及 Mann-Kendall 检验

2.2 水稻全生育期间气温变化的空间分布

江苏省近 30 年来水稻全生育期内的平均气温呈上升趋势,其中在苏南地区(镇江站、宜兴站、昆山站)呈极显著的增长趋势( $P<0.01$ ),在苏北地区的增长趋势并不明显。最低气温在除淮安外的所有研究站点均呈极显著增长趋势( $P<0.01$ );而最高气温的变化趋势在苏南、苏北地区的差异较大,其中位于苏南地区的镇江、宜兴、昆山等研究站点的最高气温呈极显著的增长趋势( $P<0.01$ ),位于苏北地区的徐州、淮安研究站点呈现降低趋势,但均未达到显著水平(表 2)。

表 2 江苏省 7 个农业气象站的气温变化趋势								
站点	经度	纬度	最低气温		最高气温		平均气温	
			趋势 ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ )	$P$	趋势 ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ )	$P$	趋势 ( $^{\circ}\text{C}/10\text{ 年}$ )	$P$
赣榆	119.07°E	34.50°N	0.4 **	0.01	0.0	0.88	0.2	0.17
徐州	117.09°E	34.17°N	0.5 **	0.00	-0.1	0.59	0.2	0.25
淮安	119.02°E	33.36°N	0.2	0.15	-0.1	0.67	0.0	0.90
兴化	120.19°E	32.52°N	0.4 **	0.00	0.2	0.31	0.3	0.05
镇江	119.28°E	32.11°N	0.3 **	0.02	0.6 **	0.00	0.4 **	0.01
宜兴	119.29°E	31.26°N	0.7 **	0.00	0.6 **	0.00	0.6 **	0.00
昆山	120.26°E	31.04°N	0.8 **	0.00	0.8 **	0.00	0.8 **	0.00

注:数据后标注“\*”、“\*\*”者分别表示变化趋势显著( $P<0.05$ )、极显著( $P<0.01$ )。

2.3 水稻发生高温热害的时间变化特征

水稻生长对夏季的高温非常敏感<sup>[11]</sup>,水稻高温热害是指水稻在孕穗至扬花期遇到  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的持续高温,使水稻花器发育不良、花粉管伸长,导致水稻不能受精并影响正常的开花

结实,造成空秕率上升而导致减产<sup>[12]</sup>。大量研究表明,水稻开花期对高温最敏感,因此本研究分别分析了水稻生长季和开花期前后 15 d 发生高温热害的频次和程度<sup>[13-15]</sup>。图 2 显示,江苏省水稻生长季发生高温热害的频次有增长的趋势,近

30 年来高温热害频次最多的发生在 1994 年;1994 年后的热害发生频次较 1994 年前的多(其中主要以轻度热害的增加为主,重度热害很少发生)。近 30 年发生高温热害次数的平均值约为 0.9 次/年,几乎每年都会发生 1 次,而在开花期前后 15 d 发生高温热害的频次较小,尤其在 1981—1990 年几乎没发生过高温热害;但随着气温的升高,近 10 年开花期前后 15 d 发生高温热害的频次有所增加,其中在 2003 年达到最高。

#### 2.4 水稻全生育期高温热害频次和程度的空间分布

由图 3 可以看出,江苏省水稻生长季内的高温热害主要集中在苏南地区,镇江、宜兴、昆山站发生高温热害的频次超过了 10 次/10 年,即在整个水稻生长季每年都会经历 1 次高温热害;而苏北地区发生高温热害较少,频次几乎不超过 5 次/10 年(本研究将江苏省主要分为苏南和苏北,未探讨苏中)。根据对江苏省水稻生长季发生高温热害的程度分析,

发现苏南地区轻度热害达到了 3~6 次/10 年,中度热害为 2~4 次/10 年,重度热害为 1~2 次/10 年;而苏北地区发生高温热害的频次相对较少并且主要以轻度热害为主,约 3 次/10 年,发生中度和重度热害的频次较少。

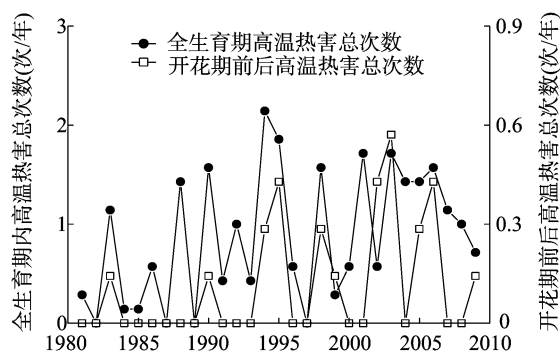


图2 江苏省水稻生长季和开花期发生高温热害次数的时间变化

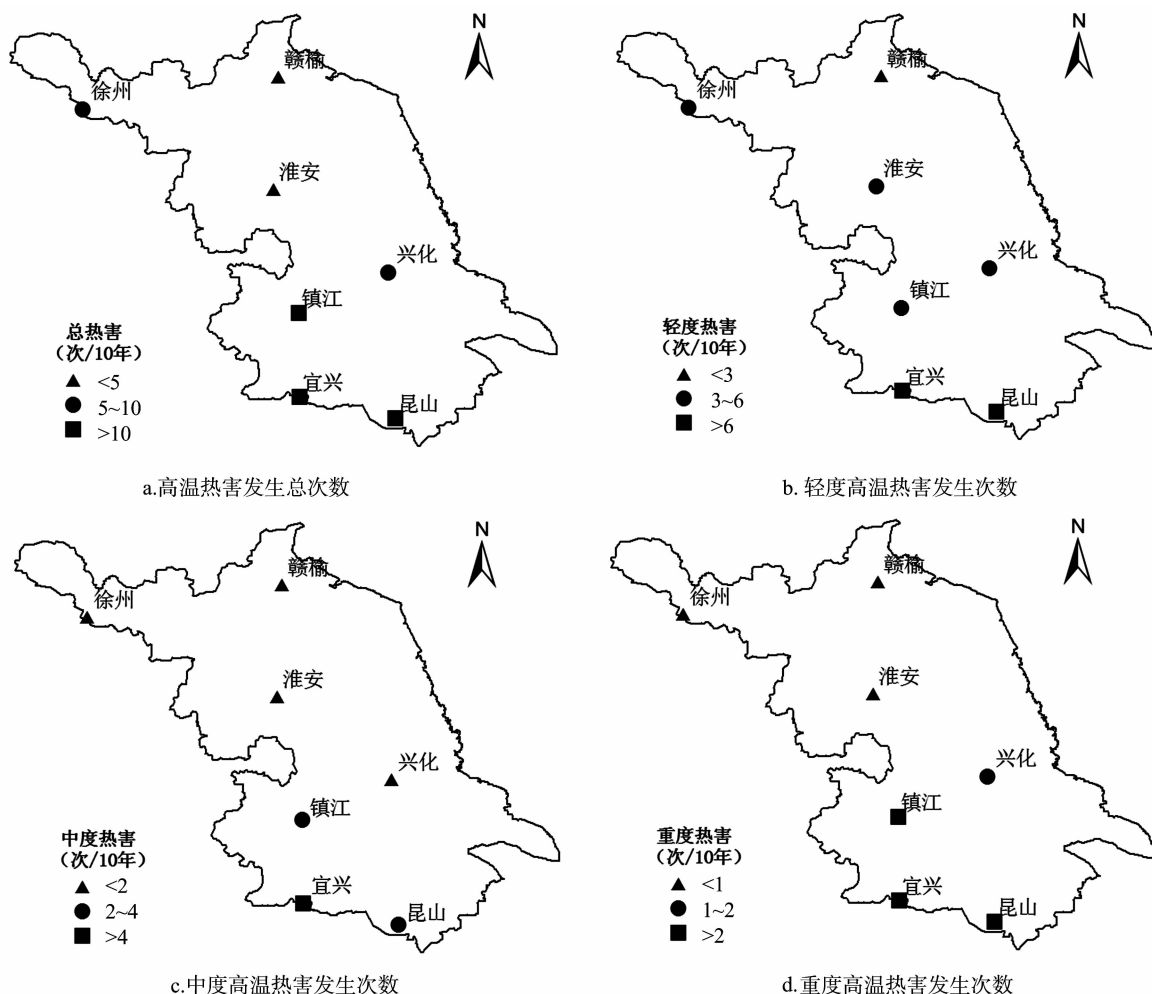


图3 江苏省水稻全生育期高温热害频次的空间分布

#### 2.5 水稻开花期高温热害频次和程度的空间分布

由图 4 可以看出,水稻开花期前后 15 d 发生热害的频次较少,苏南地区为 1~2 次/10 年,其中宜兴站超过了 2 次/10 年,而苏北地区很少发生且频次不超过 1 次/10 年。根据对水稻开花期前后 15 d 发生高温热害的程度进行分析,发现在此时期主要表现为轻度热害,中度、重度热害发生的频次较

少;大部分地区发生轻度高温热害的频次为 1~1.5 次/10 年,其中徐州、淮安站发生的频次不超过 1 次/10 年;中度热害仅宜兴站的发生频次约为 1 次/10 年,在其他站点均不足 1 次/10 年;重度热害在水稻开花期前后 15 d 很少发生,所有地区都不超过 0.5 次/10 年。

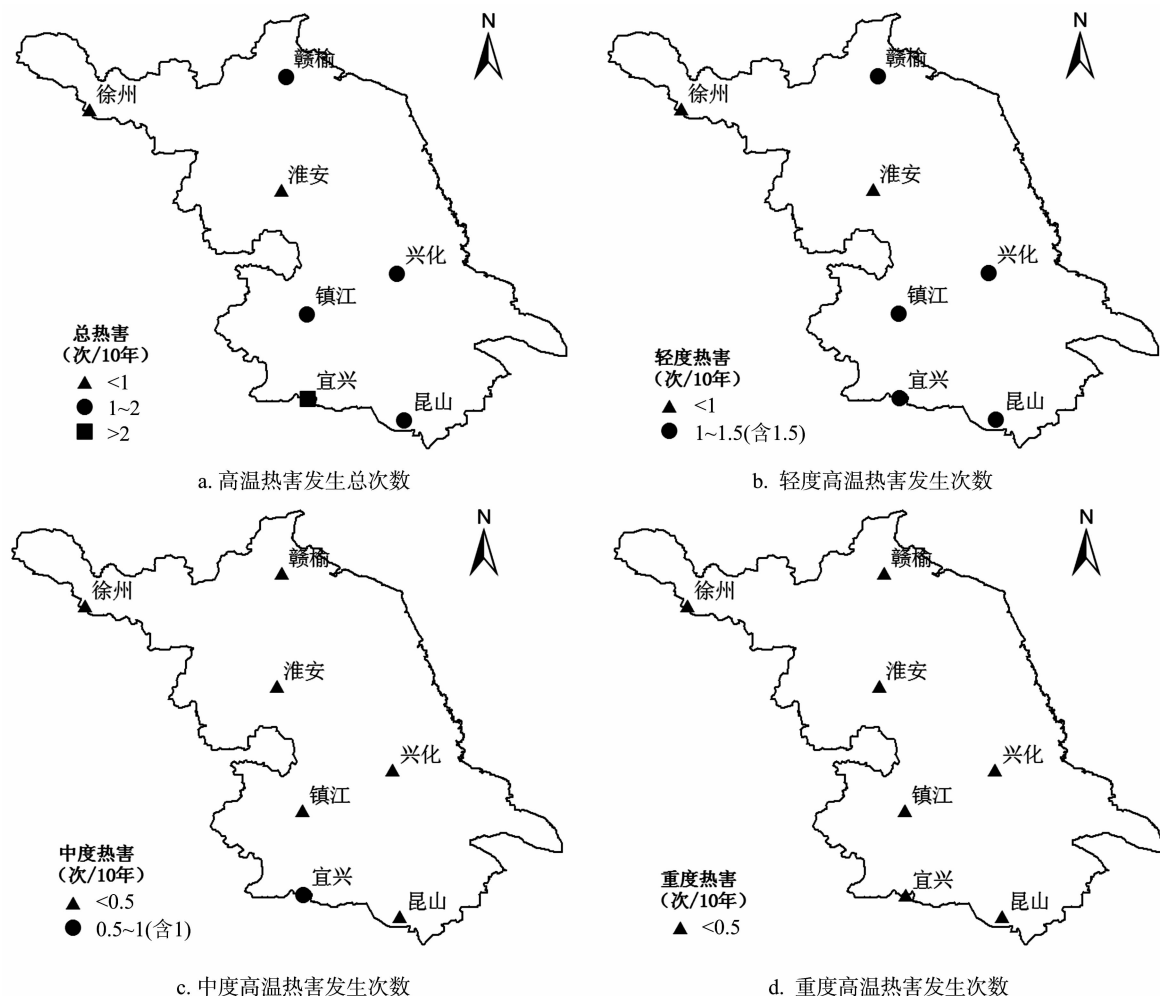


图4 江苏省水稻开花期前后 15 d 高温热害频次的空间分布

### 3 结论与讨论

江苏省近 30 年的平均气温变化显示,江苏省总体平均气温呈上升趋势。通过累积距平和 M-K 检验可知,江苏省总体平均气温在 1993 年左右发生突变,在 1993 年后气温增长趋势更显著。

江苏省近 30 年水稻全生育期内的气温呈显著增长趋势,但苏南苏北地区的表现存在差异,其中气温显著升高主要集中在苏南地区,苏北地区的最低气温上升趋势显著,而最高气温和平均气温的变化趋势不明显。

江苏省水稻生育期内总高温热害频次有缓慢增加的趋势,主要以轻度热害的增加为主,重度热害很少发生,且主要体现在苏南地区,苏北地区发生高温热害的频次相对较少并且程度较轻,近 30 年来高温热害频次最多的发生在 1994 年,而 1994 年后热害的频次较 1994 年前多。开花期前后 15 d 发生热害的频次较少,并且程度较轻,重度热害几乎没有。

本研究关于江苏省气温变化的特征与包云轩等的研究结果<sup>[10]</sup>较一致,但气温的增长趋势较包云轩等的研究结果大,可能由于时间及站点的不同导致分析结果的差异。高温热害指标是研究高温热害发生规律的一个重要参数,指标的选取不同必然导致分析结果的差异。任义方等把连续 3 d 日平均

气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 、连续 3 d 日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 70% 以下的高温天气作为水稻的热害指标<sup>[16]</sup>。包云轩等将江苏省水稻的高温热害指标定为日平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 和日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 连续出现 3 d 及以上<sup>[10]</sup>。但水稻高温热害是一个较复杂的过程,它受多方面因素的影响,如地形因素、种植制度、水稻品种及病虫害等方面,同时农业管理措施在一定程度上也会增加或减少灾害的发生,而本研究仅根据气温和水稻生育期的资料来进行分析,具有一定的局限性,因此未来的研究应结合田间试验、水稻生理分析等方面,从而更全面地分析水稻高温热害的机理,为减轻江苏省水稻的高温热害提供依据。

### 参考文献:

- [1] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等. 气候变化国家评估报告(Ⅱ):气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展,2006,2(2):51-56.
- [2] Cline W R. Global warming and agriculture, impact estimates by county[M]. Washington D C: Center for Global Development, Peterson Institute for International Economics,2007: 1-186.
- [3] 潘根兴,高 民,胡国华,等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(9):1698-1706.
- [4] 张秀年,严华生,郭世昌. “全球变暖”背景下的全球温度时空变化特征[J]. 热带气象学报,2004,20(5):561-570.

王冰冰,曹文平,张雁秋,等. 不同 pH 值条件下 3 种不同碳源释碳效果的比较[J]. 江苏农业科学,2013,41(6):315-317.

# 不同 pH 值条件下 3 种不同碳源释碳效果的比较

王冰冰<sup>1</sup>,曹文平<sup>2</sup>,张雁秋<sup>1</sup>,许强<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学江苏省资源环境信息工程重点实验室,江苏徐州 221116; 2. 徐州工程学院环境工程学院,江苏徐州 221111)

**摘要:**通过静态有机碳释放的研究方法,在温度为 $(27 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 值为 6.5、7.0、7.5、8.0 的情况下,对比研究了稻秆、海藻酸钠包埋稻草末球、海藻酸钠包埋稻秆球 3 种不同碳源的释碳规律和释碳效果(以 COD 值计)。结果表明:海藻酸钠包埋稻秆球的释碳效果最好,在 pH 值为 7.0 时,168 h 内碳源释放量为  $368 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{L})$ ;稻秆的释碳效果最差,碳源释放量最高仅为  $95 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{L})$ ;pH 值的变化对稻秆和海藻酸钠包埋稻草末球的释碳效果影响很小,但是对海藻酸钠包埋稻秆球的影响很大。对结果的进一步分析认为:由于海藻酸钠包埋稻秆球中混入了微生物,微生物的活动大大增强了难降解纤维物质的分解作用,同时包埋作用使其氧气浓度扩散受阻而呈厌氧状态,从而利于纤维素分解菌的工作,所以其释碳效果好于稻秆和海藻酸钠包埋稻草末球;因为微生物的活动易受外界因素影响,所以 pH 值的变化对海藻酸钠包埋稻秆球的释碳效果影响较大。

**关键词:**碳源;释碳效果;海藻酸钠包埋;稻草

**中图分类号:** S216.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2013)06-0315-03

依据生物反硝化理论,碳源是异养反硝化的必需物质,而碳源材料的释碳效果直接影响反硝化反应的效果,因此碳源物质的选择尤为重要。目前的外加碳源可大致分为两类:一是以低分子有机物和糖类作为液体碳源,又被称为传统碳源;二是可持续充当碳源的富含纤维素物质和人工合成的可降解的高分子有机物,也叫新型碳源。其中富含纤维素物质由于取材广阔、经济廉价等优势而被广泛关注,因此成为反硝化外加碳源的研究热点,如稻壳<sup>[1]</sup>、棉花<sup>[2]</sup>、竹子<sup>[3]</sup>、木屑<sup>[4]</sup>等。富含纤维素物质不仅可以充当反硝化作用的碳源物质,而且

还可以作为微生物的载体,为微生物提供一个稳定的环境。目前已有不少研究表明:以富含纤维素的固体有机物作为反硝化碳源,可以获得很好的硝酸盐去除效果<sup>[5-14]</sup>。以富含纤维素物质作为载体和碳源时,其碳源释放量存在先快后慢的特点,从而也存在碳源供给的先多后少等问题,因此导致以下问题:(1)初期因碳源量过大而污染水体;(2)后期因碳源枯竭而使反硝化效果受阻。目前富含纤维素物质的碳源释放量和碳源释放规律以及碳源释放的调控方法成为研究的重点和难点。本研究以稻秆、海藻酸钠包埋稻草末球和海藻酸钠包埋稻秆球作为备选碳源材料,采用静态有机碳释放的方式,以单位质量稻秆(末)释放的化学需氧量(COD 值)作为有机碳释放的衡量指标,评价备选碳源的释碳效果。通过对相同物质(稻草)的 3 种不同碳源形式的释碳效果和特征进行分析,为稻草物质释碳效果分析和调控提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

稻草取自徐州工程学院附近的村庄,将稻草去叶并保留

发生规律及其对产量的影响[J]. 中国农业气象,2012,33(2):289-296.

[11] 姚凤梅,张佳华. 1981—2000 年水稻生长季相对极端高温事件及其气候风险的变化[J]. 自然灾害学报,2009,18(4):37-42.

[12] 杨太明,陈金华. 江淮之间夏季高温热害对水稻生长的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(27):8530-8531.

[13] 柳军,岳伟,邓斌. 江淮地区一季稻高温热害指标及其特征研究[J]. 农业灾害研究,2011,1(1):63-66.

[14] 汤日圣,郑建初,张大栋,等. 高温对不同水稻品种花粉活力及籽粒结实的影响[J]. 江苏农业学报,2006,22(4):369-373.

[15] 谢晓金,李映雪,李秉柏,等. 高温胁迫下水稻产量的光谱估测研究[J]. 中国水稻科学,2010,24(2):196-202.

[16] 任义方,高苹,王春乙. 江苏高温热害对水稻的影响及成因分析[J]. 自然灾害学报,2010,19(5):101-107.

收稿日期:2012-11-06

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(编号:2012DXS02);住房与城乡建设部科技计划(编号:2012-K7-14);江苏省自然科学基金(编号:BK2011201);徐州工程学院创新创业基金(编号:2012119);江苏高校优势学科建设工程。

作者简介:王冰冰(1989—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程。E-mail:wbbmhm@163.com。

通信作者:张雁秋,教授,博士生导师。E-mail:yqzhang@cumt.edu.cn。

[5] 江志红,李建平,王梅华,等. 20 世纪全球温度场趋势变化的区域特征分析[J]. 气候与环境研究,2004,9(3):422-434.

[6] 周晓兰,高庆九,邓自旺,等. 江苏气温长期变化趋势及年代际变化空间差异分析[J]. 南京气象学院学报,2006,29(2):196-202.

[7] 于堃,宋静,高苹. 江苏水稻高温热害的发生规律与特征[J]. 气象科学,2010,30(4):530-533.

[8] Tao F, Zhang S, Zhang Z. Changes in rice disasters across China in recent decades and the meteorological and agronomic causes[J]. Regional Environmental Change, 2012, DOI 10.1007/s10113-012-0357-7.

[9] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京:气象出版社,2008:43.

[10] 包云轩,刘维,高苹,等. 气候变暖背景下江苏省水稻热害