

商兆堂, 张旭晖, 商 舜, 等. 江苏省冬小麦生产潜力气候变化趋势评估[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 245–249.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.12.059

# 江苏省冬小麦生产潜力气候变化趋势评估

商兆堂<sup>1</sup>, 张旭晖<sup>1</sup>, 商 舜<sup>2</sup>, 吴 静<sup>3</sup>

(1. 江苏省气象局, 江苏南京 210009; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 3. 上海海洋大学, 上海 201300)

**摘要:** 气候变化背景下粮食安全问题受到世界各国政府的高度重视, 作为主要粮食作物之一的冬小麦, 随着气候变化其脆弱性增加, 给粮食安全带来了隐患。为研究处于我国黄淮和长江冬小麦主产区的江苏省冬小麦生产潜力随气候变化的趋势, 以江苏省域内气象部门观测的气象和冬小麦生育期资料为基础, 利用光温经验模型进行数值模拟分析。结果表明, 随着气候变化, 以江苏冬小麦目前生产水平下的光能利用率为 3% 计算, 江苏冬小麦单产以每年 8.84 kg/hm<sup>2</sup> 的速度下降, 引起脆弱性增加。小麦生产潜力的减少主要发生在营养生长阶段, 生殖生长阶段生产潜力略有增加, 即不利于形成足穗, 但利于形成大穗。因此, 从栽培技术研究方向上要改变以往以分蘖成穗为主的思维, 可以考虑增加基本苗, 增加主茎穗比例, 保障穗数年际间的相对稳定, 实现高产优质。

**关键词:** 冬小麦; 生产潜力; 气候变化; 评估; 粮食安全

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)12-0245-04

“国以民为本, 民以食为天”。1976 年联合国粮食及农业组织 (food and agriculture organization, 简称 FAO) 在第一次世界粮食首脑会议上首次提出“食物安全”的概念, 粮食安全问题成为世界热点话题。我国是世界人口大国, 随着人们生活水平的提高, 对保障粮食安全提出了更高的要求。因此, Yang 等学者认为, 全世界都关注我国粮食安全问题<sup>[1-3]</sup>。宋小青等研究认为, 农民种粮积极性是影响粮食安全的关键因素<sup>[4]</sup>。在 CCICCD (China National Committee for the Implementation of the United Nations Convention to Combat Desertification) 中 Bronw 研究认为, 在国家政策和土地数量一定的前提下, 充分挖掘生产潜力是提高粮食产量的可行办法<sup>[5]</sup>。因此, 在现有政策和技术水平下, 如何充分利用农业生产潜能, 提高粮食产量和品质成为人们关注的热点。联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 简称 IPCC) 评估报告 (第 1~5 次) 让人们认识到近 50 年气候有增暖现象, 气候变化对粮食安全构成危害<sup>[6-11]</sup>。因此, 研究气候变化对粮食安全的影响成为人们研究应对气候变化的重点领域之一。粮食作物中小麦、水稻、玉米的产量占粮食总产量的 50% 以上, 2015 年全世界小麦产量达到  $7.18 \times 10^8$  t, 且 80% 以上可以食用。因此, 研究气候变化对小麦生产的影响成为研究粮食安全的重要内容之一。吕佳佳等研究认为, 随着气候变化, 小麦生产的脆弱性增加<sup>[12-19]</sup>。如何应对气候变化引起的冬小麦生产脆弱性增加问题, 许多学者也作了探索, 如孙芳等研究认为, 可以通过改良品种、合理栽培等技术措施来抑制冬小麦生产随气候变化脆弱性增加的趋势<sup>[20]</sup>。还有不少学者从气象防灾减灾的角

度提出应对措施, 如周曙东等提出通过人工措施改变冬小麦的生长环境来减轻气候变化对冬小麦生产的影响<sup>[21]</sup>。因此, 科学利用当地的气候资源潜力, 合理安排冬小麦生产, 是减轻冬小麦生产随气候变化脆弱性增加, 实现高产稳产的有效措施之一。

随着精细化数值预报产品和农业栽培精细化技术的发展, 作物生产潜力评估与作物生产发育微环境对其影响的监测评估有机结合, 为农业生产和管理者提供综合性监测、预报预测、评估、生产对策建议等的农用天气预报服务成为农业气象服务业务的发展趋势<sup>[22]</sup>。据此, 以江苏省域内国家基本气象观测站观测的资料为基础, 对江苏冬小麦生产潜力的气候变化趋势进行分析, 以期科学应对气候变化, 实现冬小麦的稳定生产提供参考信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 基本资料

以光温生产模型为基础进行冬小麦生产潜力计算, 日照和温度资料来自江苏省域内具有代表性的 39 个站点观测的气象记录月报表。辐射资料为淮安、吕泗、南京等 3 个站点的实测资料, 其他站点数据由淮安、吕泗、南京、济宁、莒县、合肥、上海、杭州、宝山、慈溪等 10 个观测辐射站点的观测资料通过数值模拟获取。具体资料由江苏省气象信息中心提供。

冬小麦生育期资料来源于江苏省域内的 10 个气象物候观测站的作物观测年报表。具体资料由江苏省气象信息中心提供。

### 1.2 资料处理

目前, 气象部门的气象服务业务体系中, 作物生长发育方面的农业气候资源评估是以旬为单位的, 因此, 生育期资料统计以旬为单位, 分别为上旬、中旬、下旬。据中国气象局的《农业气象观测规范 (上卷)》<sup>[23]</sup> (1993 年), 将冬小麦划分成 12 个生育期, 根据江苏省 10 个气象物候观测站 1980—2011 年观测资料统计得出小麦各生育期时段划分的时间, 具体见

收稿日期: 2016-12-23

基金项目: 江苏省气象局 2016 年重点业务项目 (编号: 20161122)。

作者简介: 商兆堂 (1961—), 男, 江苏盐城人, 博士, 研究员, 高级工程师, 主要从事应用气象业务研究与管理工。Tel: (025) 83287054; E-mail: zhaotangshangchina@126.com。

表 1。

根据江苏省的气候、地理特征,将江苏省分成全省、苏北、苏中、苏南等 4 个主要区域类型,统计分析区域特征(图 1)。

表 1 江苏省冬麦生育时段划分

序号	生育期	时间
1	播种期—出苗期	10 月下旬
2	出苗期—三叶期	11 月上旬
3	三叶期—分蘖期	11 月中旬至下旬
4	分蘖期—越冬期	12 月上旬至下旬
5	越冬期—返青期	1 月上旬至 2 月上旬
6	返青期—起身期	2 月中旬至下旬
7	起身期—拔节期	3 月上旬至中旬
8	拔节期—孕穗期	3 月下旬至 4 月上旬
9	孕穗期—抽穗期	4 月中旬
10	抽穗期—开花期	4 月下旬
11	开花期—乳熟期	5 月上旬至中旬
12	乳熟期—成熟期	5 月下旬

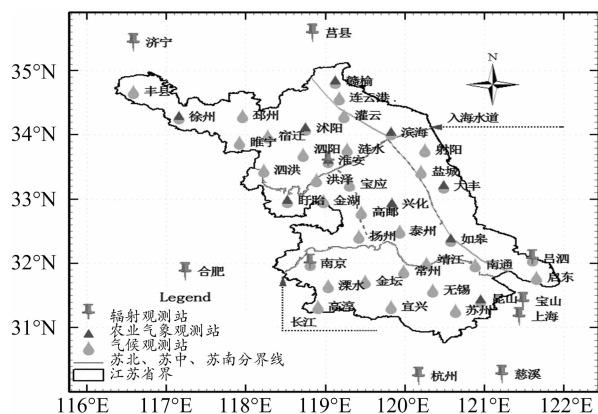


图 1 气象和冬小麦资料试验观测点

## 2 结果与分析

### 2.1 生产潜力计算模型

冬小麦生产潜力计算主要是通过机制模型和经验模型来实现的,由于冬小麦生长发育过程机制的复杂性,目前,全世界还没有一个让大家认同投入业务运行的机制模型,因此采用经验模型。谷冬艳等系统分析国内外的经验方法后认为,目前主要有光合生产潜力、光温生产潜力、气候生产潜力等 3 种模型<sup>[24]</sup>。赖荣生等综合分析认为,光温生产潜力是在其他条件处于理想状态下,仅有光温影响的产量,即产量的理论上限<sup>[25]</sup>。本研究主要研究以变暖为主要特征的气候变化对冬小麦生产潜力的影响,因此,利用这种模型对江苏省冬小麦生产潜力进行计算分析。计算公式为

$$WPRT = WPC \times F(t). \quad (1)$$

式中:WPRT 表示冬小麦光温生产潜力;WPC 为光合生产潜力; $F(t)$  为温度影响系数。

陈浩等研究认为,光合生产潜力可用公式(2)进行计算<sup>[26]</sup>。

$$WPC = \frac{10^8 \times F \times Q \times E}{10^3 \times C}. \quad (2)$$

式中: $F$  为光能利用率,Loomis 等研究认为,光能利用率的理论上限为 5%~6%<sup>[27]</sup>;李继由研究认为,生产管理水平较高

的地区,光能利用率可达到 3% 左右,江苏省冬小麦生产管理水居全国中上等,因此  $F = 3\%$ <sup>[28]</sup>。 $E$  为经济系数,李白鸽研究认为,江苏江淮地区小麦经济系数一般取 0.4,即  $E = 0.4$ <sup>[29]</sup>。 $C$  为能量转换系数,取值为 18.75 kJ/g。 $Q$  为太阳总辐射能(MJ/m<sup>2</sup>),买苗等研究认为,只有日照时数观测的站点采用公式(3)进行计算,其中, $Q_0$  为天文辐射值; $S$  为日照百分率(%); $a$  和  $b$  为系数<sup>[30]</sup>。利用济宁、昌县、合肥、杭州、慈溪、上海、宝山、淮安、吕泗、南京等 10 个站点的实际观测辐射值,采用线性回归方法计算出各月的  $a$ 、 $b$  值,并采用反距离权重法插值获得江苏省域内  $a$ 、 $b$  空间分布,得到江苏域内所有气象观测站点的  $a$ 、 $b$  系数。

$$Q = Q_0(a + b \times S). \quad (3)$$

喜凉作物的  $F(t)$  可用公式(4)进行计算<sup>[29]</sup>。

$$F(t) = \begin{cases} 0 & T \leq 3 \\ \frac{T-3}{17} & 3 < T < 20 \\ 1 & T \geq 20 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T$  表示年份。

据此,由公式(1)~公式(4)可计算出各个观测站点冬小麦不同生育期的生产潜力。

### 2.2 生产潜力现状分析

利用全省 39 个站点(图 1)1961—2013 年观测资料,利用公式(1)~公式(4)计算出各站点每年各生育阶段的光温生产潜力(图 2)。

由图 2-a 可见,江苏省冬小麦全生育期光温生产潜力为 155 451.9~223 079.2 kg/hm<sup>2</sup>,总体趋势是由北向南明显减小,区域分布特征明显。全省光温生产潜力平均值为 191 769.2 kg/hm<sup>2</sup>,其中,苏北平均值为 206 144.2 kg/hm<sup>2</sup>,苏中平均值为 192 894.6 kg/hm<sup>2</sup>,苏南平均值为 172 718.5 kg/hm<sup>2</sup>,苏中仅占苏北的 93.6%,苏南仅占苏中的 89.5%。苏北北部区域为高值区域,苏北中南部到苏中中部以中东部为中心向西向东递减,苏中中南部到苏南由东向西和西南方向递减,即苏南南部、西南、西部区域数值相对较低。

由图 2-b 可知,江苏省冬小麦各生育期光温生产潜力随着生育期变化呈现高—低阶段性变化特征。最高峰在冬季,营养生长阶段明显高于生殖生长阶段。这就要求在因小麦生长期明显延长而造成冬小麦生长期明显缩短的情况下,充分利用好冬季气候资源,提高冬小麦的冬季生长量,保障全生育阶段的生长量相对稳定,实现高产优质的栽培目标。

2014 年江苏全省小麦实际单产平均为 5 372.0 kg/hm<sup>2</sup>,苏北平均值为 5 862.2 kg/hm<sup>2</sup>,苏中平均值为 5 981.0 kg/hm<sup>2</sup>,苏南平均值为 5 413.1 kg/hm<sup>2</sup>,分别占其光温生产潜力的 2.80%、2.84%、3.10%、3.13%。说明江苏冬小麦的生产现状还有增产近 1 倍的潜力,因此要研究通过改变株型结构、栽培模式等来提高冬小麦的光温利用率的实用技术,实现优质栽培。

### 2.3 气候变化趋势

2.3.1 气候变化趋势计算方法 商兆堂等研究认为,气候变化趋势常用气候倾向率(climate change rate,简称 CTR)来表示<sup>[31]</sup>。因此,WPRT 可表述成:

$$WPRT = a + b \times T. \quad (5)$$

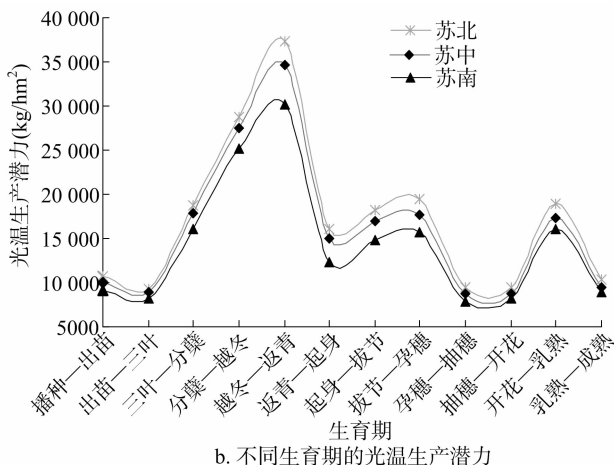
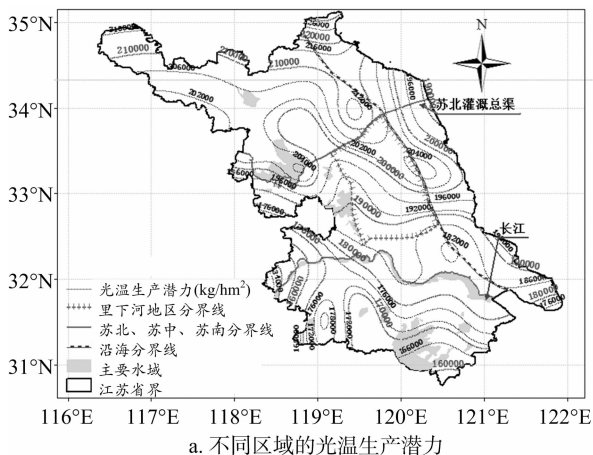


图2 江苏省冬小麦温光生产潜力分布

则:

$$CTR = 10 \times b. \quad (6)$$

式中:  $CTR$  表示未来 10 年冬小麦光温生产潜力随气候变化的改变量。由江苏省气象台站 1961—2013 年观测气象资料得出的冬小麦各生育阶段光温潜力数据从而计算出气候倾向率(图 3)。

2.3.2 气候变化趋势分析 经过统计分析以及由图 3-a 可知,江苏省冬小麦全生育期光温生产潜力的气候倾向率为  $-7\ 233.01 \sim 1\ 504.94\ \text{kg/hm}^2$ , 全省平均值为  $-2\ 679.82\ \text{kg/hm}^2$ , 其中,苏北平均值为  $-4\ 433.30\ \text{kg/hm}^2$ , 苏中平均值为  $-1\ 736.09\ \text{kg/hm}^2$ , 苏南平均值为  $-1\ 629.89\ \text{kg/hm}^2$ ; 总趋势是全省大部分区域都在减小,仅有苏中南部沿海到苏

南中部一个带状区域和苏中西部边界地区是增大区域。苏北的减少量约是苏中和苏南的 2.5 倍,而苏北是江苏省冬小麦主产区,也是全国黄淮冬小麦主产区的重要组成部分,且目前苏北的光温利用率低于苏中和苏南,因此,研究苏北应对气候变化的冬小麦栽培技术中要增加提高其光温利用率的研究内容,通过提高利用减缓快速减少带来的不利影响,保障高产稳产。

由图 3-b 可知,光温生产潜力气候倾向率减小主要发生在营养生长期,增大主要出现在生殖生长期,这种变化趋势对形成足穗是不利的,但对实现大穗是有利的,即利于提高小麦品质。郑建敏等认为,穗粒结构对产量的贡献率表现为穗数 > 粒数 > 粒质量,因此,要研究通过增加基本苗等保障足穗的栽培技术措施,实现高产优质<sup>[32]</sup>。

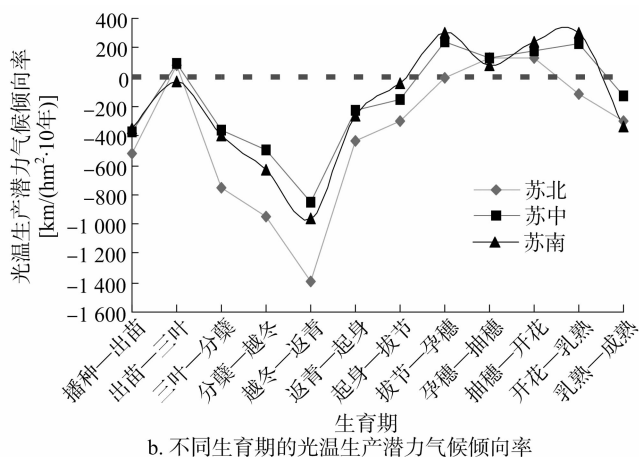
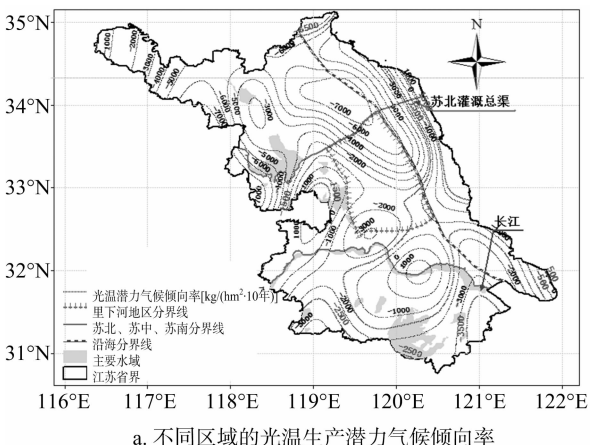


图3 江苏省冬小麦温光生产潜力气候倾向率分布

中国气象局规定,以当年产量与平均值(近 5 年)的增减百分比将年景分成丰年、平偏丰、持平略增、持平略减、平偏歉、歉年<sup>[33]</sup>。因此,用气候变化引起光温生产潜力的改变量与正常年景光温生产潜力的百分比(设为  $PER$ ,%)来评定气候变化对冬小麦光温生产潜力的影响,具体划分标准见表 2。由此计算得出的数据绘制图 4。由图 4-a 可知,除苏北中部到苏中北部有 1 个区域的光温生产潜力气候倾向率占平均值的比例  $< -3\%$  以外,其他区域均在  $-3\% \sim 3\%$  之间,即大部分区域基本持平(略增或略减),少部分区域属于平偏减。由图 4-b 可知,各生育期百分比的绝对值均小于  $5\%$ ,且绝大

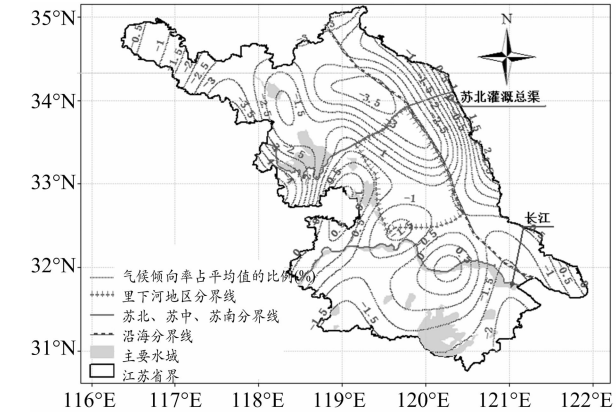
部分生育阶段的值在  $3\%$  以内。因此认为,气候变化并没有引起江苏省冬小麦生产潜力明显变化,其随气候变化范围属于正常年景间因气象条件引起的漂移。

### 3 结论与讨论

通过计算分析认为,江苏省冬小麦生育阶段的光温生产潜力随着气候变化有减小的变化趋势,但这种趋势在正常气候年景的年际间波动的范围值之内。因此,只要通过选育气候适宜性广、光能利用率高的新品种,通过适当增加播种量,提高基本苗数量,测土施肥等栽培技术措施可以减缓气候变

表 2 气候变化引起冬小麦生产潜力变化评定标准

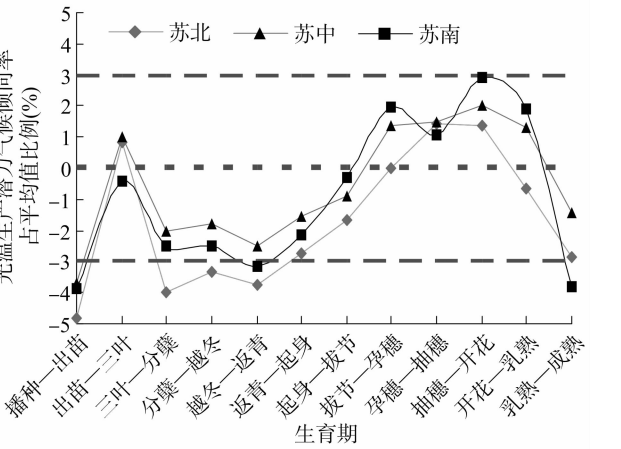
变化趋势	标准
增多	$PER \geq 5\%$
平偏多	$5\% < PER \leq 3\%$
持平略增	$3\% < PER \leq 0$
持平略减	$0 < PER \leq -3\%$
平偏减	$-3\% < PER \leq -5\%$
减少	$PER < -5\%$



a. 不同区域的光温生产潜力气候倾向率占平均值的比例

化对冬小麦生产的影响,实现高产稳定优质栽培目标。

目前,由于观测资料有限,主要表现为气象辐射资料只有部分台站观测、大部分台站靠公式推导获取等;观测气象资料在标准观测场进行,而有时田间实际环境与之相差很多,造成气象资料的代表性差。冬小麦生长发育状态主要为人工观测其生长发育期、株高、叶面积等表象资料,通过仪器观测生理生化过程没有业务化,因此,各种机制模型的运算效果并不理想,不同人建立的经验公式之间计算的生产潜力数据也有差



b. 不同生育期的光温生产潜力气候倾向率占平均值的比例

图4 江苏省冬小麦温光生产潜力气候倾向率占平均气候状态百分比分布

异,但其随气候变化的总体结论基本趋同,即冬小麦生产的脆弱性增加。因此,要加强应对冬小麦生产脆弱性增加的栽培技术措施研究,保障冬小麦的稳定生产,确保粮食安全。

参考文献:

[1] Yang H, Li X B. Cultivated land and food supply in China[J]. Land Use Policy, 2000, 17(2): 73–88.

[2] Li X B, Wang X H. Changes in agricultural land use in China: 1981–2000[J]. Asian Geographer, 2003, 22(1/2): 27–42.

[3] Lichtenberg E, Ding C R. Assessing farmland protection policy in China[J]. Land Use Policy, 2008, 25(1): 59–68.

[4] 宋小青, 欧阳竹. 1999—2007 年中国粮食安全的关键影响因素[J]. 地理学报, 2012, 67(6): 793–803.

[5] Chinese Committee for Implementation of the Convention to Combat Desertification. China country paper to combat desertification[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 18–31.

[6] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 1990: the IPCC scientific assessment[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

[7] IPCC. Climate change 1995: the science of climate change: contribution of working group I to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[8] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[9] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge:

Cambridge University Press, 2007.

[10] IPCC. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report, climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers[R/OL]. (2013–10–28) [2016–06–28]. [http://www.climatechange2013.org/images/upload/WGIAR5SPM\\_Approved27Sep2013.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/upload/WGIAR5SPM_Approved27Sep2013.pdf).

[11] IPCC. Working group contribution to the IPCC fifth assessment report(AR5). Climate change 2013: the physical science basis. final draft underlying scientific–technical assessment[R/OL]. (2013–10–28) [2016–06–28]. [http://www.climatechange2013.org/images/upload/WGIAR5\\_WGI-12Doc2b\\_FinalDraft\\_All.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/upload/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_All.pdf).

[12] 吕佳佳, 吴建国. 气候变化对植物及植被分布的影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(6): 85–95.

[13] 余卫东, 陈怀亮. 河南省优质小麦精细化农业气候区划研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 381–385.

[14] 李祚君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(2): 123–129.

[15] 李祚君, 梁宏, 王培娟. 气候变暖对华北冬小麦种植界限及生育期的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 382–388.

[16] Lu C H, Fan L. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 98–105.

[17] Wilcox J, Makowski D. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 180–190.

[18] Johnen T, Boettcher U, Kage H. An analysis of factors determining spatial variable grain yield of winter wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 52(B): 297–306.

[19] Talukder A S M H M, McDonald G K, Gill G S. Effect of short-term heat stress prior to flowering and early grain set on the grain

谢 靖,陈 蕾,成家杨,等. 生长条件对耐高氮磷青萍淀粉和蛋白质积累的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(12):249-253.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.12.060

# 生长条件对耐高氮磷青萍淀粉和蛋白质积累的影响

谢 靖,陈 蕾,成家杨,唐 杰

(北京大学深圳研究生院,广东深圳 518055)

**摘要:**以 1 株耐高浓度氮磷青萍 5508 (*Lemna aequinoctialis* 5508) 为研究对象,考察不同生长条件对其相对生长率、淀粉和蛋白质积累的影响。结果表明,温度、初始密度、pH 值、总氮及总磷含量对青萍的生物量积累、淀粉和蛋白质含量有显著影响。正交试验结果表明,相对生长率在温度 25 ℃、初始密度 30%、pH 值 5.5、总氮含量 100 mg/L、总磷含量 20 mg/L 的条件下达到最优;淀粉含量在温度 15 ℃、初始密度 70%、pH 值 9.5、总氮含量 150 mg/L、总磷含量为 5 mg/L 的条件下达到最优;蛋白质含量在温度 15 ℃、初始密度 10%、pH 值 3.5、总氮含量 200 mg/L、总磷含量 20 mg/L 的条件下达到最优。这些研究结果为进一步利用青萍进行淀粉、蛋白质生产提供了一定的指导。此外,氨基酸组成及含量分析表明,青萍氨基酸结构合理,赖氨酸含量丰富,接近世界卫生组织(World Health Organization,简称 WHO)/联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,简称 FAO)推荐的理想蛋白质氨基酸模式,具有用作蛋白或饲料原料的潜力。

**关键词:**青萍;生长条件;淀粉;蛋白质;氨基酸

**中图分类号:** S184 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)12-0249-05

随着我国人口的增加和社会经济的发展,富含氮磷等废水的大量排放已经成为我国水环境污染的重要因素<sup>[1-2]</sup>。目前生活废水、养殖废水等富含氮磷废水的处理,一般采用较为传统的物理化学及生物处理方式,这些方法通过物理、化学或者微生物的作用将水中氮磷等污染物从水体中去除<sup>[3-4]</sup>,但是这个过程并没有对污水中的营养元素进行有效利用,资源没有得到有效利用,且其成本较大<sup>[5]</sup>。

水生植物在处理生活废水及养殖废水中因经济有效、资

源利用率高等特点受到各国研究者的重视<sup>[6-7]</sup>。研究者利用水生植物如水葫芦等大型水生植物处理废水,水葫芦等大型水生植物去除氮磷等污染物质效率较高,但也存在植物体积大、营养价值低且容易产生二次污染等问题<sup>[8]</sup>。浮萍作为一种繁殖速度快、适应能力强、容易回收利用的小型水生植物,在去除水体污染方面尤其是生活废水等方面有着巨大的潜力,同时浮萍可以快速积累淀粉和蛋白质等可利用的营养物质,在资源的利用方面同样具有巨大的潜力<sup>[9-10]</sup>。

淀粉、蛋白质是浮萍的主要营养成分。研究表明,在适宜的条件下浮萍的淀粉干质量含量可以高达 75%,其淀粉含量大于木薯、马铃薯等传统作物。据 Cheng 等估算,浮萍大约每年单位面积水域(1 hm<sup>2</sup>)可以积累 28 t 淀粉<sup>[11]</sup>,浮萍的干基蛋白质含量在理想条件下也可达 26.3%~45.5%<sup>[12]</sup>。但是,现有的研究对浮萍的淀粉积累和蛋白质积累研究相对比较独立<sup>[13-14]</sup>,难以综合评价生长条件对同一株浮萍的淀粉、蛋白

收稿日期:2016-12-18

基金项目:公益性行业(海洋)科研专项(编号:201305022);广东省深圳市海外高层次人才创新创业专项(编号:KCXC201405211502553)。

作者简介:谢 靖(1992—),男,安徽宣城人,硕士研究生,研究方向为生物能源工程。E-mail: xiejing@sz.pku.edu.cn。

通信作者:唐 杰,博士,助理研究员,主要从事生物质开发与利用相关研究。E-mail: tangjie@pkusz.edu.cn。

yield of wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 160: 54-63.

[20] 孙 芳,杨 修,林而达,等. 中国小麦对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 692-696.

[21] 周曙东,周文魁,林光华,等. 未来气候变化对我国粮食安全的影响[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2013, 13(1): 56-65.

[22] 商兆堂. 发展农用天气预报业务的思考[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(9): 8-10, 18.

[23] 中国气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京:气象出版社, 1993.

[24] 谷冬艳,刘建国,杨忠渠,等. 作物生产潜力模型研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 89-94.

[25] 赖荣生,余海龙,黄菊莹. 作物气候生产潜力计算模型研究述评[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 11-14.

[26] 陈 浩,罗怀良,李 勇. 气候变化对四川省盐亭县主要农作物生产潜力的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2009,

37(3): 100-104.

[27] Loomis R S, Williams W A. Maximum crop productivity: an estimate [J]. Crop Science, 1963, 3(1): 67-72.

[28] 李继由. 西藏地区光合生产潜力估算[J]. 自然资源, 1980(1): 58-62.

[29] 李白鸽. 江淮地区近 30 年农业气候资源与稻麦生产潜力的演变特征[D]. 南京:南京农业大学, 2011: 63.

[30] 买 苗,火 焰,曾 燕,等. 江苏省太阳总辐射的分布特征[J]. 气象科学, 2012, 32(3): 269-274.

[31] 商兆堂,姜 东,何 浪. 气候变化对小麦生产影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(21): 6-11.

[32] 郑建敏,李 浦,廖晓虹,等. 四川冬小麦产量构成因子初步分析[J]. 作物杂志, 2012(1): 105-108.

[33] 中国气象局. 农业气象产量预报业务质量考核办法(试行)[Z]. 2012.