

杨超臣,喻雄,冉美惠,等. 新型聚酰胺复合正渗透膜对重金属的脱除效果[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):222-225.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.054

# 新型聚酰胺复合正渗透膜对重金属的脱除效果

杨超臣<sup>1</sup>, 喻雄<sup>1</sup>, 冉美惠<sup>1</sup>, 马英<sup>1</sup>, 谷战英<sup>1</sup>, 林锡柱<sup>2</sup>, 李建安<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学经济林培育与保护教育部重点实验室, 湖南长沙 410004; 2. 株洲志恒实业有限公司, 湖南株洲 412000)

**摘要:**以新型聚酰胺复合正渗透膜的 2 种膜方位[膜的活性层朝向原料液(即 AL-FS 模式)和膜的活性层朝向汲取液(即 AL-DS 模式)]对 5 种不同的重金属原料液进行处理。结果表明,在 AL-DS 模式下各处理的正向水通量都高于在 AL-FS 模式下的,且同一重金属原液在 2 种模式下水通量差异极显著( $P < 0.01$ )。反向盐通量表现为 AL-DS 模式高于 AL-FS 模式,但只有砷、汞的反向盐通量在 2 种模式下差异显著( $P < 0.05$ )。对于同一重金属原液, $J_s/J_w$  值表现为 AL-DS 模式均低于 AL-FS 模式,且 2 种模式下的  $J_s/J_w$  值都低于 0.02。2 种模式下对汞的拦截效果都很好,拦截率分别达到 99.50% (AL-DS 模式)、90.66% (AL-FS 模式),其中以铅、砷、汞为原液时,重金属拦截率表现为 AL-DS 模式高于 AL-FS 模式,以镉、铬为原液时结果相反。

**关键词:**新型聚酰胺复合正渗透膜;不同膜朝向;AL-FS 模式;AL-DS 模式;重金属;水处理

**中图分类号:** X712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0222-03

正渗透水处理技术(forward osmosis, 简称 FO)由于其低能耗、膜污染较低、易于清洗、高截留、高水回收率等优点,获得了较好的发展空间<sup>[1]</sup>。与反渗透相比,正渗透是一个渗透驱动膜过程,利用溶液渗透压差驱动水从原料液侧透过半透膜到达驱动膜侧。正渗透优势明显,有望成为反渗透技术联合水处理的最佳辅助手段<sup>[2]</sup>。

正渗透水肥一体化灌溉技术在重金属污染地区农林生产中有重要应用前景,特别是在有较高利用价值的经济作物栽培灌溉上,正渗透处理后的汲取液可直接用于灌溉苗木,可大幅度减少农作物肥料污染,是获得绿色农产品的关键。而获得高效正渗透膜是应用这一技术的关键。近几年来,正渗透膜技术不断改进,相继出现了不同的正渗透膜<sup>[3-6]</sup>,正渗透技术又重新回归人们的视野,但是关于正渗透膜对重金属截率以及有机污染物的研究并不多。由于目前多数正渗透膜水通量不高,影响了正渗透技术的发展,复合正渗透膜因其性能良好、具有相对高的水通量等特点得到越来越多研究者的重视<sup>[7-8]</sup>。

正渗透汲取液是影响正渗透过程的另一个重要因素。在废水正渗透处理方面,有研究采用天然海水作为正渗透汲取液处理生活废水<sup>[3]</sup>,因为天然海水在滨海地区易于获得且产物水易于处理。澳大利亚悉尼科技大学的 Phuntsho 等将化肥作为正渗透过程的汲取液<sup>[9-10]</sup>,实现了水处理与农田灌溉的有机结合。

本研究采用正渗透技术,以磷酸二氢钾溶液作为汲取液,

以重金属废水作为原料液,研究新型聚酰胺复合正渗透膜对水中重金属的处理效果,以及将该技术应用于葡萄、油茶、枣树等的灌溉效果,以期为正渗透的改进、正渗透在重金属污染地区的灌溉用水净化及正渗透水肥一体化灌溉的应用提供一定的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

正渗透水处理设备,由西安皓海嘉水处理科技有限责任公司生产;新型聚酰胺复合正渗透膜,由中国海洋大学研制(聚酰胺多孔支撑膜有效面积为  $0.02 \text{ m}^2$ ,支撑厚度为  $79 \text{ }\mu\text{m}$ ,膜厚度为  $96 \text{ }\mu\text{m}$ );TDS-3 笔,购自广州家贝科技有限公司;AFG 原子吸收分光光度计、PF7 原子荧光光度计,购自北京普析通用仪器有限责任公司;UV-7504c 紫外分光光度计,购自上海精密科学仪器有限公司。

### 1.2 试验原理

正渗透处理小试设备操作流程见图 1。

### 1.3 试验方法

试验于中南林业科技大学经济林育种与栽培国家林业局重点实验室进行,试验时间为 2017 年 1—5 月。分别以浓度均为  $1 \text{ mg/L}$  的汞、铬、镉、砷、铅重金属溶液作为原料液,以  $1 \text{ mol/L}$  磷酸二氢钾溶液作为汲取液并置于  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  水浴锅中,分别对聚酰胺复合膜不同朝向[膜的活性层朝向原液(即 AL-FS 模式)和膜的活性层朝向汲取液(即 AL-DS 模式)]的膜性能和重金属拦截情况进行测试。汲取液流速为  $0.4 \text{ L/min}$ ,原液流速为  $4 \text{ L/min}$ ,开启设备,每  $15 \text{ min}$  记录 1 次数据,运行 2 h 后取水样  $50 \text{ mL}$ ,装入聚乙烯瓶中,贴好标签。检测水样中的重金属含量。试验设置 3 次重复。

按照下列公式计算正向水通量、反向盐通量、 $J_s/J_w$  及  $R$ :

$$J_w = \frac{\Delta W}{\rho_w \times A \times t}$$

式中: $J_w$  为正向水通量,是  $t(\text{h})$  时间透过面积为  $A(\text{m}^2)$  的正

收稿日期:2017-10-24

基金项目:2014 年度引进国际先进林业科学技术项目(编号:2014-4-26);湖南省教育厅优秀青年科学研究项目(编号:16B278);湖南省校企合作创新创业教育基地(编号:2016-436-10)。

作者简介:杨超臣(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为经济林生态栽培与利用。E-mail:1358058246@qq.com。

通信作者:李建安,博士,教授,博士生导师,研究方向为经济林生态经营。E-mail:lja0731@126.com。

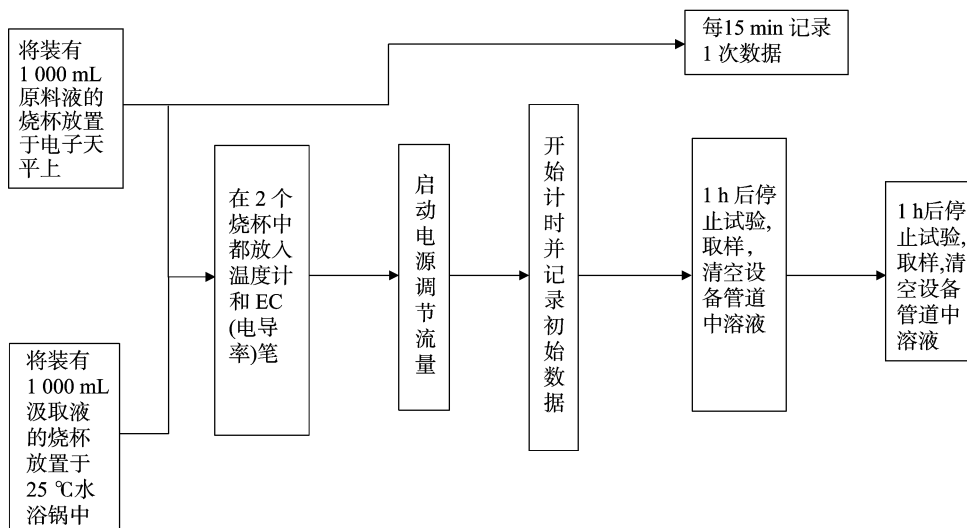


图1 正渗透处理小试设备操作流程

渗透膜的水量  $\Delta W, \text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$J_s = \frac{v_2 \cdot TDS_2 - v_1 \cdot TDS_1}{2 \cdot 721.8 \cdot (t_2 - t_1)}.$$

式中:  $J_s$  为反向盐通量,  $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $v_1$  为  $t_1$  时间原液的体积,  $\text{L}$ ;  $v_2$  为  $t_2$  时间原液的体积,  $\text{L}$ ;  $TDS_1$  为  $t_1$  时间原液的溶解性总固体浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $TDS_2$  为  $t_2$  时间原液的溶解性总固体浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $t_1$  为记录开始时间,  $\text{h}$ ;  $t_2$  为记录结束时间,  $\text{h}$ ;  $(t_2 - t_1)$  取值 30 min; 2 721.8 为毫克转化为克的系数 1 000、膜面积  $0.02 \text{ m}^2$  和磷酸二氢钾的摩尔质量  $136.09 \text{ g}/\text{mol}$  的乘积。

$J_s/J_w$  反映膜的拦截性能, 与水通量、反向盐通量相关。

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f}.$$

式中:  $R$  为重金属拦截率, %;  $C_f$  为原料液中的重金属浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $C_p$  为穿过膜的重金属浓度,  $\text{mg}/\text{L}$ 。

#### 1.4 数据处理

用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行数据整理、分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同重金属溶液作为原液在 2 种模式下的正向水通量

分别以浓度均为  $1 \text{ mg}/\text{L}$  的铅、镉、砷、汞、铬重金属溶液作为原料液, 以  $1 \text{ mol}/\text{L}$  磷酸二氢钾溶液作为汲取液, 分别在 AL-FS 和 AL-DS 模式下研究正向水通量。在相同条件下, 正向水通量越大, 正渗透水处理效果越好。由表 1 可知, 同一重金属原液在 2 种模式下的水通量差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 相较于 AL-FS 模式, AL-DS 模式下水处理效率较高, AL-DS 模式比 AL-FS 模式的水通量在铅、镉、砷、汞、铬重金属溶液作为原料液时分别提高 180.40%、88.47%、350.71%、665.57%、221.10%。AL-DS 模式下, 正向水通量大小顺序为汞 [ $53.59 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 砷 [ $44.62 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 镉 [ $19.41 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铬 [ $16.28 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铅 [ $13.83 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]。而在 AL-FS 模式下, 正向水通量大小顺序为镉 [ $10.30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 砷 [ $9.90 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 汞 [ $7.00 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铬 [ $5.07 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铅 [ $4.87 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]。2 种模式下各重金属处理的水通量大小

顺序没有遵循相同的规律。

### 2.2 不同重金属溶液作为原液在膜分别为 AL-FS 和 AL-DS 模式下的反向盐通量

根据正渗透的原理以及正向截留率公式可知, 在同等条件下, 反向盐通量越小, 正渗透水处理效果越好。由表 1 可知, 反向盐通量的 AL-DS 模式均高于 AL-FS 模式, 这与许春玲的研究结果<sup>[3]</sup>一致。同一种重金属原液, 以铅、镉、铬重金属溶液作为原液时, 在 2 种模式下反向盐通量差异不显著 ( $P < 0.05$ ), 以砷、汞重金属溶液作为原液时, 2 种模式下反向盐通量差异显著 ( $P < 0.05$ )。在 AL-DS 模式下, 反向盐通量大小顺序为砷 [ $0.223 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 汞 [ $0.198 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 镉 [ $0.153 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铅 [ $0.115 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铬 [ $0.090 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]。而在 AL-FS 模式下, 反向盐通量大小顺序为镉 [ $0.112 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 砷 [ $0.076 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铅 [ $0.060 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 铬 [ $0.037 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ] > 汞 [ $0.032 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]。2 种模式下各重金属处理的反向盐通量大小顺序没有遵循相同的规律。

### 2.3 不同重金属溶液作为原液在膜分别为 AL-FS 和 AL-DS 模式下的 $J_s/J_w$

根据正渗透的原理, 在同等条件下,  $J_s/J_w$  值越低, 效果越好。由表 1 可知, 同一重金属原液在 2 种模式下  $J_s/J_w$  值差异不显著, 但 AL-FS 模式的  $J_s/J_w$  值均高于 AL-DS 模式, 且 2 种模式下的  $J_s/J_w$  值都低于 0.02, AL-DS 模式下的  $J_s/J_w$  值全部低于 0.01。相较于 AL-FS 模式, AL-DS 模式处理效果更好, AL-DS 模式  $J_s/J_w$  值分别降低 37.19% (砷)、34.75% (铬)、31.05% (铅)、29.28% (镉)、27.59% (汞)。在 AL-FS 模式下铅和镉的  $J_s/J_w$  值相对来说最高, 分别为  $12.27 \times 10^{-3}$ 、 $11.34 \times 10^{-3}$ , 其他处理都低于 0.01。

### 2.4 不同重金属溶液作为原液在膜分别为 AL-FS 和 AL-DS 模式下的重金属拦截率

由表 1 可知, 新型聚酰胺复合正渗透膜在重金属拦截率上有极大改进, 以  $1 \text{ mg}/\text{L}$  汞溶液作为原液时, 2 种模式的拦截率都达到 90% 以上, 且 AL-DS 模式汞的拦截率达 99.50%。

表 1 不同重金属溶液作为原液在 2 种模式下的各项指标

重金属原液	模式	正向水通量 [ L/( m <sup>2</sup> · h ) ]	反向盐通量 [ mol/( m <sup>2</sup> · h ) ]	$J_s/J_w$ 值 ( × 10 <sup>-3</sup> )	重金属拦截率 ( % )
铅	AL - DS	13.83 ± 3.00DE	0.115 ± 0.011cd	8.46 ± 1.00ab	66.78 ± 8.15d
	AL - FS	4.87 ± 0.83F	0.060 ± 0.017def	12.27 ± 2.85a	55.89 ± 1.21e
镉	AL - DS	19.41 ± 1.93C	0.153 ± 0.054bc	8.02 ± 3.13ab	68.69 ± 4.19cd
	AL - FS	10.30 ± 2.20EF	0.112 ± 0.019cd	11.34 ± 3.40a	76.69 ± 0.32c
砷	AL - DS	44.62 ± 0.83B	0.223 ± 0.006a	5.00 ± 0.13b	40.25 ± 4.70f
	AL - FS	9.90 ± 1.84EF	0.076 ± 0.008def	7.96 ± 2.16ab	36.74 ± 0.49f
汞	AL - DS	53.59 ± 3.32A	0.198 ± 0.017ab	3.70 ± 0.42b	99.50 ± 0.21a
	AL - FS	7.00 ± 1.92F	0.032 ± 0.011f	5.11 ± 2.95b	90.66 ± 0.12b
铬	AL - DS	16.28 ± 4.39CD	0.090 ± 0.007de	5.05 ± 2.78b	63.16 ± 6.49de
	AL - FS	5.07 ± 1.36F	0.037 ± 0.008ef	7.74 ± 2.90ab	69.30 ± 0.40cd

注:数值为均值 ± 标准偏差;表中同列数据后不同小写、大写字母分别表示同一重金属原液在不同模式间差异显著、极显著。

对于同一重金属原液,除砷、镉、铬外,2 种模式下的重金属拦截率差异显著( $P < 0.05$ ),其中以铅、砷、汞为原液时重金属拦截率 AL - DS 模式比 AL - FS 模式分别提高 19.48%、9.55%、9.75%,但是镉却降低 10.43%,铬降低 8.86%。

3 讨论与结论

根据正渗透的原理,在相同条件下,正向水通量越大,正渗透水处理效果越好;反向盐通量越小,正渗透水处理效果越好; $J_s/J_w$  值越低,效果越好;重金属拦截率越高,处理效果越好。本研究采用新型聚酰胺复合正渗透膜提高了正向水通量,极大地提高了水处理效率,特别是 AL - DS 模式。对于同一重金属原液,尽管 AL - DS 模式下的水通量和反向盐通量高于 AL - FS 模式,但 AL - DS 模式的  $J_s/J_w$  值都低于 AL - FS 模式。新型聚酰胺复合正渗透膜在水通量上有极大改进,但是在重金属的拦截率上则总体改进不大,对于重金属的拦截率,铬、镉、砷、铅的拦截率一般,拦截最好的是汞,达到了 90% 以上,这可能是由于筛分作用,汞的水合离子直径超过了新型聚酰胺复合正渗透膜的孔径,容易拦截;也可能由于电荷排斥机制的影响,即膜表面带的电荷与重金属所带电荷相互作用,电荷排斥效应显著,起到了截留的作用<sup>[11]</sup>。也可能是新型聚酰胺复合正渗透膜对汞的拦截率较高与汞的水合离子直径较大有关。林红军等在研究正渗透膜的应用时发现,正渗透膜系统对磷酸盐、氨氮、凯氏氮的截留率分别为 99%、87%、92%<sup>[12]</sup>。重金属拦截率作为衡量膜质量的重要指标,AL - DS 模式相对于 AL - FS 模式,虽然铅、砷、汞的拦截率提高了,但镉、铬拦截率却下降了。这可能是由于渗透膜有方向性,空隙大小不一样,导致 AL - DS 模式和 AL - FS 模式下各重金属拦截率不一样。

尽管多数研究表明,AL - DS 模式下的膜污染高于 AL - FS 模式,但是也有研究发现,AL - DS 模式更好<sup>[13-17]</sup>。Zheng 等采用 FO 对水中四环素进行去除发现:正渗透膜支撑层所带的负电荷要高于活性层,AL - DS 模式下膜与带负电的四环素之间形成了排斥作用,进而提高了 AL - DS 模式下的截留率<sup>[18]</sup>。Zhao 等研究认为,当处理高污染的废水或含盐量较高的水时,膜方向应选用 AL - FS 模式,可以减少膜污染,实现稳定和高水通量的运行;反之,则采用 AL - DS 模式<sup>[15]</sup>。张高旗等研究正渗透处理生活污水对膜的污染情况

时发现,采用分离层朝向原料液(AL - FS)的膜过滤方向可以降低膜污染程度,并获得稳定的通量,长时间(144 h)的运行下膜两侧均出现不同程度的污染<sup>[19]</sup>。

综上,综合考虑 4 种指标,建议采用 AL - DS 模式以提高灌溉水处理效率。提高正渗透膜的性能是正渗透领域正在解决和有望解决的问题,这也将从根本上解决正渗透的瓶颈问题。

参考文献:

[1] Mi B X, Elimelech M. Organic fouling of forward osmosis membranes: fouling reversibility and cleaning without chemical reagents [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 348 (1/2): 337 - 345.

[2] Subramani A, Badruzzaman M, Oppenheimer J A. Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: a review [J]. Water Research, 2011, 45 (5): 1907 - 1920.

[3] 许春玲. 聚酰胺中空纤维正渗透复合膜的制备及性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.

[4] 刘蕾蕾, 王 铎, 汪 锰, 等. 三醋酸纤维素正渗透膜制备过程中影响因素的研究[J]. 膜科学与技术, 2011, 31 (1): 77 - 83.

[5] 李 刚. 正渗透膜的制备与应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.

[6] 解利听, 辛 婧, 解 奥. 三乙酸纤维素正渗透膜的制备与性能 [J]. 化工进展, 2014, 33 (10): 2700 - 2706.

[7] Chung T S, Zhang S, Wang K Y, et al. Forward osmosis processes: yesterday, today and tomorrow [J]. Desalination, 2012, 287: 78 - 81.

[8] 肖维溢, 管盼盼, 王 铎. 新型聚酰胺复合正渗透膜的制备与表征[J]. 功能材料, 2016 (增刊 1): 127 - 134.

[9] Phuntsho S, Shon H K, Hong S, et al. A novel low energy fertilizer driven forward osmosis desalination for direct fertigation: evaluating the performance of fertilizer draw solutions [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 375 (1/2): 172 - 181.

[10] Phuntsho S, Shon H K, Majeed T, et al. Blended fertilizers as draw solutions for fertilizer - drawn forward osmosis desalination [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46 (8): 4567 - 4575.

[11] 吴子焱. 无机正渗透膜的制备及去除水中的 Cd<sup>2+</sup> 效能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

[12] 林红军, 陈建荣, 陆晓峰, 等. 正渗透膜技术在水处理中的应用进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (12F): 411 - 415.

张 佩,于庚康,徐 敏,等. 2013 年持续高温对江苏省水稻生产的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):225-229.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.055

# 2013 年持续高温对江苏省水稻生产的影响

张 佩,于庚康,徐 敏,任义方,高 苹

(江苏省气象服务中心,江苏南京 210008)

**摘要:**根据江苏省 69 个气象台站 1961—2013 年 6 月下旬至 11 月上旬的常规气象资料,统计分析 2013 年水稻各生育期及高温时段的光温水特征,深入研究气象因子对水稻产量构成因素的影响。结果表明,2013 年夏季持续高温少雨对水稻生长有利有弊,虽然穗粒数、结实率、千粒质量都有所下降,但前期持续高温天气有利于水稻分蘖发生与成穗,单位有效穗数较 2012 年大幅增加,产量构成 4 因素中呈“一增三减”特点;从品种而言,生育期偏早的籼稻较粳稻受害程度更大,大面积粳稻抽穗扬花期避开了极端高温时期,产量所受影响较小;从区域而言,淮北地区的水稻生产受害程度更大。

**关键词:**2013 年;持续高温少雨;水稻;影响分析

**中图分类号:** S162.5<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)05-0225-05

水稻作为一种原产热带和亚热带的喜温作物,其各个生育阶段都有一定的适宜温度范围,当气温超过这个范围时,就不利于其生长发育,过高的温度,会对水稻的生长发育和产量、品质形成过程造成较严重的危害。关于水稻高温热害的研究,国内外已有不少<sup>[1-9]</sup>,高温可引起花而不实,这是因为高温伤害雄蕊,导致花粉失水不开裂,或破坏代谢过程,从而使花粉生活力和总量、发芽的花粉量减少,最终导致花粉不萌发或畸形,表现为空壳粒增多,结实率下降。水稻的整个生长发育过程中,高温热害对开花期、穗发育期影响程度最严重,灌浆期次之,营养生长期最小,对应的产量构成因素,则表现为对结实率影响最大,其次为每穗粒数、千粒质量,株穗数最小。

任义方等对全国水稻生产调研后发现,近年来我国江淮稻区水稻高温热害发生概率日益加大<sup>[10]</sup>。2013 年 7 月上旬至 8 月中旬,江苏省出现了一段持续的高温少雨天气,其间平

均气温、平均高温日数都是 1961 年以来最高值,日照时数偏多的程度不如高温日数和最高气温明显,也为 21 世纪以来最多值,同时伴随降水持续偏少,淮河以南大部分地区出现了中度以上的干旱。有关长江中下游一季稻高温热害风险的研究已有较多报道,且已得到较为成熟一致的结论<sup>[11-13]</sup>,即长江中下游水稻高温热害主要发生在抽穗扬花期,其中,江苏省水稻高温热害高发区主要分布在淮河以南地区。

由于江苏省大面积水稻以粳稻为主,生育期相对籼稻偏迟,江苏省水稻发生高温热害生育时段与其他省份有所不同。因此,本研究首先探究了江苏省水稻高温热害发生的时空分布规律。另外,2013 年江苏省水稻高温热害高发的淮河以南地区受害程度却轻于淮北地区,具有典型性,笔者将 2013 年高温时段的气候特征及气候成因与水稻生长实际相结合,详细剖析 2013 年高温对各产量构成因素的影响,最终得到不同水稻品种、生育阶段和地域对高温的响应,以期为指导今后水稻生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

气象资料来源于江苏省 69 个气象台站 1961—2013 年 6 月下旬至 11 月上旬的常规气象资料,用于统计分析 2013 年水稻各生育期及高温时段的光温水特征及各产量因素与光温水的关系。

收稿日期:2017-11-09

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201306035);江苏省气象局开放基金(编号:K201005、KM201404、K201304);江苏省气象局青年科研基金(编号:Q201517)。

作者简介:张 佩(1984—),女,安徽芜湖人,硕士,高级工程师,主要从事农业气象灾害研究。E-mail:78073954@qq.com。

通信作者:高 苹,正研级高级工程师,主要从事应用气象领域研究。E-mail:571086340@qq.com。

[13]王 毅,谢朝新,周宁玉,等. 正渗透膜活性层朝向对正渗透过程的影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2014,46(增刊2):49-53.

[14]Jin X,She Q H,Ang XL,et al. Removal of Boron and Arsenic by forward osmosis membrane; influence of membrane orientation and organic fouling[J]. Journal of Membrane Science,2012,389:182-187.

[15]Zhao S F,Zou L D,Mulcahy D. Effects of membrane orientation on process performance in forward osmosis applications[J]. Journal of Membrane Science,2011,382(1/2):308-315.

[16]刘志强,李 慧,程一桥,等. 正渗透膜分离技术处理生活污水的实验研究[J]. 水处理技术,2016,42(12):68-71.

[17]Kong F X,Yang H W,Wang X M,et al. Rejection of nine haloacetic acids and coupled reverse draw solute permeation in forward osmosis [J]. Desalination,2014,341:1-9.

[18]Zheng Y,Huang M H,Chen L,et al. Comparison of tetracycline rejection in reclaimed water by three kinds of forward osmosis membranes[J]. Desalination,2015,359:113-122.

[19]张高旗,刘海宁,张凯松. 正渗透处理生活污水过程中的膜污染研究[J]. 中国环境科学,2013,33(12):2170-2175.