

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.024

# 南京地区水稻节水灌溉定额及适宜灌溉模式

郝树荣<sup>1</sup>,崔鹏程<sup>1</sup>,张展羽<sup>1</sup>,金玉洁<sup>2</sup>,杨红卫<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 南京市水利规划设计院有限责任公司,江苏 南京 210006)

**摘要:**收集南京地区 55 年气象观测资料,采用 Penman-Monteith 公式计算参考作物需水量;以多年实测数据与分段单值平均法相结合确定水稻作物系数;采用单作物系数法计算水稻需水量,再根据水量平衡原理,结合浅湿灌溉制度,推算南京地区不同分区、不同水文年、不同灌区类型的水稻耗水量和灌溉定额。根据未来水稻生育期暴雨发生概率增加的特点,提出更适宜南京地区推广的水稻蓄水控灌模式,以减少水量损失、提高降雨利用率。结果表明:南京地区一般干旱年降雨有效利用率达 70%~85%,特枯年接近 100%。

**关键词:**灌溉定额;作物需水量;水稻;节水灌溉模式;南京地区

中图分类号:S274      文献标志码:A      文章编号:1004-6933(2015)06-0150-04

## Rice water-saving irrigation quota and suitable irrigation mode in Nanjing

HAO Shurong<sup>1</sup>, CUI Pengcheng<sup>1</sup>, ZHANG Zhanyu<sup>1</sup>, JIN Yujie<sup>2</sup>, YANG Hongwei<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co. Ltd., Nanjing 210006, China)

**Abstract:** In this study, 55-year observing meteorological data were collected and used to calculate the water requirement of reference crop by applying Penman-Monteith formula. Crop coefficient of rice was determined by combining measured data for years with the single time average method. Single crop coefficient approach was used to calculate water requirement of rice. And the water consumption of rice and the irrigation quota were calculated in various partitions and irrigation types of Nanjing in different hydrological years, according to water balance principle combined with shallow-wet irrigation system. Based on the fact that the probability of future rainstorm during rice growth period is increasing, we present a rain water storage and controllable irrigation mode suitable for the generalization in Nanjing, to reduce loss of water and increase rainfall utilization rate. The results indicate that the effective utilization rates of rainfall in common drought years are between 70%~85%, and can reach nearly 100% in extreme drought years.

**Key words:** irrigation quota; water requirement of crops; rice; water-saving irrigation mode; Nanjing area

南京市位于长江下游,境内有滁河、秦淮河、水阳江、石臼湖等,过境水资源丰富,但多与当地降雨同频率遭遇,可利用量不多。南京属低山丘陵区,丘陵占总面积的 2/3,水库塘坝蓄水能力有限,加上降水时空不均,旱灾频发。随着全球气候变暖、极端干旱天气发生的频率进一步增加,农业生产的不稳定性增加<sup>[1]</sup>。在经济快速发展与水资源紧缺矛盾日趋严重的情况下,如何进行水资源的最优分配,是保

证粮食安全的前提下,确保经济可持续发展的基础。科学制定节水技术发展模式,寻求作物节水高效灌溉制度,进行科学合理的灌溉,对南京地区农作物优质高产水分管理和水资源优化配置,具有重要的理论和现实意义。

南京地区降雨量基本能满足旱作物需水要求,三麦灌水不多,水稻是用水大户。现有的水稻需水量及灌溉定额是在充分供水条件下得出的,未考虑

作者简介:郝树荣(1971—),女,副教授,博士,主要从事节水理论与技术研究。E-mail:srhao@hhu.edu.cn

水分胁迫的影响,且与目前普遍采用的浅湿灌溉、蓄水控灌模式不尽相符。而作物灌溉定额与气象、灌水方式和管理条件关系密切。笔者就南京地区水稻节水灌溉定额及适宜的节水灌溉模式开展研究,以期对南京地区建设节水型社会提供支撑。

1 水稻灌溉定额的确定

收集长序列气象资料,采用 Penman-Monteith 公式计算参考作物需水量  $ET_0$ ,采用 FAO56 推荐的单作物系数法计算水稻日需水量,结合浅湿灌溉制度,考虑土壤水分修正系数,根据水量平衡原理,推算水稻耗水量和净灌溉定额,根据灌溉水利用系数的实测数据,确定水稻毛灌溉定额。

1.1 灌溉分区和典型水文年的确定

为合理反映灌溉定额的地区差异,综合考虑地形特点和水资源供需状况,将灌溉区分为丘陵和平原两类区域。作物需水量受水文年型的影响,选用水稻生育期间 6—9 月的降雨量排频适线,确定  $P=50\%$  典型年为 1981 年; $P=75\%$  典型年为 1960 年; $P=95\%$  典型年为 1955 年。

1.2 水稻需水量分析

1.2.1 参考作物需水量

采用南京市气象站 1951—2005 年共 55 年逐日气象资料,计算逐日参考作物需水量。其中  $ET_0$  计算采用 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[2]</sup>。

1.2.2 作物系数的确定

国内外学者曾采用 FAO56 分段单值法研究水稻作物系数<sup>[3]</sup>,而南京地区水稻作物系数的研究还未见报道。FAO 将作物整个生长生育期分为初始生长期、生长发育期、生长中期和生长后期 4 个阶段。本研究仍采用分段单值平均法确定水稻各阶段作物系数。从《作物需水量计算指南》中选出水稻在特定标准条件下(指在湿润气候区空气湿度约为 45%,风速约为 2 m/s,供水充足,管理良好,生长正常,大面积高产的作物条件)相应阶段的作物系数,用 FAO 推荐的经验修正公式和南京当地气候条件,对分段作物系数进行调整<sup>[2]</sup>。但用修正后的作物系数计算出的水稻需水量,比当地实测数据明显偏小。彭世彰等<sup>[4]</sup>也发现,调整后水稻作物系数  $K_c$  值与实测值差异较大,用当地气候条件调整后的作物系数并不适合南京地区水稻作物系数的确定。利用纬度、气候和南京地区接近的安徽全椒水稻作物系数值计算出的实际蒸散发  $ET_a$  与实际相符(图 1)。

1.2.3 水稻需水量的确定

用单作物系数法计算水稻需水量<sup>[2]</sup>。由作物

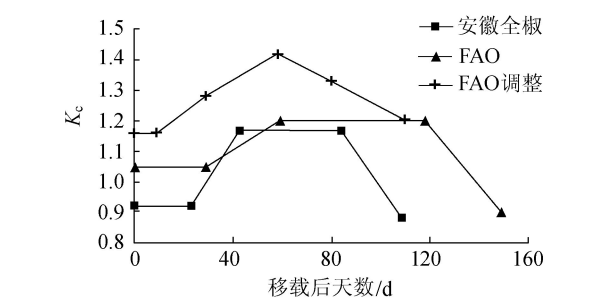


图 1 南京地区水稻作物系数变化过程线

系数和逐日参考作物需水量,可得到 55 年水稻逐日需水量,将不同水文年内选取的 3 个典型年数据取平均,得到平水年、一般干旱年和特枯年水稻逐时段平均需水量(表 1),其中 6 月和 10 月平均生长日期为 4 d 和 14 d。

| 表 1 不同水文年水稻逐时段需水量 mm |             |        |        |        |             |        |
|----------------------|-------------|--------|--------|--------|-------------|--------|
| 年型                   | 需水量         |        |        |        |             | 合计     |
|                      | 6 月 27—30 日 | 7 月    | 8 月    | 9 月    | 10 月 1—14 日 |        |
| $P=50\%$             | 15.36       | 180.40 | 154.93 | 114.10 | 31.94       | 496.73 |
| $P=75\%$             | 15.04       | 182.45 | 181.76 | 103.60 | 41.04       | 523.89 |
| $P=95\%$             | 18.78       | 201.08 | 213.15 | 132.79 | 40.73       | 606.53 |

1.3 水稻耗水量和灌溉定额分析

1.3.1 土壤水分修正系数的确定

计算水稻耗水量,需考虑土壤水分低于适宜含水量下限时对蒸发蒸腾的折减,用土壤水分修正系数  $K_s$  表示<sup>[2]</sup>。常见的确定  $K_s$  的计算公式有:以相对有效含水率为参数的线性法、与相对有效含水率呈对数关系的杰森公式、以相对有效含水率为参数的幂函数公式、加德纳公式、适用于水稻的李远华估算公式以及茆智提出的计算公式。比较发现茆智提出的计算公式考虑了不同水分亏缺程度对作物蒸腾蒸发的影响差异,更符合水分亏缺条件下的作物耗水量规律,采用相对含水率为自变量,在不同土壤中有较好的通用性,且需要的参数较少,物理意义明确<sup>[2]</sup>。

$$K_s = \begin{cases} 1 & \theta \geq \theta_s \\ \ln(1 + \theta) / \ln 101 & \theta_c < \theta \leq \theta_s \\ \alpha \exp[(\theta - \theta_c) / \theta_c] & \theta < \theta_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta$  为相对含水率,对稻田而言,即为实际平均土壤含水率占饱和含水率的百分率; $\theta_s$  为土壤水分绝对充分的临界土壤含水率,稻田取饱和含水率; $\theta_c$  为土壤水分胁迫临界土壤含水率,稻田取饱和含水率的 80%; $\alpha$  为经验系数,一般取 0.80~0.95,水稻取  $\alpha=0.95$ 。

1.3.2 节水灌溉形式下水稻耗水量和灌溉定额的确定

计算水分不足条件下作物耗水量时,需考虑作

物是否受到水分胁迫,按水量平衡原理逐日递推土壤含水率,进而计算  $K_s$  值。笔者采用水稻浅湿灌溉,用水量平衡原理,通过列表法,推导水稻田间逐日水层变化,以确定不同水文年的耗水量和净灌溉定额,结果见表 2 和表 3。参考不同灌区类型和灌溉水利用系数的实测值<sup>[5]</sup>,得到水稻毛灌溉定额(表 3)。

表 2 不同水文年水稻需水量、耗水量和渗漏量统计

| 分区 | 年型       | 腾发量/mm   | 渗漏量/mm   | 耗水量/mm   |
|----|----------|----------|----------|----------|
| 平原 | $P=50\%$ | 496.65   | 201.00   | 697.91   |
|    | $P=75\%$ | 524.16   | 182.50   | 705.97   |
|    | $P=95\%$ | 586.11   | 126.50   | 712.61   |
| 丘陵 | $P=50\%$ | 496.65   | 287.10   | 783.75   |
|    | $P=75\%$ | 524.16   | 268.40   | 792.56   |
|    | $P=95\%$ | 586.11   | 228.10   | 814.21   |
| 分区 | 年型       | 日均腾发量/mm | 日均渗漏量/mm | 日均耗水量/mm |
| 平原 | $P=50\%$ | 4.51     | 1.83     | 6.34     |
|    | $P=75\%$ | 4.77     | 1.66     | 6.42     |
|    | $P=95\%$ | 5.33     | 1.15     | 6.48     |
| 丘陵 | $P=50\%$ | 4.51     | 2.61     | 7.12     |
|    | $P=75\%$ | 4.77     | 2.44     | 7.21     |
|    | $P=95\%$ | 5.33     | 2.07     | 7.40     |

表 3 南京地区水稻整个生育期净灌溉定额

| 分区  | 年型       | 灌区类型 | 灌溉定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |      |      |       | 灌溉水利用系数 | 毛灌溉定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ) |
|-----|----------|------|--------------------------------------------|------|------|-------|---------|---------------------------------------------|
|     |          |      | 秧田期                                        | 泡田期  | 本田期  | 净灌溉定额 |         |                                             |
| 平原区 | $P=50\%$ | 大型   |                                            |      |      |       | 0.53    | 9575                                        |
|     |          | 中型   | 150                                        | 1125 | 3799 | 5074  | 0.56    | 9062                                        |
|     |          | 小型   |                                            |      |      |       | 0.69    | 7355                                        |
|     | $P=75\%$ | 大型   |                                            |      |      |       | 0.53    | 10802                                       |
|     |          | 中型   | 225                                        | 1200 | 4300 | 5725  | 0.56    | 10223                                       |
|     |          | 小型   |                                            |      |      |       | 0.69    | 8297                                        |
|     | $P=95\%$ | 大型   |                                            |      |      |       | 0.53    | 12736                                       |
|     |          | 中型   | 300                                        | 1350 | 5100 | 6750  | 0.56    | 12054                                       |
|     |          | 小型   |                                            |      |      |       | 0.69    | 9783                                        |
| 丘陵区 | $P=50\%$ | 大型   |                                            |      |      |       | 0.50    | 10650                                       |
|     |          | 中型   | 150                                        | 1125 | 4050 | 5325  | 0.53    | 10047                                       |
|     |          | 小型   |                                            |      |      |       | 0.63    | 8452                                        |
|     | $P=75\%$ | 大型   |                                            |      |      |       | 0.50    | 12050                                       |
|     |          | 中型   | 225                                        | 1200 | 4600 | 6025  | 0.53    | 11368                                       |
|     |          | 小型   |                                            |      |      |       | 0.63    | 9564                                        |
|     | $P=95\%$ | 大型   |                                            |      |      |       | 0.50    | 15500                                       |
|     |          | 中型   | 300                                        | 1350 | 6100 | 7750  | 0.53    | 14623                                       |
|     |          | 小型   |                                            |      |      |       | 0.63    | 12302                                       |

水稻逐日水量平衡演算式为

$$h_2 = h_1 + p + m - S - ET_c - C \tag{2}$$

式中: $h_2$  为时段末田面水层深度,mm,小于允许水深下限  $h_{\min}$ ; $h_1$  为时段初田面水层深度,mm,大于雨后蓄水水深上限  $h_{\max}$ ; $p$  为时段内降水量,mm; $m$  为时段灌水量,mm; $ET_c$  为生育期阶段耗水量,mm; $S$  为生育期阶段渗漏量,mm; $C$  为时段内稻田排水量,mm。

## 2 南京地区适宜的水稻节水灌溉模式

南京地区降雨时空分布不均,汛期降雨占全年降雨的 65%<sup>[6]</sup>,汛期中梅雨明显,梅期中常发生连降暴雨、大暴雨,随极端天气发生频率增加,汛期暴雨发生概率更大。目前普遍采用的浅湿灌溉,不能有效利用降雨,故推荐“水稻蓄水控灌技术”,即利用水稻对旱-涝的适应性,在降低土壤水分控制下限的同时,提高雨后蓄水上限和滞留时间,扩大稻田储水库容,充分利用天然降水,减少灌排次数和氮磷排放量,降低水体富营养化发生的可能性。该技术具有良好的环境效应。在南京地区进行了 5 年试验,结果表明可在不明显降低产量和品质前提下,田间尺度上灌排次数减少 2~5 次,节水 10% 以上,氮磷负荷减少 17%~32%<sup>[7-9]</sup>。水稻蓄水控灌水分控制指标见表 4。

表 4 水稻蓄水控灌水分控制指标

| 生育期     | 灌水下限/% | 灌水上限/mm | 蓄水上限/mm |
|---------|--------|---------|---------|
| 返青期     | 100    | 30      | 70      |
| 分蘖期前期   | 90     | 30      | 80      |
| 分蘖期中期   | 70     | 30      | 100     |
| 分蘖后期    | 70     | 晒田      | 晒田      |
| 拔节孕穗期前期 | 80     | 40      | 150     |
| 拔节孕穗后期  | 100    | 40      | 150     |
| 抽穗开花期   | 90     | 30      | 150     |
| 乳熟期     | 80     | 20      | 80      |
| 黄熟期     | 75     | 0       |         |

注:灌水下限为根层土壤含水量占土壤饱和含水率的百分率。

采用上述方法,利用蓄水控灌水分控制指标制定灌溉制度,得到一般干旱年降雨有效利用率达 70%~85%,特枯年接近 100%(表 5)。

表 5 蓄水控灌下水稻本田期有效降雨利用率

| 分区  | 年型       | 降雨量/mm | 排水量/mm | 利用量/mm | 利用率/% |
|-----|----------|--------|--------|--------|-------|
| 平原区 | $P=50\%$ | 437.30 | 101.65 | 297.06 | 68.32 |
|     | $P=75\%$ | 369.15 | 45.96  | 308.55 | 81.13 |
|     | $P=95\%$ | 190.20 | 6.82   | 184.25 | 96.44 |
| 丘陵区 | $P=50\%$ | 437.30 | 110.37 | 326.93 | 75.19 |
|     | $P=75\%$ | 369.15 | 45.96  | 336.42 | 89.30 |
|     | $P=95\%$ | 190.20 | 6.82   | 184.72 | 96.52 |

## 3 结 语

水稻灌溉定额受气象、土壤、灌溉模式等影响,而以往南京地区水稻需水量试验,均为个别年份、特定条件和灌水方式下的散点值,属短系列资料,缺乏连续、长系列的研究成果。本研究系统地考虑了不同水文年( $P=50\%$ 、 $75\%$ 、 $95\%$ )、不同灌溉分区(低山丘陵区、平原区)、不同灌区规模(大型、中型、小型)对灌溉定额的影响,系统地建立了南京地区水

稻灌溉定额体系,可有效指导科学灌溉,为水资源优化配置提供重要的支持。根据未来水稻生育期暴雨发生概率增加的特点,提出更适宜南京地区推广的水稻蓄水控灌模式,以减少水量损失、提高降雨利用率,一般干旱年降雨有效利用率达 70% ~ 85%,特枯年接近 100%。

参考文献:

[1] 王卫光,孙风朝,彭世彰,等. 水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(14):90-98. (WANG Weiguang,SUN Fengchao,PENG Shizhang,et al. Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(14):90-98. (in Chinese))

[2] 彭世彰,徐俊增. 农业高效节水灌溉理论与模式[M]. 北京:科学出版社,2009:122-156.

[3] 刘钰,PEREIRA L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报,2000,16(5):26-30. (LIU Yu, PEREIRA L S. Validation of FAO Methods for Estimating Crop Coefficients [J]. Transactions of the CSAE,2000,16(5):26-30. (in Chinese))

[4] 彭世彰,丁加丽,茆智,等. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证[J]. 农业工程学报,2007,23(7):30-34. (PENG Shizhang, DING Jiali, MAO Zhi, et al. Estimation and verification of crop coefficient

forwater saving irrigation of late rice using the FAO-56 method[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(7):30-34. (in Chinese))

[5] 江苏省农业灌溉用水有效利用系数测算与分析研究[R]. 南京:江苏省水利厅,2008.

[6] 杨明. 近 50 年中国气候变化特征研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2008.

[7] 郭相平,袁静,郭枫,等. 水稻蓄水-控灌技术初探[J]. 农业工程学报,2009,25(4):70-73 (GUO Xiangping, YUAN Jing, GUO Feng, et al. Preliminary study on water-catching and controlled irrigation technology of rice[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(4):70-73. (in Chinese))

[8] 陈朱叶,郭相平,姚俊琪. 水稻蓄水控灌的节水效应[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):426-430. (CHEN Zhuye, GUO Xiangping, YAO Junqi. Water-saving effect of water-catching and controllable irrigation technology of rice [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2011,39(4):426-430. (in Chinese))

[9] 章二子,郭相平,袁静,等. 蓄水控灌对水稻生理生化指标的影响[J]. 人民长江,2008,39(20):60-62. (ZHANG Erzi, GUO Xiangping, YUAN Jing, et al. Water control irrigation effect on physiological and biochemical characteristics of rice [J]. Yangtze River,2008,39(20):60-62. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-19 编辑:徐 娟)

欢迎订阅《水资源保护》杂志

中国科学引文数据库来源期刊    中国科技核心期刊  
RCCSE 中国核心学术期刊        中国高校特色科技期刊  
ISSN 1004-6933        CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会联合主办的科技期刊。本刊针对我国水资源短缺、用水效率不高、水污染严重等突出问题,探讨水资源保护工作中的基础研究、防治技术、宏观管理及水环境治理问题,重点关注水环境、水资源和水生态问题,主要栏目有科学研究、应用技术、综合述评、管理研究等。

《水资源保护》是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、中国高校特色科技期刊,已被美国化学文摘(CA)数据库、美国《剑桥科学文摘》(CSA)数据库、波兰哥白尼索引(IC)数据库等收录和引用,长期以来一直都是水利界和环保部门备受关注的重点期刊,2012 年、2014 年连续被教育部科技司授予“中国高校特色科技期刊”称号。

《水资源保护》主要读者对象为全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生,邮发代号:28-298,双月刊,96 页,12 元/期,全年共计 72 元,每逢单月 20 日出版。可向当地邮局订阅,若无法从邮局订阅,亦可在本刊网站下载征订单。

编辑部地址:南京市西康路 1 号  
邮政编码:210098      电话/传真:(025)83786642  
E-mail:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn  
http://www.hehaiqikan.cn/szybh/ch/index.aspx