

## 黄河下游灌区农田灌溉制度与供需平衡分析

刘钰<sup>1</sup>, 蔡甲冰<sup>1</sup>, 蔡林根<sup>1</sup>, L. S. Pereira<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 水利研究所, 北京 100044; 2. 葡萄牙里斯本技术大学高等农学院农业工程系)

**摘要:** 在簸箕李引黄灌区上游和下游选择典型试验区, 开展了连续两年的冬小麦-夏玉米连作种植模式下的田间试验观测, 用模拟灌溉制度的计算机模型ISAREG对各试验处理进行模拟, 验证了模型的模拟精度。依据模拟结果对现行灌溉制度进行了评价。模拟对比了灌区内3个县4个不同干旱程度典型年气候条件下10种主要作物的两种灌溉制度方案, 包括充分灌溉和部分非充分灌溉方案, 计算了不同方案的田间灌溉需水过程, 分析了不同方案下灌区水资源供需平衡状况。研究表明, 簸箕李灌区只有采用改进的田间灌水技术和有控制的非充分灌溉制度, 才能使灌区供水和需水在平水年基本达到平衡。

**关键词:** 灌溉制度; 供需平衡; 充分灌溉; 非充分灌溉; 改进方案

**中图分类号:** TV215.5 **文献标识码:** A

随着黄河流域经济的快速发展, 用水量不断增加, 黄河下游灌区的农业灌溉可供水量日益减少。解决灌区缺水问题的出路是提高灌溉水利用效率, 主要措施是提高灌溉管理水平。目前黄河流域灌区缺水和用水效率低下并存, 通过改进田间灌水技术和作物灌溉制度, 提高灌溉水的利用效率, 从而减少灌溉用水量, 达到灌区水资源的供需平衡, 这是黄河流域灌区节水改造的主要目标。本文以黄河下游的山东省簸箕李灌区为例, 采用现状调查、田间试验与数值模拟相结合的方法, 评价了灌区农田实际灌溉用水量及其存在的问题, 对模拟灌溉制度的ISAREG模型进行了参数标定和验证, 依据模拟结果对现行灌溉制度进行了评价, 提出了改进方案。用模型计算了不同水平年、不同灌溉制度方案的田间灌溉需水过程, 分析了不同方案下灌区水资源供需平衡状况, 为灌区找到适合当地农业发展和水土资源状况的农田高效灌溉管理模式及供水和输配水系统的运行管理提供基础数据。

## 1 试验方法

**1.1 灌区及试验区基本情况** 簸箕李灌区位于山东省北部的滨州地区, 是黄河下游的大型引黄灌区, 包括惠民、阳信和无棣3个县的30个乡镇, 惠民县位于灌区上游, 阳信县在中游, 下游是无棣县。灌区上游地区水源条件较好, 灌溉保证率高, 可以实施自流灌溉; 灌区下游水源保证率相对较低, 多采用沟渠蓄水, 提水灌溉, 加之下游地区土壤盐碱化相对比较严重, 当地农民习惯于大定额灌溉。

簸箕李灌区控制面积23.5万 $\text{hm}^2$ , 其中耕地面积约占50%, 复种指数1.56, 灌溉面积约占耕地面积的66%。灌区的主要作物有小麦、玉米、大豆、棉花、谷子、花生、果树、蔬菜等, 其中冬小麦和夏玉米连作的种植面积最大。表1为灌区内3个县1995~1997年主要作物的种植比例。

田间灌溉试验选在灌区上游惠民县的沙河村和灌区下游无棣县的李通判村。试验区作物均为冬小麦和夏玉米连作, 试验观测从1998年冬小麦播种开始至2000年夏玉米收获结束, 历时两年。其间冬小麦全生育

收稿日期: 2004-05-11

基金项目: 中国-欧盟重大科技合作项目(ERBIC18CT970170)

作者简介: 刘钰(1955-), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。liuyuy@iwhr.com

期均灌溉3次,夏玉米1999年没有灌溉,2000年惠民的夏玉米灌溉3次,无棣的夏玉米灌溉1次。各次灌溉的日期和平均灌水量见表2。其中无棣试区的实际灌溉水量明显高于上游的惠民试区。

**1.2 土壤特性测定** 在试验区分层取原状土,在实验室测定土壤特性参数,包括土壤颗粒分、干容重和饱和含水量,用压力室方法测水分特征曲线,吸力为0.25bar时的含水量为田间持水量,吸力为15bar时的含水量为凋萎点。土壤特性分析结果见表3。表中有效储水量为1m土层内田间持水量与凋萎点之差的水量,即可以储存在作物根层土壤中被作物吸收利用的水量。

表1 簸箕李灌区3个县主要作物种植比例统计(%)

| 作物   | 惠民县   |       |       | 阳信县   |       |       | 无棣县   |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 1995年 | 1996年 | 1997年 | 1995年 | 1996年 | 1997年 | 1995年 | 1996年 | 1997年 |
| 小麦   | 59.6  | 59.6  | 61.8  | 60.2  | 58.4  | 62.7  | 58.5  | 59.7  | 58.2  |
| 玉米   | 40.4  | 39.3  | 40.6  | 48.9  | 49.1  | 45.7  | 52.4  | 49.8  | 21.3  |
| 大豆   | 9.1   | 6.4   | 9.1   | 9.5   | 7.2   | 7.6   | 17.4  | 17.0  | 5.6   |
| 棉花   | 17.0  | 16.8  | 15.8  | 16.8  | 8.6   | 9.9   | 7.7   | 5.4   | 5.3   |
| 谷类   | 0.4   | 0.2   | 1.4   | 4.1   | 2.9   | 2.6   | 7.4   | 7.8   | 4.1   |
| 薯类   | 2.4   |       | 2.5   | 2.6   | 1.6   | 5.4   | 2.2   | 0.3   | 0.02  |
| 花生   | 5.3   | 4.9   | 4.8   | 0.01  |       | 0.2   | 0.4   | 0.3   | 0.03  |
| 芝麻   |       |       | 0.1   | 0.2   | 0.2   | 0.1   | 0.6   | 0.3   | 0.02  |
| 蔬菜   | 9.3   | 20.6  | 24.5  | 5.5   | 11.3  | 11.6  | 2.4   | 3.6   | 2.3   |
| 果树   | 13.2  | 13.2  | 13.6  | 23.7  | 23.8  | 24.7  |       |       | 2.0   |
| 桑树   | 5.5   | 6.3   | 6.3   | 0.8   |       | 0.4   |       |       |       |
| 复种指数 | 162.2 | 167.3 | 180.5 | 172.5 | 163.0 | 171.0 | 148.9 | 144.1 | 98.9  |

表2 试验区灌水日期和平均灌水量

| 作物  | 惠民试区        |           | 无棣试区        |           |
|-----|-------------|-----------|-------------|-----------|
|     | 灌水日期(年-月-日) | 平均灌水深度/mm | 灌水日期(年-月-日) | 平均灌水深度/mm |
| 冬小麦 | 1998-11-26  | 66        | 1998-11-25  | 162       |
|     | 1999-03-16  | 63        | 1999-03-17  | 186       |
|     | 1999-04-20  | 60        | 1999-05-03  | 146       |
| 冬小麦 | 1999-11-24  | 100       | 1999-09-26  | 100       |
|     | 2000-03-17  | 103       | 2000-11-26  | 146       |
|     | 2000-05-23  | 60        | 2000-03-19  | 170       |
| 夏玉米 | 2000-06-19  | 60        | 2000-07-31  | 100       |
|     | 2000-07-10  | 63        |             |           |
|     | 2000-08-02  | 45        |             |           |

表3 试验区的土壤特性

|    | 深度/cm  | 土壤质地 | 干容重/(g/cm <sup>3</sup> ) | 饱和含水量(%) | 田间持水量(%) | 凋萎点(%) | 有效储水量/(mm/m) |
|----|--------|------|--------------------------|----------|----------|--------|--------------|
| 惠民 | 0-20   |      | 1.36                     | 0.49     | 0.32     | 0.12   | 192          |
|    | 20-40  | 粉砂壤  | 1.55                     | 0.43     | 0.34     | 0.12   |              |
|    | 40-60  |      | 1.62                     | 0.40     | 0.28     | 0.10   |              |
|    | 60-100 | 粉黏壤  | 1.47                     | 0.45     | 0.35     | 0.13   |              |
| 无棣 | 0-20   |      | 1.34                     | 0.50     | 0.33     | 0.12   | 208          |
|    | 20-40  | 粉黏壤  | 1.51                     | 0.44     | 0.35     | 0.12   |              |
|    | 40-60  |      | 1.40                     | 0.48     | 0.34     | 0.12   |              |
|    | 60-100 |      | 1.47                     | 0.46     | 0.37     | 0.18   |              |

**1.3 土壤水分观测** 在惠民和无棣两试区均进行了土壤水分监测。1998年11月~1999年11月采用取土称重法测定土壤重量含水量,用室内测定的各层土壤干容重换算成体积含水量。1999年12月~2000年10月采用中子仪法直接测定各层土壤的体积含水量。每10d观测一次,灌前、灌后加测。观测点布设在试验田块的畦首、畦中和畦尾,测量深度为1m,每20cm一个测点。

**1.4 地下水位观测** 在两个试区每10d观测一次地下水埋深。图1为1999年3月~2000年10月地下水埋深的变化过程,同时给出了同期的降雨和灌溉水量。观测结果显示,下游无棣试区地下水埋深受灌溉和降雨影响很大,表现为地下水位变幅大,反应迅速,上游的惠民试区地下水埋深受灌溉和降雨影响相对较小而且滞后,非汛期地下水埋深在2m左右,汛期上升到1.5m。

## 2 模型检验与现行灌溉制度评价

**2.1 模型验证** 灌溉制度模拟采用葡萄牙里斯本技术大学高等农学院开发的ISAREG模型<sup>[1,2]</sup>。该模型以水量平衡原理为基础,主要功能是模拟农田土壤水分的变化,从而评价给定的灌溉制度,计算作物需水量和灌溉需水量,也可通过不同灌溉方案的模拟对比,制定优化灌溉制度。该模型的主要特点是在水量平衡计算中考虑了以下因素:(1)作物根系吸水深度的变化;(2)非均质土层的影响;(3)不同深度地下水水位的影响<sup>[3]</sup>;(4)作物受旱时土壤供水能力对腾发量的影响。另外,该模型的水量平衡计算可以以日作为时间尺度进行,因此模型具有较高的精度。该模型已经在华北平原的雄县地区得到过标定和验证<sup>[4,5]</sup>。

用ISAREG模型对惠民和无棣试区的各次灌溉试验进行了模拟,通过对比模拟和观测土壤含水量的变化过程,对ISAREG模型进行验证。两试区典型地块的土壤水分动态模拟结果与实测值的对比见图2。对比结果证明,选用的模型和确定的参数均具有令人满意的精度,可用这一模型和这些参数评价现行灌溉制度,制定优化灌溉制度,指导灌溉制度的改进。

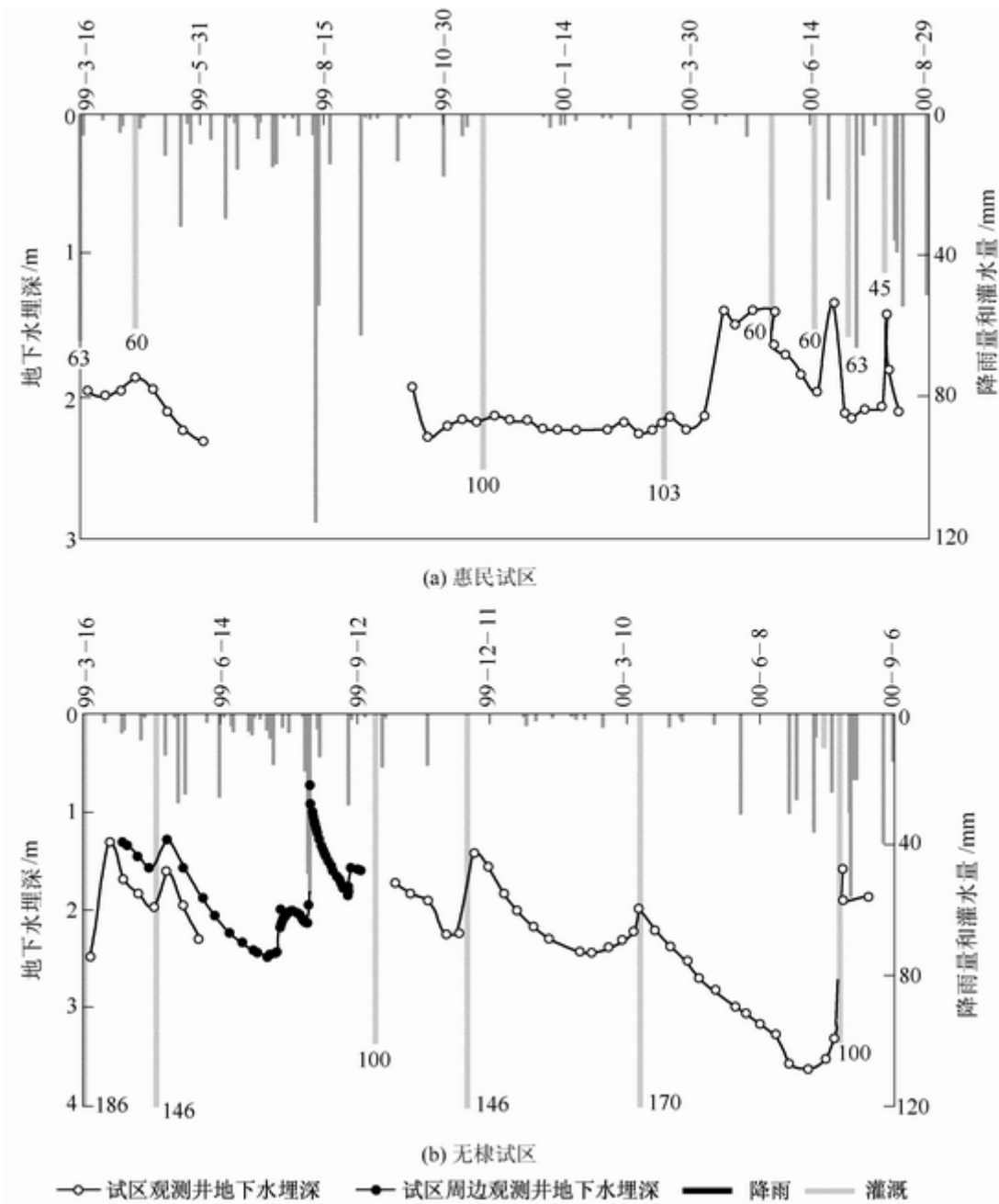


图1 地下水埋深相对于降雨和灌溉的变化过程

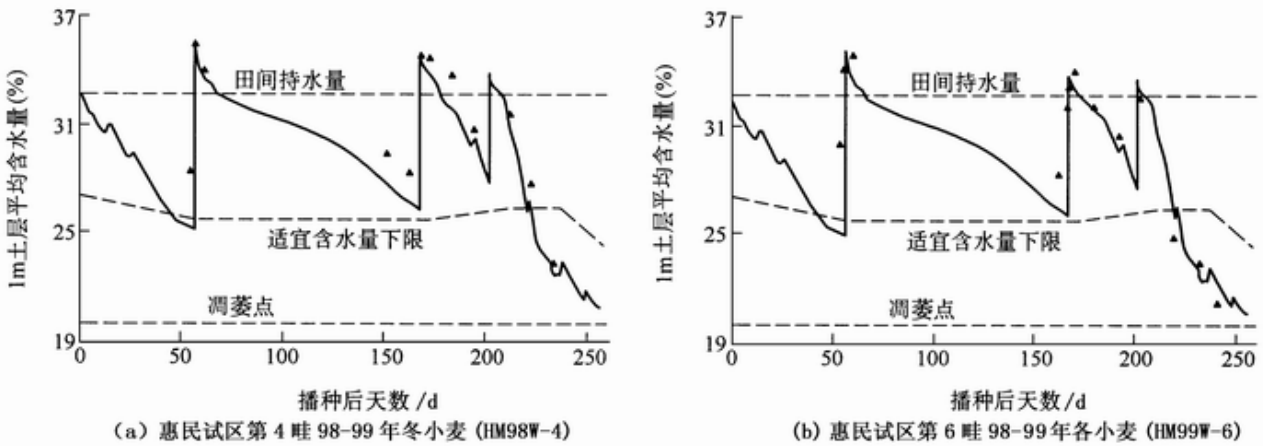


图 2 土壤水分模拟曲线和观测值对比

2.2 现行灌溉制度评价 表4为试区现状灌溉制度模拟结果。从表4可以得出：(1)冬小麦生育期消耗的水量由降雨、灌溉、土壤储水及地下水补给4部分水量补充，其中降雨补充占总耗水量的10%~26%，土壤储水供给占15%~30%，地下水补给占5%~20%，其余30%~55%的耗水量靠灌溉补充。由此可见，在黄河下游地区冬小麦对灌溉的依赖性很大；(2)冬小麦生育期降雨量很小，基本均为有效降雨。而夏玉米生育期有效降雨仅占总降雨量的45%左右；(3)按照目前的灌水时间和灌水量，灌溉水的渗漏损失均比较大。田间灌溉水利用效率惠民试区冬小麦平均为0.8，夏玉米为0.64，无棣试区冬小麦平均只有0.5左右。全灌区平均为0.68；(4)从作物产量看，各田块的相对产量均不足85%。无棣试区1998年冬小麦灌3次，产量达到最高产量的84%，1999年由于供水不足，冬小麦灌溉2次，相对产量只达到57%。从以上分析可以看出，簸箕李灌区的现行灌溉制度不够合理，需根据黄河水源的供水状况和灌区作物的需水规律，对现行灌溉制度进行改进。

表 4 试验区现状灌溉制度模拟结果 (单位：mm)

| 田块       | 灌溉情况 |     |     | 降雨情况 |     | 地下水<br>补给量 | 腾发量 |     | 土壤有效储水量 |    |      | 相对产量<br>$Y_s/Y_n$ (%) |
|----------|------|-----|-----|------|-----|------------|-----|-----|---------|----|------|-----------------------|
|          | 次数   | 水量  | 漏量  | 雨量   | 渗漏  |            | 潜在  | 实际  | 播前      | 收后 | 增量   |                       |
| HM98w-4  | 3    | 235 | 43  | 69   | 1   | 30         | 526 | 410 | 128     | 8  | -120 | 77                    |
| HM98w-6  | 3    | 218 | 22  | 69   | 3   | 32         | 526 | 414 | 128     | 8  | -120 | 78                    |
| HM99w-4  | 3    | 297 | 76  | 37   | 0   | 65         | 574 | 410 | 102     | 15 | -87  | 70                    |
| WD98w-L3 | 3    | 458 | 214 | 117  | 2   | 22         | 526 | 446 | 79      | 14 | -65  | 84                    |
| WD99w-S7 | 2    | 246 | 135 | 87   | 15  | 67         | 609 | 357 | 122     | 15 | -107 | 57                    |
| HM00m-4  | 3    | 216 | 77  | 178  | 178 | 0          | 368 | 307 | 70      | 50 | -20  | 79                    |

注：田块符号表示的是试区、年份、作物和地块号，如WD99w-S7表示无棣试区1999年冬小麦的7号短畦；HM00m-4表示惠民试区2000年夏玉米的4号畦。

### 3 灌溉制度改进方案及水量供需平衡分析

3.1 灌溉制度方案 为得到适合于簸箕李灌区的不同作物的灌溉制度，用ISAREG模型分别模拟了灌区内

3个县4个不同干旱程度典型年气候条件下10种主要作物的2种灌溉制度方案。

方案1,充分灌溉。当根层土壤平均含水量降至适宜含水量下限时即实施灌溉,净灌水深度为补充根层土壤水分至田间持水量所需要的水量。根据当地实际情况,模拟中设定了两个灌水限制条件:(1)冬季冻土期(12月10日~3月1日)不灌溉;(2)作物收获前10d停止灌溉<sup>[6]</sup>。

方案2,部分非充分灌溉。在方案1的基础上对一些作物减少1~2次灌溉,特别是经济效益比较低且需水量比较大的作物,适当合并需水高峰期过密的灌溉频次,尽量使灌溉时间与现行供水计划相符<sup>[7]</sup>。净灌水深度仍为补充根层土壤水分至田间持水量所需要的水量,灌水限制条件与方案1相同。

表5和表6分别为惠民县平水年方案1和方案2的模拟结果。方案2比方案1减少了灌溉次数(小麦减少2次,谷子、蔬菜、果树各减1次),灌溉水量减少了16%,而作物相对产量并没有明显下降,均保持在92%以上,原因是提高了降雨和土壤水的有效利用量。

表5 惠民县平水年方案1(充分灌溉)的模拟结果

| 作物 | 灌溉情况 |         | 降雨损失<br>/mm | 模拟结果        |             |                    |
|----|------|---------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
|    | 次数   | 灌溉定额/mm |             | 实际腾发量ETa/mm | 末期土壤有效水量(%) | 相对产量 $Y_a/Y_n$ (%) |
| 小麦 | 5    | 343     | 33          | 563         | 71.0        | 99                 |
| 玉米 | 1    | 71      | 59          | 381         | 48.8        | 1000               |
| 大豆 | 1    | 66      | 51          | 378         | 52.8        | 100                |
| 棉花 | 2    | 225     | 148         | 636         | 31.9        | 100                |
| 谷类 | 3    | 210     | 148         | 520         | 89.3        | 100                |
| 芝麻 | 2    | 138     | 131         | 420         | 92.1        | 100                |
| 花生 | 2    | 127     | 104         | 467         | 73.6        | 100                |
| 薯类 | 3    | 224     | 132         | 550         | 85.5        | 100                |
| 蔬菜 | 4    | 238     | 131         | 624         | 43.8        | 100                |
| 果树 | 4    | 273     | 205         | 613         | 67.2        | 100                |

表6 惠民县平水年方案2(部分非充分灌溉)的模拟结果

| 作物 | 灌溉情况 |         | 降雨损失<br>/mm | 模拟结果        |             |                    |
|----|------|---------|-------------|-------------|-------------|--------------------|
|    | 次数   | 灌溉定额/mm |             | 实际腾发量ETa/mm | 末期土壤有效水量(%) | 相对产量 $Y_a/Y_n$ (%) |
| 小麦 | 3    | 227     | 0           | 515         | 54.2        | 92                 |
| 玉米 | 1    | 61      | 68          | 363         | 26.0        | 94                 |
| 大豆 | 1    | 61      | 63          | 360         | 32.5        | 96                 |
| 棉花 | 2    | 137     | 131         | 590         | 12.6        | 94                 |
| 谷类 | 2    | 127     | 71          | 519         | 85.7        | 99                 |
| 芝麻 | 2    | 118     | 110         | 420         | 92.1        | 100                |
| 花生 | 2    | 127     | 104         | 467         | 73.6        | 100                |
| 薯类 | 3    | 224     | 132         | 550         | 85.5        | 100                |
| 蔬菜 | 3    | 152     | 64          | 614         | 36.9        | 98                 |
| 果树 | 3    | 215     | 205         | 610         | 25.8        | 99                 |

对灌区内3个县4个频率年均进行了两种灌溉制度方案的模拟(25%为湿润年,50%为平水年,75%为干旱年,90%为特旱年,确定典型年的方法是对净灌溉需水量进行频率分析<sup>[8]</sup>),模拟结果表明方案2是比较合理的。

**3.2 不同灌溉制度方案下的灌区需水量** 根据灌区内各县两种灌溉制度方案下不同作物的灌水时间和灌水量,以及每种作物的灌溉面积,可计算出各县和全灌区每旬的净灌溉需水量和田间灌溉需水量,计算公式为

$$W_{\text{净}} = 10^3 \sum_{i=1}^n w_i a_i ; W_{\text{田}} = \frac{W_{\text{净}}}{E_a} \quad (1)$$

式中:  $W_{\text{净}}$  为各县净灌溉需水量 [ $\text{m}^3$ ];  $w_i$  为各县第  $i$  种作物的净灌溉需水量 [ $\text{mm}$ ];  $a_i$  为第  $i$  种作物的灌溉面积 [ $\text{hm}^2$ ];  $W_{\text{田}}$  为各县田间灌溉需水量 [ $\text{m}^3$ ];  $E_a$  为各县平均田间灌溉水利用效率,采用改进田间灌水技术方案的平均田间灌水效率<sup>[9]</sup>,惠民地区  $E_a=0.84$ ,无棣地区  $E_a=0.8$ 。

**表 7 惠民县平水年两种灌溉制度方案下的灌溉需水量**

| 月 旬           | 净灌水定额/mm |      |      |       |       |       |      |       |       |       | 净灌溉水量<br>$W_{\text{净}}/(\text{万 m}^3)$ | 田间灌溉水量<br>$W_{\text{田}}/(\text{万 m}^3)$ |          |
|---------------|----------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|--|---|----------|
|               | 小麦       | 玉米   | 大豆   | 棉花    | 谷类    | 芝麻    | 花生   | 薯类    | 蔬菜    | 水果    |  |   |          |
| 方案 1: 充分灌溉    |          |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  |   |          |
| 2 下           | 78.8     |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 436.3                                 | 1 709.9  |
| 3 下           |          |      |      |       |       |       |      |       |       | 60    |  | 149.4                                   | 177.8    |
| 4 上           |          |      |      | 60    | 60    |       |      | 60    | 60    |       |  | 414.5                                   | 493.5    |
| 4 中           |          |      |      |       |       |       | 60   |       |       |       |  | 56.4                                    | 67.2     |
| 4 下           | 70       |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 275.9                                 | 1 519.0  |
| 5 上           | 67       |      |      |       |       |       | 60   |       |       |       |  | 1 221.7                                 | 1 454.4  |
| 5 中           | 64.3     |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 172.0                                 | 1 395.3  |
| 6 上           |          |      |      |       | 72.7  |       |      |       | 59.5  |       |  | 210.8                                   | 250.9    |
| 6 中           |          |      |      | 81.5  |       |       |      | 81.9  | 59.2  | 71.3  |  | 654.9                                   | 779.6    |
| 7 下           |          |      |      | 83.2  |       |       | 78.4 |       | 59.2  |       |  | 458.1                                   | 545.4    |
| 8 上           |          | 71.4 | 65.7 |       |       |       | 67   | 82.8  |       |       |  | 1 322.9                                 | 1 574.9  |
| 8 中           |          |      |      |       | 77.1  |       |      |       |       | 70.6  |  | 185.4                                   | 220.7    |
| 9 中           |          |      |      |       |       |       |      |       |       | 70.8  |  | 176.3                                   | 209.9    |
| 10 下          | 63       |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 148.3                                 | 1 367.1  |
| 合计            | 343.1    | 71.4 | 65.7 | 224.7 | 209.8 | 138.4 | 127  | 224.1 | 237.9 | 272.7 |  | 9 883.0                                 | 11 765.4 |
| 方案 2: 部分非充分灌溉 |          |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  |   |          |
| 3 上           | 77.4     |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 410.8                                 | 1 679.5  |
| 4 上           |          |      |      |       |       |       |      |       |       | 60    |  | 149.4                                   | 177.8    |
| 4 中           |          |      |      | 60    | 60    |       |      | 60    | 60    |       |  | 414.5                                   | 493.4    |
| 4 下           |          |      |      |       |       |       | 60   |       |       |       |  | 56.4                                    | 67.2     |
| 5 上           | 84.8     |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 545.7                                 | 1 840.1  |
| 5 中           |          |      |      |       |       |       | 60   |       |       |       |  | 0.4                                     | 0.5      |
| 6 中           |          | 61   | 61   |       | 66.9  |       |      |       | 70    |       |  | 1 315.1                                 | 1 565.6  |
| 6 下           |          |      |      | 77.3  |       |       |      | 96.2  |       | 78.8  |  | 464.2                                   | 552.7    |
| 8 上           |          |      |      |       |       |       | 57.7 |       | 72.2  |       |  | 245.2                                   | 291.9    |
| 8 中           |          |      |      |       |       |       | 76.1 | 95.8  |       |       |  | 100.8                                   | 120.0    |
| 8 下           |          |      |      |       |       |       |      |       |       | 76.2  |  | 189.7                                   | 225.9    |
| 10 下          | 64.7     |      |      |       |       |       |      |       |       |       |  | 1 179.3                                 | 1 404.0  |
| 合计            | 227      | 61   | 61   | 137   | 127   | 112   | 136  | 252   | 202   | 215   |  | 7 071.6                                 | 8 418.6  |

表7和表8分别给出了惠民县和无棣县平水年10种主要作物在两种灌溉制度方案下的净灌溉需水量和田间灌溉需水量。图3为惠民县两种方案的各旬田间灌溉需水过程。从表和图中可以看出,两种灌溉制度方案的用水量有很大差别,惠民县和无棣县采用方案1的净灌溉需水量分别为0.99亿 $m^3$ 和1.42亿 $m^3$ ,田间灌溉需水量分别为1.18亿 $m^3$ 和1.77亿 $m^3$ ;采用方案2的净灌溉需水量分别为0.71亿 $m^3$ 和1.19亿 $m^3$ ,田间灌溉需水量分别为0.84亿 $m^3$ 和1.49亿 $m^3$ 。方案2比方案1平水年两县分别省水0.34亿 $m^3$ 和0.28亿 $m^3$ ,分别占该县田间灌溉需水量的28.4%和15.9%。

### 表8 无棣县平水年两种灌溉制度方案下的灌溉需水量

| 月 旬          | 净灌水定额/mm |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 净灌溉水量<br>$W_{净}/(万 m^3)$ | 田间灌溉水量<br>$W_{田}/(万 m^3)$ |          |
|--------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|---------------------------|----------|
|              | 小麦       | 玉米    | 大豆    | 棉花    | 谷类    | 芝麻    | 花生    | 薯类    | 蔬菜    | 水果    |                          |                           |          |
| 方案 1:充分灌溉    |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          |                           |          |
| 3 上          | 69.9     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          | 1 496.1                   | 1 870.1  |
| 4 上          |          |       |       |       |       |       |       |       |       | 60    |                          | 11.3                      | 14.2     |
| 4 中          | 61       |       |       | 60    | 60    |       |       | 60    | 60    |       |                          | 1 574.1                   | 1 967.6  |
| 4 下          |          |       |       |       |       |       | 60    |       |       |       |                          | 4.0                       | 5.0      |
| 5 上          | 61       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          | 1 305.6                   | 1 632.0  |
| 5 中          | 61       |       |       |       |       | 60    |       |       |       |       |                          | 1 310.7                   | 1 638.4  |
| 5 下          | 61       |       |       |       | 70.3  |       |       |       |       | 63.4  | 69.8                     | 1 492.9                   | 1 866.1  |
| 6 中          |          | 72.5  | 72.5  |       | 67.6  |       |       | 75.9  | 54.3  |       | 67.2                     | 1 630.1                   | 2 037.7  |
| 6 下          |          |       |       | 76.1  | 67.6  | 73.1  | 67.8  | 76.4  | 105   |       |                          | 358.5                     | 448.1    |
| 7 中          |          |       |       | 77.7  | 67.6  | 73.1  | 62.8  | 76.4  | 52.4  | 66.1  |                          | 332.9                     | 416.1    |
| 8 上          |          | 60.8  | 61.5  | 78    | 67.6  | 73.1  | 62.5  | 76.4  | 52.4  |       |                          | 1 530.2                   | 1 912.8  |
| 8 中          |          |       |       |       |       |       |       |       | 52.4  | 66.1  |                          | 52.8                      | 66.0     |
| 9 中          |          | 66.4  | 68.1  | 84.7  |       |       |       |       | 58.7  |       |                          | 1 514.2                   | 1 892.8  |
| 9 下          |          |       |       |       |       |       |       |       |       | 66.1  |                          | 12.5                      | 15.6     |
| 10 下         | 73.2     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          | 1 566.7                   | 1 958.4  |
| 合计           | 387.1    | 199.7 | 202.1 | 376.5 | 400.7 | 279.3 | 253.1 | 365.1 | 498.6 | 395.3 |                          | 14 192.6                  | 17 740.7 |
| 方案 2:部分非充分灌溉 |          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          |                           |          |
| 3 中          | 60.6     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          | 1 297.0                   | 1 621.3  |
| 4 上          |          |       |       |       |       |       |       |       |       | 60    |                          | 11.3                      | 14.2     |
| 4 中          | 67.7     |       |       | 60    | 60    |       |       | 60    | 60    |       |                          | 1 717.5                   | 2 146.8  |
| 4 下          |          |       |       |       |       |       | 60    |       |       |       |                          | 4.0                       | 5.0      |
| 5 上          | 72.2     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          | 1 545.3                   | 1 931.6  |
| 5 中          |          |       |       |       | 60.3  | 60    |       |       | 72.4  | 63.6  |                          | 180.3                     | 225.4    |
| 5 下          | 99.5     |       |       | 61.6  |       |       |       | 72    |       |       |                          | 2 250.4                   | 2 813.0  |
| 6 上          |          |       |       |       |       |       |       |       | 72.4  | 61.7  |                          | 67.4                      | 84.2     |
| 6 中          |          | 72.5  | 72.5  |       | 70.1  |       |       | 88    |       |       |                          | 1 582.8                   | 1 978.5  |
| 6 下          |          |       |       | 79    | 66.1  | 66.1  | 70.7  |       | 91.6  | 82.7  |                          | 348.4                     | 435.5    |
| 7 上          |          |       |       |       |       |       |       | 76.1  |       |       |                          | 17.2                      | 21.4     |
| 8 下          |          | 60.8  | 61.5  |       |       |       |       |       | 65    |       |                          | 1 259.4                   | 1 574.2  |
| 9 上          |          |       |       | 74.1  |       |       | 63.7  |       |       | 66.7  |                          | 142.6                     | 178.3    |
| 12 上         | 70.7     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                          | 1 513.2                   | 1 891.5  |
| 合计           | 370.7    | 133.3 | 134   | 274.7 | 256.5 | 126.1 | 194.4 | 296.1 | 361.4 | 334.7 |                          | 11 936.8                  | 14 921.1 |

表9为用上述方法计算的簸箕李灌区各县和全灌区不同频率年充分灌溉与非充分灌溉条件下的净灌溉需水量和田间灌溉需水量。如采用方案1,全灌区平水年的净灌溉需水量为3.14亿 $m^3$ ,田间灌溉需水量为3.83亿 $m^3$ ,干旱年分别为3.64亿 $m^3$ 和4.43亿 $m^3$ 。如采用方案2,全灌区平水年的净灌溉需水量为2.42亿 $m^3$ ,田间灌溉需水量为2.96亿 $m^3$ ,干旱年分别为3.1亿 $m^3$ 和3.76亿 $m^3$ 。



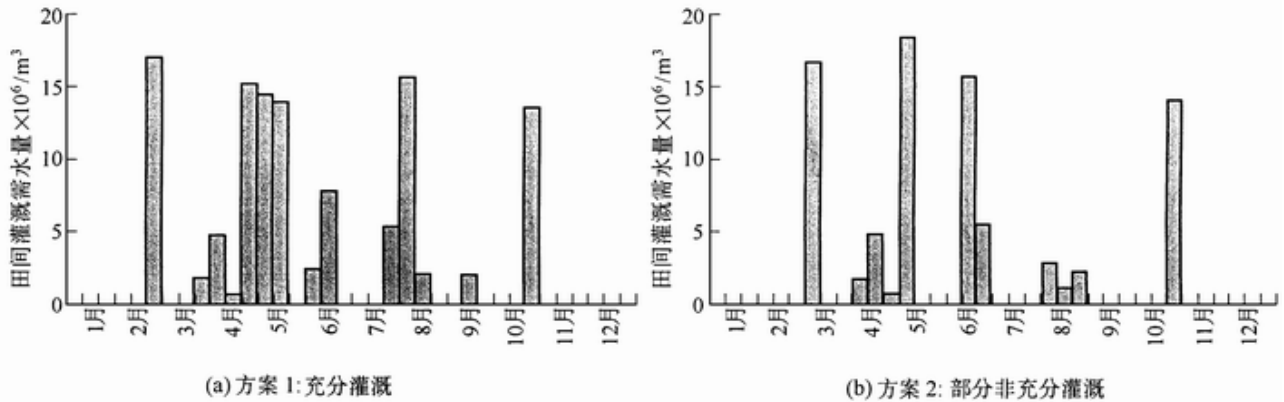


图 3 惠民地区平水年不同方案下各旬的田间灌溉需水量

根据近10年来灌区渠首引水流量分析,全灌区平均年引黄总量为4.9亿 $m^3$ 。按目前渠系水利用系数0.6计算,可输送到田间的水量为2.94亿 $m^3$ 。如采用方案2,平水年缺水160万 $m^3$ ,考虑部分渗漏水量的重复利用,可以认为灌区供需可基本达到平衡。如采用方案1,平水年缺水将达到0.89亿 $m^3$ 。对于干旱年,两种灌溉制度方案的缺水量分别为0.82亿 $m^3$ 和1.49亿 $m^3$ ,而干旱年黄河来水也会减少,供需缺口将会更大。

表 9 不同频率年充分灌溉与非充分灌溉条件下的净灌溉需水量和田间灌溉需水量

|     | 地区  | 净灌溉需水量/(亿 $m^3$ ) |      |      | 田间灌溉需水量/(亿 $m^3$ ) |      |      |
|-----|-----|-------------------|------|------|--------------------|------|------|
|     |     | 25%               | 50%  | 75%  | 25%                | 50%  | 75%  |
| 方案1 | 惠民  | 0.90              | 0.99 | 1.23 | 1.08               | 1.18 | 1.47 |
|     | 阳信  | 0.67              | 0.74 | 0.90 | 0.80               | 0.88 | 1.07 |
|     | 无棣  | 1.15              | 1.42 | 1.51 | 1.44               | 1.77 | 1.89 |
|     | 全灌区 | 2.73              | 3.14 | 3.64 | 3.32               | 3.83 | 4.43 |
| 方案2 | 惠民  | 0.71              | 0.71 | 1.15 | 0.84               | 0.84 | 1.37 |
|     | 阳信  | 0.53              | 0.52 | 0.87 | 0.63               | 0.62 | 1.03 |
|     | 无棣  | 0.74              | 1.19 | 1.08 | 0.93               | 1.49 | 1.35 |
|     | 全灌区 | 1.98              | 2.42 | 3.10 | 2.40               | 2.96 | 3.76 |

#### 4 结论

(1)在试验区连续两年田间试验观测的基础上,对模拟灌溉制度的ISAREG模型进行了参数标定和验证。结果表明,模型具有较高的模拟精度,可用其评价现行灌溉制度,并进行多种方案模拟和对比,寻找最佳灌溉制度方案,改进农田灌溉管理水平。(2)试验区的现行灌溉制度不够合理,上游灌水次数较多,灌水量偏大,下游灌水次数少,灌水量过大,造成灌溉水渗漏损失和作物受旱减产同时存在。通过采用ISAREG模型模拟的10种主要作物的两种灌溉制度方案的对比分析,推荐采用部分非充分灌溉方案。(3)对灌区水资源供需平衡状况进行分析表明在改进田间灌水技术条件下,采用方案1全灌区平水年田间灌溉需水量为3.83亿 $m^3$ ,与现状平均引水量相比缺水0.89亿 $m^3$ 。采用方案2全灌区平水年净灌溉需水量为2.96亿 $m^3$ ,缺水160万 $m^3$ 。簸箕李灌区只有采用改进的田间灌水技术和有控制的非充分灌溉制度,才能使灌区供水和需在平水年基本达到平衡。

## 参考文献：

- [1] Teixeira J L, Pereira L S. ISAREG, An Irrigation Scheduling Simulation Model [J]. ICID Bulletin, 1992, 41(2): 29-48.
- [2] 刘钰, Teixeira J L, 等. 作物需水量与灌溉制度模拟[J]. 水利水电技术, 1997, (4): 38-43.
- [3] 刘钰, 蔡林根, 等. 作物根区底部土壤水分向上运移通量的计算方法[J]. 水利学报, 2001, (12): 19-25.
- [4] Liu Y, Teixeira J L, Zhang H J, Pereira L S. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain[J]. Agri. Water Manag., 1998, 36: 233-246.
- [5] 刘钰, 李益农, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米连作种植模式下的灌溉制度研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 1997, (2): 69-72.
- [6] 许迪, 蔡林根, 等. 农业持续发展的农田水土管理研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [7] Pereira L S, Teixeira J L. Irrigation under limited water availability: Water saving techniques. In: Verplancke, H. J. W., E. B. A De Strooper and M. F. L. De Boodt (eds) Water Saving Techniques for Plant Growth. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 1992: 33-54.
- [8] 刘钰, Pereira L S. 考虑地面灌水技术制约的灌溉制度优化[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 74-79.
- [9] 刘钰, 蔡甲冰, 白美健, 等. 黄河下游簸箕李灌区田间灌水技术评价与改进[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(1): 32-39.

## Analyses of irrigation scheduling and water balance for irrigation district in lower reaches of Yellow River

LIU Yu<sup>1</sup>, CAI Jia-bing<sup>1</sup>, CAI Lin-gen<sup>1</sup>, L.S.Pereira<sup>2</sup>

(1.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2.Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon, Portugal)

**Abstract:** Two typical experimental areas located at the upstream and downstream of the Bojili Irrigation District are selected to investigate the optimal scheduling for balancing the supply and demand of irrigation water. Field observations were conducted for winter wheat and summer maize in two consecutive years. Observation data were used to verify the validity of the ISAREG model, which is an irrigation-scheduling model based on soil water balance. On this basis, the model was applied to evaluate the current irrigation scheduling. The simulation results of two irrigation-scheduling strategies for 10 kinds of crops in four typical years with different probabilities in three counties were analyzed. It is found that the water balance could be achieved if the improved irrigation techniques and controlled deficit irrigation were adopted.

**Key words:** irrigation scheduling; water balance; full irrigation; deficit irrigation; improved irrigation techniques; deficit irrigation