

# 灌溉水利用效率随尺度变化规律分布式模拟

谢先红<sup>1,2</sup>, 崔远来<sup>1</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 北京大学工学院能源与资源工程系, 北京 100871)

**摘要:** 为评价农田灌溉水利用状况并揭示灌溉水利用效率的尺度变化规律, 应用改进的分布式水文模型 (SWAT) 模拟了漳河灌区三干渠灌域的水循环过程和作物产量。以子流域嵌套方式将研究区划分为 9 个尺度来计算灌溉水利用效率指标, 并分析其随尺度变化的特征及原因。结果表明, 灌溉水分生产率受降雨、气候条件的时空分布特征影响较大, 而且随尺度增大明显, 其尺度关系可以近似应用幂函数描述, 函数的形式和参数与分形思想接近。排水率在中等尺度上的数值最大, 但随尺度变化不显著。因此, 在一定精度条件下, 灌溉水分生产率的尺度转换模式可以尝试应用幂函数形式。漳河灌区在中等尺度上的节水潜力最大。

**关键词:** 分布式水文模型; 灌溉水利用效率; 水分生产率; 排水率; 尺度; 节水潜力

**中图分类号:** S275; TV12      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2010)05-0681-09

灌溉水利用效率是评价灌区水分利用状况及其效益的重要指标。由于节水灌溉效果具有尺度效应, 灌溉水利用效率指标随尺度变化规律已引起人们的研究兴趣。国内外以往的工作主要局限于单株作物和农田尺度, 缺乏宏观区域尺度水资源高效利用核算的相关研究<sup>[1]</sup>。近年来不少学者通过野外试验监测的手段尝试探讨灌溉水利用效率的尺度问题。Molden 等<sup>[2]</sup>指出随着尺度增大, 水分生产率指标应会不断提高。崔远来等<sup>[3]</sup>发现灌溉水分生产率及毛入流量水分生产率指标从田间尺度、灌溉干渠尺度和灌区尺度上随尺度增加而增大, 但在中等尺度上有些年份偏低, 有些年份偏高。实际上, 仅根据田间尺度的观测结果来推测大尺度的灌溉水利用效率几乎是不可能的<sup>[4]</sup>。由于试验监测存在耗时、费力等诸多缺陷, 一些水文模型被发展起来并用以描述灌溉农田水分的运动过程。Singh 等<sup>[5]</sup>应用 SWAP 模型模拟了农田水分的耗散以及不同作物的生长过程, 并分析了水分生产率的影响因素。胡克林等<sup>[6]</sup>以田间试验为基础, 采用土壤水动力学模型模拟了不同边界条件下灌溉农田水分渗漏过程。诸如此类模型适合于描述小尺度(田间尺度)的水文过程。基于合理假设和简化处理的基础上可以建立适合大尺度的水文模型, 如胡和平等<sup>[7]</sup>建立的干旱区平原绿洲散耗型水文模型考虑了人类活动(如引水灌溉、地下水的开采等)对区域水平衡的影响。但是此类集总式模型并不能模拟具有较强空间变异性的灌区水文过程<sup>[8]</sup>。正因为这些研究手段的局限, 无法全面描述灌溉水利用效率的尺度特征, 可能会导致研究结论的不一致。此外, 当获得小尺度的灌溉水利用效率指标时, 我们希望进一步获得大尺度的灌溉水利用效率, 比如研究和分析作物-田间-灌区-流域(区域)-全球不同尺度之间用水效用的尺度效应以及尺度转换问题<sup>[9]</sup>。但是目前无论是在理论上还是在实际应用的经验上, 都缺乏合理的尺度转换计算模式。

要想准确得到灌区不同尺度的水分利用效率, 分布式水文模拟是一种有效的手段。它能够充分利用有限资料, 模拟水分消耗、水平衡要素和作物产量, 并计算出灌溉水利用效率指标<sup>[8,10]</sup>。另外, 从模拟的水分生产率出发, 或许可以建立简单、实用的模式, 从而实现指标的尺度转换。因此, 本文以湖北漳河灌区为例, 选择不同频率降雨的情景模式, 在改进的分布式水文模型基础上, 模拟分析灌溉水利用效率指标随尺度的变化特征, 并

收稿日期: 2009-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50879060 50839002)

作者简介: 谢先红 (1980-), 男, 湖北阳新人, 博士后, 主要从事农田水利与水文水资源方面研究。

E-mail: xxhong1122@ yahoo.com.cn

借鉴分形理论的思想探讨灌溉水分生产率指标的尺度转换模式。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

漳河灌区位于湖北省江汉平原西北部,设计灌溉面积  $173\,680\text{ hm}^2$ 。灌区的灌溉水源除漳河水库外,还有中小型水库 314座,塘堰 81 595口,提水泵站 34座,形成了以漳河水库为骨干,提水泵站作为补充的灌排水网。灌区年均气温  $16.9^\circ\text{C}$ ,年均降雨量  $960\text{ mm}$ 。主要种植作物为中稻、油菜、小麦、棉花等。其中,中稻为主要灌溉作物,采用间歇灌溉模式。

根据灌区的数字高程模型 (DEM) 划分得到以漳河灌区内部二千渠和三千渠为边界的封闭区域作为研究区,面积约  $11.28\text{ 万 hm}^2$ ,占漳河灌区控制面积约 20%,如图 1所示。研究区北抵漳河水库,南端靠近长湖入口。降雨数据来源于团林、四方、曾集、张场、十里等 5个站点,气温、风速、辐射等数据源于团林试验站。选择区域内典型塘堰 6口,测得塘堰面积,并在水稻生育期内观测塘堰水位变化,以此估算塘堰水面面积和容积变化,进一步推算塘堰渗漏水量。以杨树档水库为典型推算研究区内水库的水平衡过程。

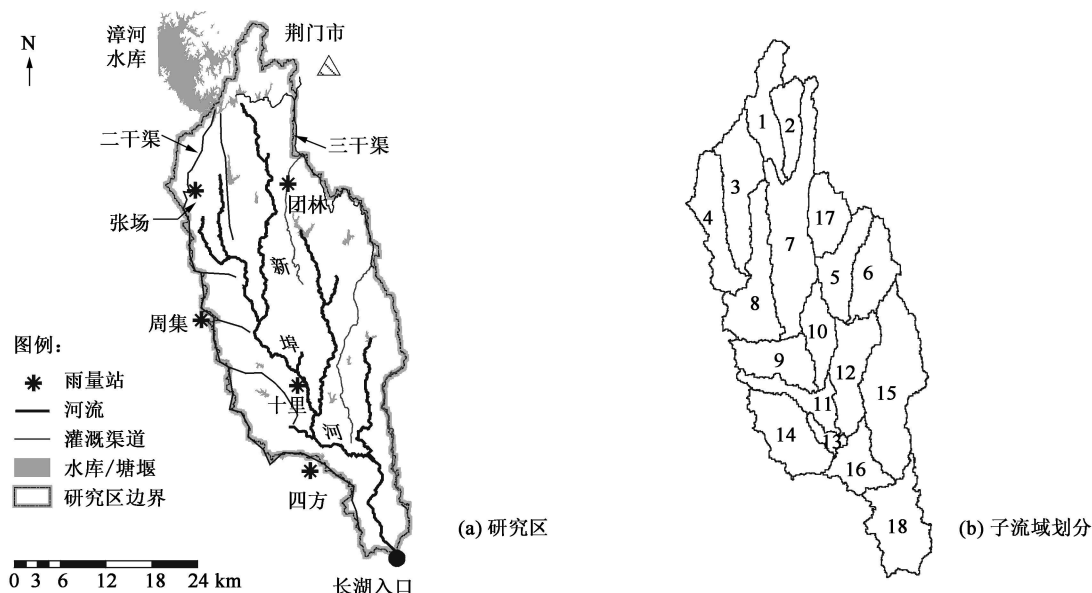


图 1 研究区概况(漳河灌区)与子流域划分

Fig. 1 Site map of the interested irrigation area and subbasins in Zhanghe irrigation district

### 1.2 水文模型

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是一个综合的并具有物理基础的分布式水文模型<sup>[11]</sup>,在灌区水分和养分循环等方面已有诸多应用<sup>[12-13]</sup>。在灌区水循环过程模拟中,国内外不少学者已对其进行改进。Kang等<sup>[14]</sup>改进了水稻田排水过程;代俊峰等<sup>[10]</sup>改进了灌溉水运动等模块,增加渠系渗漏模拟模块及其对地下水的补给作用,构建了灌区分布式水文模型。为了使该模型能更好地模拟水稻灌区水分运动过程,本研究在稻田的蒸发蒸腾、控制灌溉排水、塘堰实时灌溉等方面进行了改进,并采用 Stewart模型模拟水稻产量。具体改进内容可参见文献[15]。

根据 DEM 和土地利用土壤分类图,研究区被划分为 18个子流域和 91个水文响应单元,见图 1(b)。利用气象数据、塘堰和水库参数建立水文模型。其中,模型还以间歇灌溉模式的设计参数(即适宜水层下限、适宜水层上限和降雨后最大蓄水深度)来实现水稻田的灌排控制。对于建立的灌区水文模型,需要水文和作物生长资料进行综合检验。代俊峰等<sup>[10]</sup>曾针对本研究区的杨树档小流域建立 SWAT模型,应用径流观测资料进

行 2 年时间的率定 (2002 年和 2003 年) 和 2 年的验证 (2005 年和 2006 年), 得到了模型的主要参数值。本文在此基础上应用 2005 年和 2006 年径流观测资料对模型进行调整和校验 (此 2 年观测较为准确), 并用 8 个子

表 1 径流和水稻产量模拟效率

Table 1 Validation results of modeling for runoff and paddy rice yields

年份	径流			产量相对误差 /%
	$R^2$	$E_R$ /%	$E_{ns}$	
2005	0.78	-28.08	0.67	3.33
2006	0.87	-3.11	0.77	2.25

流域内典型稻田的水稻产量观测资料做进一步率定和验证。本文直接给出 2005 年和 2006 年的水文和作物产量模拟效果, 具体率定和验证过程以及其它年份的模拟效果可参见文献 [10-15]。如表 1 所示, 径流模拟的决定系数 ( $R^2$ )、相对误差 ( $E_R$ ) 和 Nash 系数 ( $E_{ns}$ ) 均在较为合理的范围内, 而产量模拟的相对误差也

小于 5%。由此可见, 模拟结果反映了水文过程和作物生长情势; 建立的模型可靠、正确, 适合于灌区水文过程的模拟和灌溉水利用效率的分析。

### 1.3 情景模式设定

为了较全面地探讨灌溉水利用效率的尺度变化特征, 需要考虑不同环境下灌区水文过程和作物生长情势。灌溉水利用效率受气象因素影响显著, 其中降雨和蒸发蒸腾情势是主要因素。因此, 对漳河灌区 1964~2006 年的全年降雨量进行排频, 选择丰水年 (25%)、平水年 (50%)、中等干旱年 (75%) 和干旱年 (85%) 等 4 个水平年作为模拟的情景模式。考虑到 2000 年后的数据观测质量较好, 选择 2001、2002、2004 和 2006 年, 它们近似代表不同的水平年 (表 2)。另一方面, 水稻生育期内的降雨对水稻生长和灌水计划影响最大, 真正反映灌区的丰枯程度, 因此根据此期间内的降雨量重新调整了水平年。如表 2 所示, 生育期降雨和全年降雨的排列顺序并不一致, 但是参考作物蒸发蒸腾量  $ET_0$  与生育期内降雨排序较为相似, 如干旱年 (2001 年) 的  $ET_0$  最大, 而丰水年 2004 年的  $ET_0$  最小, 可见  $ET_0$  与降雨的密切关系。所以选择此 4 个代表年, 采用相应年份的降雨量及其它气象条件进行模拟。除气象条件外, 其它参数均采用率定验证后的数值。

表 2 情景模式设定及相近水文年型

Table 2 Simulation scenarios based on the rainfall frequency in Zhanghe irrigation district

情景模式	降雨频率 /%	水平年	全年降雨 /mm	生育期降雨 /mm	生育期日均 $ET_0$ /mm	水平年调整
模式 1 (2001 年)	77	中等年	760	274	4.15	干旱年
模式 2 (2006 年)	84	干旱年	725	340	3.65	中等年
模式 3 (2002 年)	30	丰水年	1089	469	3.95	平水年
模式 4 (2004 年)	50	平水年	901	628	3.39	丰水年

### 1.4 尺度划分

在研究灌区水循环问题时, 常按照灌溉渠道的控制范围对灌区进行划分, 如田间尺度、支渠尺度、干渠尺度、灌区尺度等<sup>[3]</sup>。这种划分方式一是方便数据资料的收集, 如灌溉入流; 二是便于对某一控制范围进行用水状况评价。但是在实际计算中, 这种尺度方式又很难得到某一尺度内的出流情况。本文以“子流域嵌套”划分研究区尺度, 从上游至下游, 尺度面积逐渐扩大至包含整个研究区域, 如图 1(b) 和表 3 所示。考虑到计算量的问题, 这里仅分为 9 个尺度。这种方式考虑了 SWAT 模型的空间离散方式, 且可能抓住回归水的利用模式, 即回归水从上游流向下流, 在更大尺度得到利用<sup>[3-16]</sup>, 有利于分析不同尺度灌溉水利用效率指标变化。

表 3 研究尺度确定 (与图 1(b) 对应)

Table 3 Nine interested scales for analyzing the water use efficiency

尺度	包含子流域	面积 / $hm^2$
1	1	5333.88
2	1, 2	8803.12
3	1, 2, 7	21990.36
4	1, 2, 7, 3, 4, 8	44042.93
5	1, 2, 7, 3, 4, 8, 9, 10	53488.32
6	1, 2, 7, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 17, 5, 6, 12	78907.17
7	1, 2, 7, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 17, 5, 6, 12, 13, 14	87276.14
8	1, 2, 7, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 17, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 16	104843.09
9	1, 2, 7, 3, 4, 8, 9, 10, 11, 17, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 16, 18	112891.31

### 1.5 评价指标

以往定量表征灌溉水利用效率的指标 (灌溉效率、灌溉水利用系数等) 是基于评

价灌溉系统运行状况的层面而提出, 不适合评价不同水管理措施对灌区水量平衡和灌溉效益的影响<sup>[17]</sup>。M olden等<sup>[5]</sup>曾提出水分生产率计算框架, 用于衡量灌区水分利用效益。崔远来等<sup>[18]</sup>从水分消耗的角度认为, 裸地、水面等其它蒸发蒸腾量虽然属于无效损失, 但实际上无法控制, 因此, 排水出流量占入流量比例(无效流失量)才是真正的节水潜力, 从另一个角度表示水分消耗情势。本文结合上述思想, 采用水分生产率指标( $P_W$ )和排水率指标( $F_D$ )来衡量灌溉水利用效率。前者包括灌溉水分生产率( $P_W$ )、毛入流量水分生产率( $P_{CW}$ )和蒸发蒸腾量水分生产率( $P_{ET}$ ), 它们均表示某一尺度内单位水量所获得的作物产量; 后者包括毛入流量排水率( $F_{CD}$ )和可利用水量排水率( $F_{AD}$ ), 它们分别表示某一尺度内排出的水量占毛入流量和可利用水量的比率。其中, 灌溉水量只考虑某一计算区域外引入的灌溉水量, 不考虑区域内塘堰及回归水用于灌溉的水量; 毛入流量包括灌溉水量和区域内降水量; 可利用水量包括灌溉量、降水量和土壤储水变化量, 且扣除不可利用的排出水量。

## 2 灌溉水利用效率指标随尺度变化规律

### 2.1 水分生产率尺度变化特征

从图 2 可见, 不同水平年的水分生产率与反映大气干燥率的  $ET_0$  有紧密的关系, 甚至比降雨量的关系还要密切。按照  $ET_0$  排序:  $ET_{0, 2001} > ET_{0, 2002} > ET_{0, 2006} > ET_{0, 2004}$ , 而对同一尺度下的 3 个水分生产率指标( $P_{CW}$  稍有差异)排序, 大致是  $P_{W, 2001} > P_{W, 2002} > P_{W, 2006} > P_{W, 2004}$ 。可见两者排序是一致的。根据全国作物需水量等值线图研究组的结论, 对作物需水的频率年分析, 宜采用参考作物蒸发蒸腾量。以上分析与此结论较为一致。

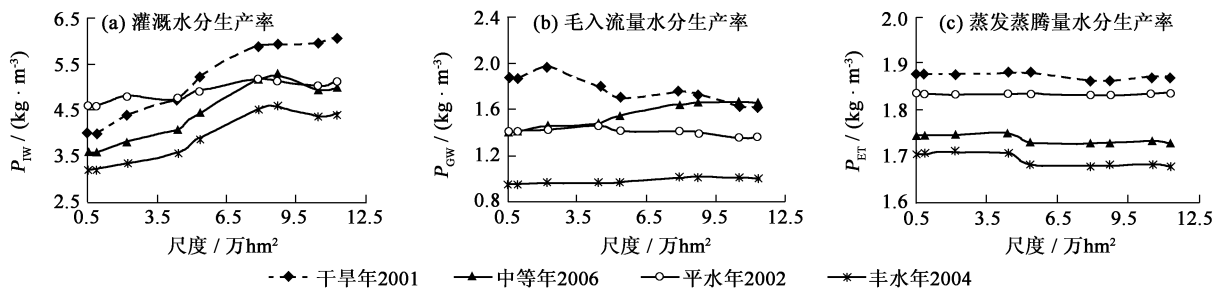


图 2 不同情景模式下水分生产率随尺度变化

Fig 2 Variations of water productivities with scales for the four scenarios

对于 4 个情景模式, 灌溉水分生产率  $P_W$  都是在开始随尺度增大而增大, 达到一定尺度(约 8 万  $hm^2$ )以后,  $P_W$  就趋于水平, 甚至有下降趋势。如果不考虑平水年(2002 年), 则  $P_W$  从小尺度到大尺度增幅约为  $1.3 \text{ kg/m}^3$ 。在同一尺度上, 干旱年的  $P_W$  最大, 丰水年的  $P_W$  最小, 也即  $P_W$  随生育期降雨量的增加而减少。平水年 2002 年的  $P_W$  增幅较小, 出现异常的主要原因是 2002 年水稻生育期内  $ET_0$  和全年降雨较大, 而且降雨大部分发生在水稻插秧之前(5 月 23 日前), 达到 500mm 左右。大的降雨造成土壤含水量高, 甚至出现田面积水, 塘堰蓄水丰富, 可为稻田充足供水, 且使各个尺度上的渠道灌水量趋于均匀(其它水平年的灌水量随尺度增大减小明显), 因此灌溉水分生产率随尺度变化小。可见, 生育期内  $ET_0$  的大小和降雨的时间分配对灌溉水分生产率有较大影响。

对于同一尺度的毛入流量水分生产率  $P_{CW}$ , 首先从不同水平年比较来看, 降雨丰富的年份,  $P_{CW}$  则较小, 比如干旱年平均  $P_{CW}$  约为  $1.75 \text{ kg/m}^3$ , 而丰水年只有  $0.95 \text{ kg/m}^3$  左右。其次从  $P_{CW}$  随尺度的变化来说, 不同水平年形态不一。在毛入流量中, 降雨占了主要部分, 降雨的空间变异性直接影响着水分生产率。比如, 2001 年虽属干旱年, 在研究区上游降雨量很小(团林站靠近上游), 只有 260mm 左右, 而在下游十里铺等地, 降雨量则达到 516mm 左右。较大的降雨量, 导致毛入流量水分生产率降低。图 2(c) 所示蒸发蒸腾量水分生

产率  $P_{ET}$  随尺度变化不明显, 大致呈平坦趋势。各个水平年之间比较来看, 大致规律是越干旱的年份,  $P_{ET}$  越高。平水年 2002 年  $P_{ET}$  出现异常, 其原因是这一年的  $ET_0$  较大。

需要指出, 以上的规律是在不同气候条件下模拟得到的, 而没有采用相应年份的漳河水库供水数据, 因此得出的结论可能与当年实际的有所不同。如崔远来等<sup>[13, 18]</sup>曾得出漳河灌区 2002 年灌溉水分生产率最高, 毛入流量水分生产率  $P_{GW}$  在中等尺度下降, 而后又随尺度增大。另外这些实测数据获得的灌溉水分生产率  $P_W$  随尺度的变化规律与本文采用分布式模拟获得的规律具有很好的相似性。但是由于尺度不同, 且实测条件与模拟条件存在差异, 这里不宜进行比较。

## 2.2 排水率尺度变化规律

4 个情景模式的排水率  $F_D$  在小尺度稍小, 然后很快增大, 在大尺度上甚至有下降的趋势 (图 3)。从总体上看,  $F_D$  随尺度变化不如  $P_W$  显著, 且规律性不强。其次, 4 个水平年之间比较来看, 干旱年份  $F_D$  小, 而在丰水年份较大。比如在中等尺度上, 干旱年和中等年的毛入流量排水率  $F_{GD}$  和可利用水量排水率  $F_{AD}$  大致在 0.20 附近, 而在平水年和丰水年则在 0.4 以上。这一点是容易理解的, 在丰水年份有过多的水分流出研究尺度, 不能被该尺度的水田利用, 也不能被塘堰等蓄积, 造成排水率较高。该结论与崔远来等<sup>[18]</sup>通过数据观测得到的结论较为一致。另一方面将  $F_{GD}$  和  $F_{AD}$  相比较, 发现在干旱年和中等干旱年两者非常接近, 几乎出现重合, 而在平水年和丰水年两者相差较大,  $F_{AD}$  要高出 20% 以上。从两者的定义可以推知, 某一尺度内干旱年份的排水量与土壤储水变化量相当, 而在丰水年份, 排水量远高于土壤储水变化量。

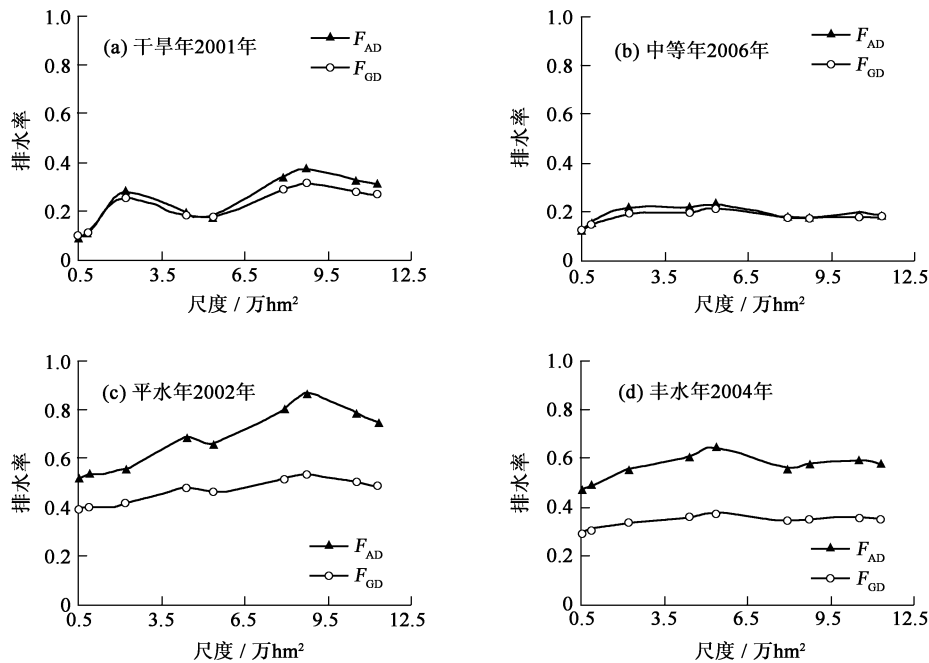


图 3 不同情景模式下排水比率随尺度变化

Fig. 3 Variations of drainage ratios with scales for the four scenarios

## 2.3 灌溉水分生产率随尺度变化原因

从以上模拟结果看出, 相比其它几种灌溉水利用效率指标而言, 灌溉水分生产率  $P_W$  随尺度变化特征明显, 而且在灌区水管理中最为重要, 值得进一步分析。从  $P_W$  的定义可知, 其尺度特征是作物产量和灌溉水量两方面原因导致的结果。现以第一个尺度内单位面积上的水稻产量和灌溉水量为基准, 其它尺度的数值与其相除而得到相对值, 从而反映单位面积的产量和灌溉水量随尺度变化的相对程度。

可以发现,  $P_W$  的变化完全是由灌溉水量随尺度减少所致。仅以干旱年和中等年两个情景模式为例 (图 4), 单位面积产量在各尺度变化很小, 而灌溉水量却明显下降, 达 30% 以上。由此可见, 在更大的尺度上

塘堰等收集回归水补充稻田水分, 减少下游灌溉渠道引水量, 使灌溉水分生产率在中等尺度和大尺度提高。

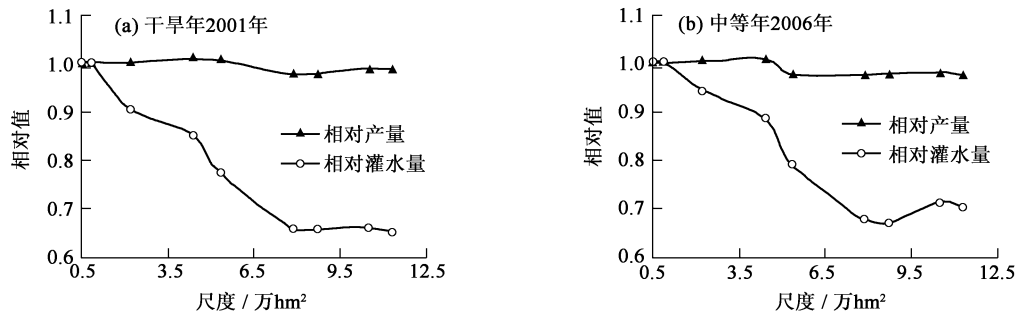


图 4 单位面积相对水稻产量和灌溉水量随尺度的变化

Fig. 4 Typical variations of the relative paddy rice yields and irrigation water ( per unit area)

### 3 灌溉水分生产率尺度转换模式

#### 3.1 经验模式

由试验数据虽然可获得灌溉水分生产率  $P_w$  随尺度变化的规律, 但由于大尺度获取数据困难, 因此由试验数据获得的尺度不多<sup>[3, 18]</sup>, 不能依据试验数据进行  $P_w$  随尺度变化规律的拟合分析。本文基于建立的分布式模型, 结合模拟结果进行分析。由前面结果可知, 不同情景模式下灌溉水分生产率  $P_w$  的尺度变化规律具有良好的一致性。如果能以简单、实用的经验模式来描述, 则可以实现尺度转换。通过观察  $P_w$  与尺度的曲线形式, 发现其与幂函数相近, 故提出以下关系模式:

$$P_w(S) = \beta S^\alpha \quad (1)$$

式中  $P_w(S)$  为灌溉水分生产率,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $S$  为尺度, 本文以子流域嵌套方式计算,  $\text{hm}^2$ ;  $\alpha$  和  $\beta$  是两个常数。

将前面 4 个情景模式下的  $P_w(S)$  应用最小二乘法最优拟合, 得到参数  $\alpha$  和  $\beta$  以及决定系数  $R^2$ 。如表 3 所示, 拟合的决定系数  $R^2$  都在 0.84 以上, 相对误差  $RE$  均小于 0.2%, 表明相关性和精度较高。仅以中等干旱年和干旱年两个情景的拟合状况为例, 如图 5 所示, 拟合曲线的趋势和模拟结果有较好的一致性。因此, 形如式 (1) 的幂函数近似地描述了  $P_w$  的尺度特征。

#### 3.2 分析讨论

如果  $P_w(S)$  满足式 (1), 则在  $\lambda S$  尺度下有

$$P_w(\lambda S) = \beta (\lambda S)^\alpha = \lambda^\alpha P_w(S) \quad (2)$$

式中  $\lambda$  是尺度因子, 其它参数意义同前。可见, 只要知道尺度  $S$  下的灌溉水分生产率, 则  $\lambda S$  尺度下的灌溉水分生产率可用式 (2) 推算, 实现了尺度提升。

如前所述,  $P_w$  的尺度特征主要是由不同尺度灌溉水量的差异所引起, 而单位面积的产量几乎不随尺度变化。这里不妨假设产量  $Y$  是尺度  $S$  的线性函数, 即  $Y=KS$ 。按照灌溉水分生产率的定义,  $P_w(S)$  可表示为

$$P_w(S) = KS W_1(S) \quad (3)$$

式中  $W_1(S)$  为  $S$  尺度下的灌溉水量,  $\text{m}^3$ 。结合式 (1) 和式 (3), 可得

$$W_1(\lambda S) = \theta S^{1-\alpha} = \lambda^{1-\alpha} W_1(S) \quad (4)$$

式中  $\theta$  为常数, 其它参数同前所述。

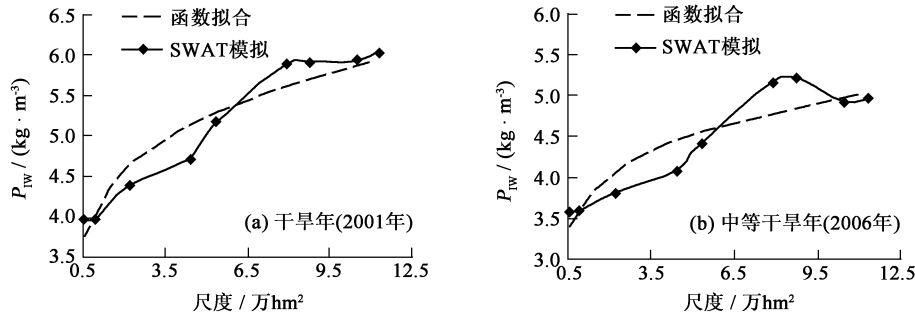


图 5 灌溉水分生产率的幂函数描述

Fig. 5 Power function approximations to the  $P_w$  with scales

由此可见,  $P_w$  的尺度规律能用幂函数表述, 实际上是由灌溉水量的函数特征决定的。其中表达式中仅含参数  $\alpha$ , 且  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。当  $\alpha = 0$  时, 单位面积灌溉引水量在各个尺度达到一致, 完全没有回归水被利用,  $P_w$  也就不随尺度变化; 当  $\alpha = 1$  时, 灌溉引水量为一恒定数值, 表明收集的回归水能够满足灌区大部分面积需水 (灌区内部自给自足), 而只有小部分面积依靠从外源引水,  $P_w$  随尺度也就线性增长。 $\alpha$  越大, 单位面积灌溉水量越少, 回归水利用程度越高,  $P_w$  随尺度增长越快。因此, 参数  $\alpha$  可作为回归水利用程度的另一种量度。对于以上模拟的 4 个情景模式, 除平水年外, 其它三者的  $\alpha$  值在 0.10~0.15 之间。

虽然目前还不能充分证明灌溉引水量可简单地用幂函数表述, 但是, 已有大量研究表明决定灌溉水量的灌区水文、地形地貌和作物种植等条件在时空上表现出分形特征, 与研究尺度成类似于式 (2) 和式 (4) 幂率关系。如刘丙军等<sup>[19]</sup>发现灌溉渠系具有分形特征, 论证了渠系分形维数与其灌水模数的相关性; 谢先红等<sup>[20]</sup>对漳河灌区的塘堰分析表明塘堰面积和空间分布具有典型的幂函数性质, 如果考虑塘堰的蓄水状况, 结合分形维数可能实现水平衡要素的尺度转换。灌区或流域径流、蒸发蒸腾、地下水运动等水文过程已被证明在时间和空间上具有便于尺度转换的分形结构<sup>[8]</sup>。所以, 在特定的条件下, 灌溉水量和灌溉水分生产率符合以上形式可能是一种必然的结果, 参数  $\alpha$  与分形维数具有相似的功能。这方面还需更多的试验和理论验证。

## 4 结 论

采用改进的 SWAT 模型模拟 4 种水平年的情景模式表明:

(1) 灌溉水分生产率一致地随尺度增大, 在达到一临界尺度后趋于平稳; 毛入流量水分生产率的尺度变化特征表现不一; 蒸发蒸腾量水分生产率和排水率都随尺度变化不显著。

(2) 不同年份比较表明, 水分生产率都是在干旱年份较高, 丰水年较低, 受降雨、气候条件的时空分布特征影响很大; 干旱年份排水率低于丰水年份的排水率。

(3) 如果将排水率作为节水潜力评估指标, 则在中等尺度的节水潜力最大。对于所研究区域, 中等尺度上干旱年份的节水潜力约 20%, 丰水年份达到 40%; 小尺度和大尺度比中等尺度要降低 5% 左右。

(4) 简单的幂函数模式能够描述灌溉水分生产率与尺度的关系, 实现灌溉水分生产率、灌溉水量的尺度转换。其中参数  $\alpha$  反映了回归水的利用程度, 可能与分形维数有密切关系。

本文虽然得出以上有益结论, 但还需在以下两方面做进一步研究。首先, 本文只是以子流域嵌套的方式将研究区划分为 9 个尺度来探讨灌溉水利用效率指标的尺度规律。如果以不同的方式划分尺度, 灌溉水利用效率可能会表现不一, 而且本文模拟结果可能与实际观测结果也有差异。因此还需结合模拟和观测 (包括遥感监测手段) 研究其它尺度划分方式下的尺度规律。其次, 本文虽然简单地建立了尺度转换模式, 但还需在理论和实践方面做进一步验证。

## 参考文献:

- [1] 裴源生, 赵勇, 张金萍, 等. 广义水资源高效利用核算 [J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 507-512. (PEI Yuan-sheng, ZHAO Yong, ZHANG Jin-ping, et al. Evaluation on efficient utilization of generalized water resources [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 507-512. (in Chinese))
- [2] MOLDEN D, SAKTHIVADIVEL R. Water accounting to assess use and productivity of water [J]. Water Resource Development, 1997, 15(1/2): 55-71.
- [3] 崔远来, 董斌, 李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律 [J]. 水利学报, 2006, 37(1): 45-51. (CUI Yuan-lai, DONG Bin, LI Yuan-hua. Variation of water productivity in different spatial scales [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(1): 45-51. (in Chinese))
- [4] LOEVE R, DONG B, MOLDEN D, et al. Issues of scale in water productivity in the Zhanghe irrigation system: Implications for irrigation in the basin context [J]. Paddy Water Environ, 2004, (2): 227-236.
- [5] SINGH R, DAM J C, FEDDES R A. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India [J]. Agricultural Water Management, 2006, 82: 253-278.
- [6] 胡克林, 肖新华, 李保国. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农田水分渗漏的影响 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 665-670. (HU Ke-lin, XIAO Xin-hua, LI Bao-guo. Numerical analysis of the effect of the different lower boundary conditions on water drainage in irrigated field [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 665-670. (in Chinese))
- [7] 胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋, 等. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型: I 模型结构 [J]. 水科学进展, 2004, 15(2): 140-145. (HU He-ping, TANG Qiu-hong, LEI Zhi-dong, et al. Runoff evaporation hydrological model for arid plain oasis: I: The model structure [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 140-145. (in Chinese))
- [8] 谢先红, 崔远来, 代俊峰. 农业节水尺度分析方法研究进展 [J]. 水利学报, 2007, 38(8): 953-960. (XIE Xian-hong, CUI Yuan-lai, DAI Jun-feng. Review on scaling analysis approaches for agricultural water saving irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8): 953-960. (in Chinese))
- [9] 雷波, 刘钰, 许迪, 等. 农业水资源利用效用评价研究进展 [J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 732-738. (LEI Bo, LIU Yu, XU Di, et al. Advances in evaluation study on utility of agriculture water utilization [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 732-738. (in Chinese))
- [10] 代俊峰, 崔远来. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型: I 模型构建的原理与方法 [J]. 水利学报, 2009, 40(2): 145-152. (DAI Jun-feng, CUI Yuan-lai. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT: I: Principle and method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 145-152. (in Chinese))
- [11] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: Model development [J]. Journal of the American Water Resource Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [12] KHALIL A, PHILIP W G, RAMESH K. Evaluation of the tile flow component of the SWAT model under different management systems [R]. Iowa: Iowa State University, Center for Agricultural and Rural Development, 2002.
- [13] GOSAIN A K, SANDHYA R, SRINIVASAN R, et al. Return flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model [J]. Hydrological Processes, 2005, 19: 673-682.
- [14] KANG M S, PARK S W, LEE J J, et al. Applying SWAT for TMDL programs to small watershed containing rice paddy field [J]. Agricultural Water Management, 2006, 79(1): 79-92.
- [15] 谢先红. 灌区水文变量标度不变性与水循环分布式模拟 [D]. 武汉: 武汉大学, 2008. (XIE Xian-hong. Scale invariance of hydrological variables and distributed hydrological modeling for irrigation area [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008. (in Chinese))
- [16] 董斌, 崔远来, 李远华. 水稻灌区节水灌溉尺度效应 [J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 833-839. (DONG Bin, CUI Yuan-lai, LI Yuan-hua. Scale effect of water saving in rice-based irrigation system [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 833-839. (in Chinese))
- [17] 崔远来, 熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展 [J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 590-598. (CUI Yuan-lai, XIONG Jia. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 590-598. (in Chinese))



- [18] 崔远来, 董斌, 李远华, 等. 农业灌溉节水评价指标与尺度问题 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 1-7. (CUI Yuan-lai, DONG Bin, LI Yuan-hua, et al. Assessment indicators and scales of water saving in agricultural irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 1-7. (in Chinese))
- [19] 刘丙军, 邵东国, 沈新平. 灌区灌溉渠系分形特征研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 56-59. (LIU Bing-jun, SHAO Dong-guo, SHEN Xin-ping. Fractal features of irrigation canal system in irrigation district [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 56-59. (in Chinese))
- [20] 谢先红, 崔远来, 蔡学良. 灌区塘堰分布分形描述 [J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 858-863. (XIE Xian-hong, CUI Yuan-lai, CAI Xue-liang. On fractal description of ponds distribution in irrigation system [J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 858-863. (in Chinese))

## Distributed hydrological modeling of irrigation water use efficiency at different spatial scales\*

XIE Xian-hong<sup>1,2</sup>, CUI Yuan-lai<sup>1</sup>

(1. State key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

2. Department of Energy and Resources Engineering, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** To better assess water use status in irrigated agriculture and understand irrigation water use efficiency (WUE) at different spatial scales, an improved distributed hydrological model soil and water assessment tool (SWAT), is used to simulate hydrological processes and the crop yields in the irrigation region of the third main canal in Zhanghe irrigation district. The nine nesting scales is adopted to calculate the WUE and to result in five WUE indexes. The variation of five assessment indexes with the nine nesting scales is analyzed. Results show that one of the indexes, the irrigation water productivity, is greatly influenced by the spatial temporal distribution of precipitation as well as other weather conditions in the irrigation region. Its values increase with nesting scales. This scale character can be approximately represented by a power function that is similar to the fractal principle. Another important index, the water drainage ratio, achieves the maximum value at the intermedium nesting scale. However, the scale character of the water drainage ratio is insignificant as this index is quasistationary across all nesting scales. Therefore, the power function can be used to scale up/down the irrigation water productivity. The greatest potential for water-saving practice in this irrigation region is achievable at the intermedium nesting scale.

**Key words** distributed hydrological model; irrigation water use efficiency; water productivity; drainage ratio; scaling; potential of water-saving irrigation

\* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50879060, No. 50839002).