

平原区产汇流模拟

王船海,王娟,程文辉,朱琰

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

摘要 针对平原区下垫面多样变化和在分区内分布不均匀的特点,将平原区分解为水面、水田、旱地与城镇建设用地 4 种下垫面,分别采用不同的产流模型,根据圩区内外不同的汇流特性,分别采用不同的汇流处理模式,以太湖流域为试验区进行检验,结果表明了该模拟方法的可行性和有效性。

关键词 产汇流;平原区;圩区;河网多边形

中图分类号:TV121+.7 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2007)06-0627-06

随着水文学理论的不断发展和人们对流域产汇流过程认识的不断深入,流域产汇流的模拟从传统水文学的集总式模拟发展到了利用(准)分布式模型进行模拟。流域按照地形特点可分为山丘区和平原区,山丘区除建有水库的可调控外,一般为无控制的天然流动,而对于平原区,地势平坦,河沟纵横交错,湖塘星罗棋布,河道交织成网,水系复杂,洼地众多,一般都建圩保护和建闸控制,而且平原地区的水流运动受上游来水、当地降雨、下游顶托(如干支流顶托、河口潮汐顶托、台风增水顶托等)和人类活动等综合影响,洪水运动情况复杂,水流下泄不畅,常造成洪涝灾害,因此准确地模拟平原区产汇流就显得尤为重要^[1]。

平原区的产汇流模拟与山丘区的产汇流模拟相比较而言,无论是在理论方面还是在技术方面都存在一些困难。山丘区下垫面单一且稳定,而在平原区,下垫面是多样且变化的,特别是水田,水田在作物生长期和非作物生长期属于不同类型的下垫面。山丘区河网为树状河网,水流总是从上游断面汇集到下游断面,只要知道下游控制断面的流量过程即可检验其产汇流模拟正确与否,而平原区河网为环状河网,通常为多出口的系统,河道没有固定的流向,由于受测量技术与条件的限制,平原区产汇流模型的计算成果很难直接检验。近年来,一些研究开始考虑降水、地表水、地下水和土壤水的相互转化,将地下水位作为检验产汇流模型计算成果的指标,例如高建峰等^[2]提出的五道沟地区“三水”转化水文模型,王发信等^[3]提出的五道沟水文模型等。

平原区产汇流模拟分为产流与汇流两部分,产流过程是指降雨经过扣损变成净雨,汇流过程是指净雨如何汇集到出口控制断面或排入河网。

由于暴雨具有随时间变化的空间分布,土壤、植被、地形、地貌、地质、水文地质等条件在空间上也呈不均匀分布,人类活动的影响一般也是时空变化的,所以在进行模拟计算时要将计算区域划分为若干个分区。在平原地区,一般都建圩堤保护和建闸控制,支流河道水流受到人工控制,当圩外河道水位不影响圩内防洪除涝时,圩区的涵洞、闸门是敞开的,圩内外是连通的,只有当圩外河道水位超过一定高程,影响圩内安全时,才运用涵洞、闸门、泵站等控制建筑物,使圩内的水位维持在一定的适宜水位。从调蓄水量角度来看,圩内外水面的调蓄作用是不一样的,圩外水面随河道洪水位同涨同落,真正起到了调蓄洪水的作用,圩内水面虽然亦有一定幅度的变化,但这种变化幅度不大,对圩区的产水过程起到调蓄作用。但在洪水来临前,圩内水位可能已达适宜水位上限,对调蓄洪水作用不大,这就是在平原区产汇流模型中重视并区分圩内与圩外的原因。

本文针对平原区坡面产汇流特点,重点研究平原区坡面到周边河网的产汇流过程,根据不同下垫面采用相应的产流模型,引入河网多边形的概念并研究了平原坡面汇流的分布式算法。

1 平原区的产流模拟

由于不同下垫面具有不同的产流规律,产流必须分开进行计算,下垫面对于数学模型中的产水量模拟十

分重要,是产水量模拟计算中的基础资料.但是在模拟计算过程中不能按照“全国土地利用现状”分类系统中的分类^[4],把下垫面分得那样详细,因为那样详细的分类不仅资料难以取得,模型中也很难反映各种下垫面之间的差别.

为了计算方便并区分不同下垫面之间的差异,在模拟过程中把下垫面分成 4 类:水面、水田、旱地和城镇建设用地.

1.1 水面产流模拟

水面产流模拟的产水量(净雨深)为时段内的降雨量与蒸发量之差^[5-6],即

$$R_w = P - \beta E \tag{1}$$

式中: P ——时段内的降雨量; R_w ——时段内的净雨量; E ——时段内的蒸发皿蒸发量; β ——蒸发皿折算系数.

1.2 水田产流模拟

水田模拟从时间上可以分为以下几个阶段:

第 1 个阶段是水稻生长期以前,该时期的产流规律与旱地的产流没有不同,因此直接采用三水源的新安江模型进行计算.

第 2 个阶段是秧田期,秧田以外的水田仍作旱地处理.

秧田期分秧田泡田期和育秧期.秧田泡田期所需水量由两部分组成,首先将土壤饱和,再建立一定的秧田水深.由于秧田期是渠系在一年中首次灌溉,渠系渗漏较大,秧田所占面积亦小,秧田下渗水量比较容易向旁侧旱地渗流,因此秧田期灌渠水量损失较多.

从灌渠或从田间下渗的水量中有一部分是回归到河网的,这部分水量不作为水量损失,对水量模型而言,仅仅是过程分配问题,由于缺乏下渗后如何回归的资料和理论依据,因此在产汇流模型中忽略了回归的时间过程,将此回归的部分作为水田的产水量.

从灌渠或从田间下渗的水量中的另一部分是不回归的,这部分水量消耗于蒸发.

第 3 阶段是本田期,本田期分泡田期和各生长期.从秧田期转到本田泡田期时,要注意水量平衡,设本田期(除秧田外)饱和缺水量为 w_q ,本田期(包括秧田在内)泡田所需水量为 w_x ,故由秧田期转到本田泡田期所需水量(没有包括渠系和田间下渗损失)为 $w_q + w_x$.

第 4 阶段是搁田期,又称晒田期.由本田期转到晒田期时,利用抽排等方式将水田的田间蓄水和土壤饱和含水量与土壤蓄满时的含水量之间的差值水量排出.这段时期水田是干的,土壤初始含水量为土壤蓄满时的含水量,作物需水全部依靠土壤蓄水量,如果按需水系数计算则可能土壤含水量会越来越小,甚至于达到零,这显然是不合理的.因此假定土壤含水量达到一定下限时,水稻需水不能满足.这种处理方法避免了搁田期后大量用水的不合理现象.

第 5 阶段是成熟后期,与搁田期处理方式相同.

第 6 阶段是水稻生长期结束以后,水田土壤含水量由水田成熟后期计算所得的土壤含水量决定.这以后与旱地的产流模型没有不同.

下面重点介绍作物生长期的水田产水等过程.根据作物生长期的需水过程及水田适宜水深上、下限和耐淹水深等因素,逐时段进行水量平衡计算,推求水田产水深 R_r ^[4]:

$$R_r = \begin{cases} H_2 - H_p & H_p < H_2 \\ H_2 - H_u & H_u < H_2 < H_p \\ H_2 - H_d & H_d < H_2 < H_u \\ 0 & H_2 < H_d \end{cases} \tag{2}$$

其中 $H_2 = H_1 + P - \alpha E - f$ (3)

式中: H_1 , H_2 ——时段初、末水田水深; H_p ——各生长期水稻耐淹水深; H_u ——各生长期水稻适宜水深上限; H_d ——各生长期水稻适宜水深下限; α ——水稻生长期的需水系数,即各生长期内水田需水量与同期蒸发皿蒸发量的比值; f ——水稻田日渗漏量.

水稻田时段产水量计算取决于排灌原则.排水量即产水量为正,灌溉水量为负.

对于一个流域或一个分区的水田,各生长期的起讫日期不可能相同,劳力和农田水利设施安排上亦不允许。一个分区内,田间水深亦不相同,不可能同时达到上限或同时达到下限水深。因此将区域上水田水深分为 D_1, D_2, D_3 3 个等级,其中 D_1 为最小水深, D_3 为最大水深。这里,如果 $D_1 < H_d$,灌溉水量为 $R_{D_1} = (D_1 - H_u)/3$,在满足灌溉制度后,令 $D_1 = H_u$,如果 $D_3 > H_p$,排水量为 $R_{D_2} = (D_3 - H_p)/3$,在满足灌溉制度后,令 $D_3 = H_p$ 。区域上处于中间水深的水田,不论 D_2 是多少,均不灌不排。由于灌溉或排水,每个时段需要重新排序 D_1, D_2 和 D_3 的值。

1.3 旱地产流模拟

在平原水网地区,水田比重较大的情况下,可以认为地下水位比较高,土壤含水量易于得到补充,采用 3 层蒸发模型的三水源新安江蓄满产流模型^[7]。对于旱地灌溉的模拟,则设定一个门槛,在用新安江 3 层蒸发模型计算时,如果土壤含水量低于设定的门槛,旱地实施灌溉。

1.4 城镇建设用地产流模拟

从产流角度将城镇建设用地下垫面分为透水层、具有填洼的不透水层和不具有填洼的不透水层 3 类。透水层主要由城镇中的绿化地带组成,其特点是有植物生长,占城镇建设用地的比例为 A_1 ,道路、屋顶等为具有填洼的不透水层,具有坑洼或下水道管网等进行调蓄,占城镇建设用地的比例为 A_2 ,不具有填洼的不透水层占城镇建设用地的比例为 A_3 。城镇建设用地产流模型框图如图 1 所示。

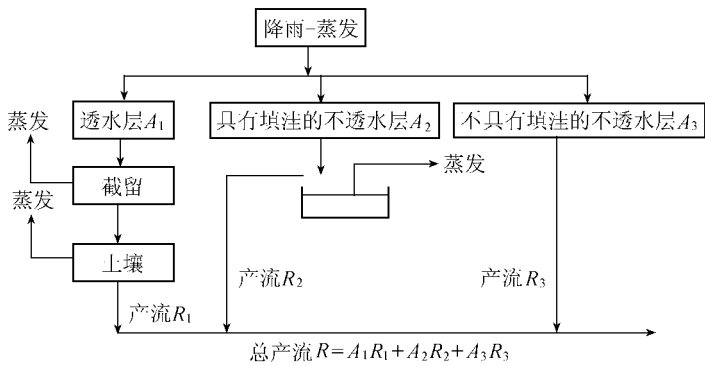


图 1 城镇建设用地产流模型

Fig.1 Runoff model for land use of urban construction

1.4.1 透水层产流模拟

透水层上的降雨经过植物截留、土壤蒸发的损失后产流。在植物截留阶段,根据植物截留量逐时段进行水量平衡计算,推求扣除植物截留后在透水层上的有效雨量。计算公式为

$$F_r = \begin{cases} S_{e2} - S_{eL} & S_{e2} > S_{eL} \\ 0 & 0 < S_{e2} < S_{eL} \\ 0 & S_{e2} < 0 \end{cases} \tag{4}$$

其中

$$S_{e2} = S_{e1} + P_E \tag{5}$$

且有

$$S_{e2} = \begin{cases} S_{eL} & S_{e2} > S_{eL} \\ 0 & S_{e2} < 0 \end{cases} \tag{6}$$

式中: F_r ——扣除植物截留后,在透水层上的有效雨量; S_{eL} ——透水层植物最大截留量; S_{e1}, S_{e2} ——时段初、末植物截留量; P_E ——有效降雨。

降雨扣除植物截留降落在透水层上后,有效降雨采用 F_r ,土壤蒸发采用土地蒸发能力,采用一层蒸发模型计算其产流 R_1 。

1.4.2 具有填洼的不透水层产流模拟

根据时段初、末的洼地拦蓄量逐时段进行水量平衡计算,推求具有填洼的不透水层的产流。计算公式为

$$R_2 = \begin{cases} S_{i2} - S_{iL} & S_{i2} > S_{iL} \\ 0 & 0 < S_{i2} < S_{iL} \\ 0 & S_{i2} < 0 \end{cases} \tag{7}$$

其中

$$S_{i2} = S_{i1} + P_E \tag{8}$$

且有

$$S_{i2} = \begin{cases} S_{iL} & S_{i2} > S_{iL} \\ 0 & S_{i2} < 0 \end{cases} \tag{9}$$

式中： R_2 ——具有填洼的不透水层径流深； S_{iL} ——洼地最大拦蓄量； S_{i1} 、 S_{i2} ——时段初、末洼地拦蓄量。

1.4.3 不具有填洼的不透水层产流模拟

$$R_3 = \begin{cases} P_E & P_E \geq 0 \\ 0 & P_E < 0 \end{cases} \tag{10}$$

式中： R_3 为不具有填洼的不透水层径流深。

城镇建设用地的总径流深为各种下垫面径流深的加权平均，即

$$R = A_1R_1 + A_2R_2 + A_3R_3 \tag{11}$$

式中： R 为城镇建设用地的总径流深。

2 平原区的坡面汇流模拟

为了研究平原区产流的河网分配，引入河网多边形的概念。河网多边形是由概化河道构成的（图 2），多边形的产水量汇入周边河道，但是多边形的产水量如何分配到周边河道，在没有微地形的情况下，需做假定。有以下几种假定可供考虑和选择（a）沿河长均匀分配（b）根据距河道最短距离分配（c）以河道过水能力为权重分配（d）以距离和河道过水能力为权重分配。

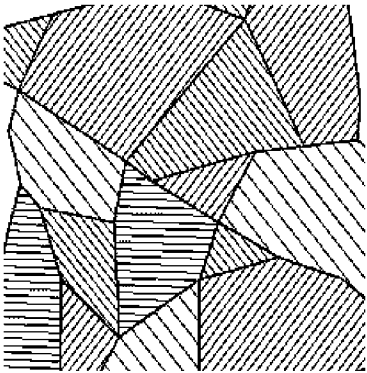


图 2 河网多边形概化示意图
Fig.2 Generalization of polygonal river net

为数值计算的需要，将计算区域划分网格，例如 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ，利用此网格将分区和下垫面信息栅格化。为了便于数值模拟计算，对于分区而言，一个网格只有一个分区信息，而对于其他下垫面信息，一个网格可以包括多种下垫面信息。因此，对于跨两个或更多个分区的网格，取权重最大的分区作为该网格的分区；一个网格中的某种下垫面的面积可以小于网格面积，但各种下垫面面积总和必须等于网格面积。

为了将降雨所产生的水量分配到计算的各河道以及考虑流域的调蓄，将河道多边形的产水量沿河长均匀分配到周边河道^[8-9]。此种处理方法假定水面、水田、旱地、城镇等下垫面在多边形内是均匀分布的，但实际分布是不均匀的，例如在城市附近，城镇面积所占比重较大。为了更准确地模拟平原区汇流，反映分区内下垫面的不均匀分布，利用地理信息系统提取所获得的下垫面的分布信息，把下垫面信息分配到概化河道。

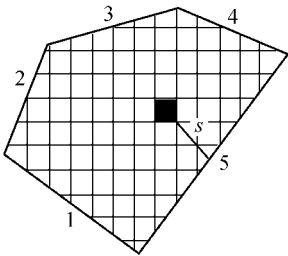


图 3 河网多边形栅格化处理
Fig.3 Grids for polygonal river net

图 3 是由概化河道构成的多边形，多边形由河道 1、2、3、4、5 构成，多边形面积为 A 。多边形的面积及其圩内、圩外各类下垫面面积，可以用其覆盖的网格计算得到。

多边形所包含的面积只能分配到多边形周围概化河道 1、2、3、4 及 5。多边形中任一网格（图 3），需要明确它的产流流向哪一条河道，其灌溉需水量又是取自于哪一条河道。在没有详细地形的情况下，假定该网格与其距离最近的河道相联系，即取图中距离 s 最小的概化河道作为与该网格相联系的概化河道，例如概化河道 5。即该网格的产水量流入与其相联系的概化河道 5，该网格的灌溉需水量亦只能从概化河道 5 引取。该网格与其他概化河道 1、2、3、4 无关。

仅把距离大小作为把网格与周围概化河道相联系的唯一依据，有时会产生不合理的结果，往往会出现一条小河与很多网格相联系的情况，结果在洪水时，有太多的雨洪汇集到该条小河，来不及排泄而形成高水位；或需要太多的灌溉水量而使得河道干涸。从模型计算的稳定性方面考虑，在分配中考虑河道过水能力，取综合系数

$$\theta = \frac{s}{AR^{0.67}} \tag{12}$$

式中： θ ——综合系数； A ——过水面积 m^2 ； R ——水力半径 m ； s ——计算网格到概化河道的最小距离 m 。将网格分配到多边形周边综合系数最小的那条概化河道，网格所属的下垫面亦随着网格的分配而归属于相应的概化河道^[10]。

多边形当天的产水量经过地面汇流后才能进入周边河道，目前尚无成熟的理论和计算方法，因此采用经验汇流曲线，可根据流域的降雨汇流特点选取合适的汇流系数，例如汇流系数为 0.4、0.4、0.2，即 1 d 的降雨产流要经过 3 d 才能完全流入周边河道，产流的 40% 是当天流出的，另外 40% 是第 2 天流出的，还有 20% 是第 3 天流出的。非圩区的产水通过汇流单位线汇入河网后，圩外水面对整个河网的调蓄作用反映在产汇流模型上。对于圩区而言，其产水汇入圩内的河网后，由于圩内和圩外不连通，不能直接到达圩外，可通过堰闸或泵站将其排到圩外的河网，受排涝模数的限制，超过排涝模数的水量将滞蓄于圩内河网。

3 算 例

选用太湖流域作为试验区对上述平原区产汇流模拟方法进行检验。太湖流域是长江右岸最下游的一个支流流域，跨苏、浙、皖、沪 3 省 1 市。流域地势西高东低，南北略高，中部低洼，整体呈周边高、中间低的蝶形，低山丘陵与湖泊水网面积各占流域总面积的 1/6，其余 2/3 为平原洼地，是典型的平原水网区。根据地形及水系特点，在数学模拟计算中，将整个太湖流域划分为山丘区和平原区，全流域产流计算分成 2 部分：一部分为平原区产流计算，总共有 26 个水利分区，其中包括湖西 10 个分区，采用平原区产流模型计算；另一部分为山丘区产流计算，总共有浙西山区的 10 个水利分区，采用三水源新安江模型计算。太湖流域河网概化如图 4 所示。



图 4 太湖流域河网概化示意图
Fig.4 Sketch of river net generalization of Taihu Lake Basin

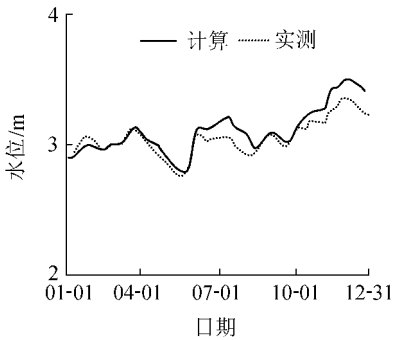


图 5 2000 年太湖水位过程拟合
Fig.5 Hydrograph for Taihu Lake of 2000

以 2000 年的降雨和蒸发作为输入条件，进行产汇流计算，将产汇流模拟的计算结果纳入河网，进行全流域的水量模拟计算，模型所采用的各参数值分别为：上层张力水容量 20 mm、下层张力水容量 60 mm、深层张力水容量 20 mm、蓄水容量曲线指数 0.3、深层蒸发系数 0.2、灌溉时土壤蓄水容量系数（旱地）0.45、旱地灌溉日灌溉水深 3 mm、秧田与水田面积比 0.12、灌溉渗漏系数（水田）0.18、透水层面积比（城镇）0.45、具有填洼的不透水层面积比（城镇）0.35、不具有填洼的不透水层面积比（城镇）0.2、透水层植物最大截留量（城镇）4.2 mm、洼地最大拦蓄量（城镇）100 mm，太湖实测水位过程线和计算水位过程线比较如图 5 所示。由图 5 可以看出，2000 年太湖水位全年期拟合较好，计算水位过程线与实测水位过程线基本一致。尤其是 5 月下旬太湖实测水位达到全年最低值时，模拟计算水位与实测相比仅偏高 3 cm，而这一时期是流域内水田灌溉用水量相对集中的时期，太湖水位受水稻秧田泡田、双季稻以及水田灌溉用水过程的影响较大。非汛期 11 月和 12 月，太湖计算水位过程略为偏高。

4 结 语

本文提出的平原区产汇流模拟方法，把平原区的下垫面分为水面、水田、旱地和城镇建设用地 4 种类型，并把水田的作物生长期和非作物生长期分为水田和旱地 2 种不同的下垫面来考虑其整个过程的连续过渡，反映了平原区下垫面多样变化的特点，实现了产流的分布式计算。下垫面信息栅格化处理方法从根本上解决了由于分区内各下垫面要素均匀分布假定所带来的误差，同时，随着获取的地理信息资料精度的不断提高，

今后可在下垫面数字化信息处理方法的基础上实现汇流的分布式计算,提高模拟精度.关于平原区产汇流模拟的检验方法、从灌渠或从田间下渗的水量中的不回归部分的去向和量的大小、地表水与地下水间的转化等问题,有待进一步研究.

参考文献:

[1] 李光炽.流域洪水演进模型及其参数反问题研究[D].南京:河海大学,2001.
[2] 高建峰,于玲.五道沟地区“三水”转化水文模型[J].地下水,1996(4):168-171.
[3] 王发信,宋家常.五道沟水文模型[J].水利水电技术,2001(10):60-63.
[4] 本书编委会.最新土地利用现状分类及开发管理实用技术手册[K].北京:中国土地科学出版社,2007.
[5] 赵永军,杨珏,程文辉.太湖流域产汇流模拟[J].河海大学学报,1998,26(2):110-113.
[6] 梁瑞驹,程文辉,蔡文祥,等.太湖流域水文数学模型[J].湖泊科学,1993,5(2):99-106.
[7] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984:32-54.
[8] 李光炽,王船海.内涝型流域洪灾洪水模拟[J].成都科技大学学报,1995(1):87-95.
[9] 王船海,李光炽.流域洪水模拟[J].水利学报,1996(3):44-50.
[10] 程文辉,王船海,朱琰.太湖流域模型[M].南京:河海大学出版社,2006:133-136.

Numerical simulation of runoff yield and confluence in plain area

WANG Chuan-hai , WANG Juan , CHENG Wen-hui , ZHU Yan
(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China*)

Abstract : Based on the complex variation of underlying surfaces and non-uniform distribution of sub-areas in plain area , the area was classified into 4 kinds of underlying surfaces , i. e. the water surface , the paddy field , the arid land , and the land for urban construction . Then different runoff models and confluence processing patterns were adopted according to different characteristics of confluence inside and outside of polders . The feasibility and effectiveness of this simulation method were verified by case study on the test region of the Taihu Lake Basin .

Key words : runoff yield and confluence ; plain area ; polder ; river net polygon