

# 基于 MODCYCLE 分布式水文模型的区域产流规律

张俊娥, 陆垂裕, 秦大庸, 郭迎新, 葛怀凤

(中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100038)

**摘要:** 为了分析区域产流时空变化规律以及不同下垫面的产流特征, 采用了具有物理机制的分布式水文模型——MODCYCLE 模型, 并以天津市为例进行深入研究。该模型在综合考虑土壤、下垫面条件、降雨条件等多方面因素的基础上, 采用修改后具有地表积水机制的 Green-Ampt 方程计算产流量。计算结果表明, 1) 1997—2004 年天津市 8 a 平均总产流系数约为 16%, 其中陆面产流系数不足 10%。2) 陆面产流主要集中在北部山区、中心城区及东部沿海地区; 水面产流主要集中在中部及东南部地区。3) 陆面产流中城市区产流系数最大, 8a 平均为 44.1%; 农村居民地的产流系数也较大, 为 24.5%; 天然林草和河滩地的产流系数不足 10%, 农田由于田埂的作用几乎不产流。

**关键词:** 产流, 模型, 试验, MODCYCLE 模型, 分布式水文模型, Green-Ampt 方程, 地表积水机制, 天津市

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.04.012

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-04-0065-07

张俊娥, 陆垂裕, 秦大庸, 等. 基于 MODCYCLE 分布式水文模型的区域产流规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 65—71.

Zhang Jun'e, Lu Chuiyu, Qin Dayong, et al. Regional runoff study based on MODCYCLE distributed hydrology model [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 65—71. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

降水入渗产流是“四水”转化研究的中心课题之一<sup>[1]</sup>。20 世纪以来, 入渗与产流研究取得了长足进展。研究内容主要包括对产流影响因素、产流机制和降水产流规律等方面的研究。降雨产流的主要影响因素包括降雨因素、土壤特性和下垫面特征等<sup>[1-3]</sup>, 特别是在下垫面条件(或土地利用类型)及土壤特性对产流的影响方面做了大量的研究<sup>[4-9]</sup>。目前较常见的产流机制有蓄满、超渗以及二者相结合的综合产流机制<sup>[1,10-12]</sup>, 对产流规律的分析都是在此基础上进行的。对流域/区域产流规律的分析主要采用 2 种方法: 试验和模型。试验是科学研究的重要手段, 通过野外模拟降雨等试验得到了一些不同条件下的产流规律<sup>[13-19]</sup>, 但是仅可以说明单点或者小流域上的情况, 难以将其使用在降雨空间分布不均匀的情况中, 并且在径流、入渗、土壤水分运动的内在联系等方面也考虑不够<sup>[1]</sup>。具有物理机制的分布式水文模型能够识别和再现区域水循环的全过程, 综合考虑土壤、下垫面条件、降水条件等多方面的因素, 在产流机理的指导下能够反演不同条件下的降水产流规律及空间分布特征。本文将利用中国水科院水资源所近期针对强人类活动地区, 尤其是农田系统, 开发的分布式水文模型——MODCYCLE 模

型, 以天津市为例, 通过分析空间分布特征及不同下垫面条件下的产流特点揭示区域降水产流规律。

## 1 MODCYCLE 模型简介

MODCYCLE (an object oriented modularized model for basin scale water cycle simulation) 模型为一个全新的分布式水文模型, 与其他分布式水文模型相比, 具有以下几方面的特点: 1) 以 C++ 语言为基础, 通过面向对象(OOP)的方式完全模块化开发, 利于扩展; 2) 以数据库作为输入输出数据管理平台, 便于操作; 3) 利用面向对象模块化良好的数据分离/保护技术, 可实现水文模拟的并行运算, 大幅提高计算效率; 4) 具有较为完善的水量平衡校验机制, 可为用户和模型开发者提供使用和开发上的诸多便利; 5) 物理性与概念性相结合, 既能合理刻画自然水循环过程, 又能灵活实现复杂人工用水过程的模拟。

MODCYCLE 模型是以日为计算步长的水文模型, 适合于长时间尺度的区域/流域水量平衡模拟分析。模型的模拟结构及水循环路径分别见图 1 和图 2。首先需要根据数字高程(DEM)把区域/流域划分为不同的子流域, 并形成由各子流域主河道组成的模拟河网。子流域之间通过主河道和水库的级联关系构建全流域空间上的水分传输关系。在各子流域内部, 先按水面域和陆面域进行一级划分, 除主河道和水库之外的水面域概化为子流域内的滞蓄水体(湖泊/湿地), 陆面域则根据子流域内土地利用分布、土壤分布的空间差异和土地管理方式的不同进行归类, 并按“马赛克法”<sup>[20]</sup>二级划分为多个基础模拟单元, 如裸地单元、农田单元、居工地单元、草地/林地单元等。基础模拟单元在模型中用一维土柱进行土壤

收稿日期: 2010-12-01 修订日期: 2011-03-31

基金项目: 国家“973”计划(2006CB403401); 基金委创新研究群体基金(51021006); 国家自然科学基金(50809076); 国家自然科学基金重点基金(40830637); 国家科技支撑计划(2006BAB04A16)

作者简介: 张俊娥(1981—), 女, 山东德州人, 博士生, 主要从事水文与水资源及水循环模拟研究。北京 中国水利水电科学研究院水资源所, 100038。Email: zh\_june@sohu.com; zh-june@163.com

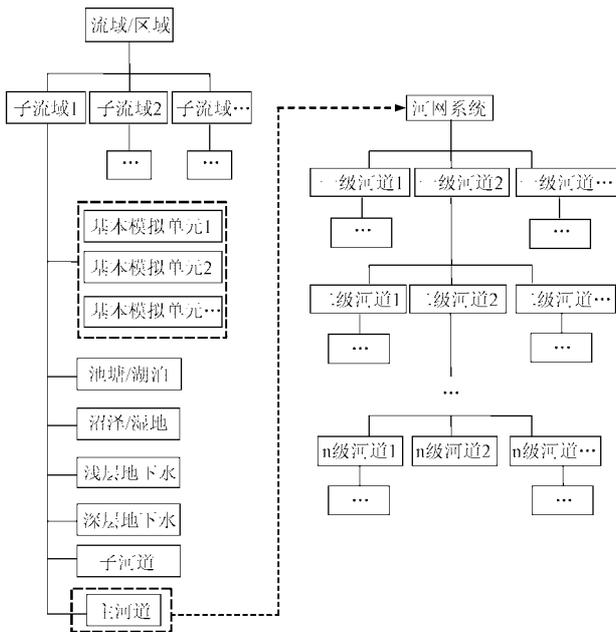


图1 MODCYCLE 模型模拟结构示意图

Fig.1 Simulation configuration on MODCYCLE model

水模拟，并考虑植物生长和壤中流等过程。在子流域的土壤层以下，将子流域的地下水系统分为潜水含水层和承压含水层进行模拟，并考虑其与滞蓄水体、河道水、土壤水的水量交换。

1.1 MODCYCLE 模型模拟的主要过程

MODCYCLE 模型对水循环过程的模拟充分体现“自然-社会”二元特性。描述的自然水循环过程中的大气过程主要包括降水、积雪、融雪、积雪升华、冠层截留、截留蒸发等；地表过程主要包括地表积水、积水蒸发、地表产流、坡面汇流、河道汇流、湖泊/湿地漫溢出流、水面蒸发、河道渗漏、湖泊/湿地水体渗漏等；土壤过程主要包括产流/入渗、土壤水下渗、土壤蒸发、植物蒸腾、壤中流等；地下过程主要包括渗漏补给、潜水蒸发、基流、浅层/深层越流等。本文着重介绍模型中对降水-入渗/产流过程的刻画。

1.2 产流模拟方法

产流/入渗过程通过 Green-Ampt 方程<sup>[21]</sup>进行模拟，但加入了地表积水控制。Green-Ampt 方程用来模拟土层表面存在超渗雨量时的入渗过程。假设土壤为均质，而且

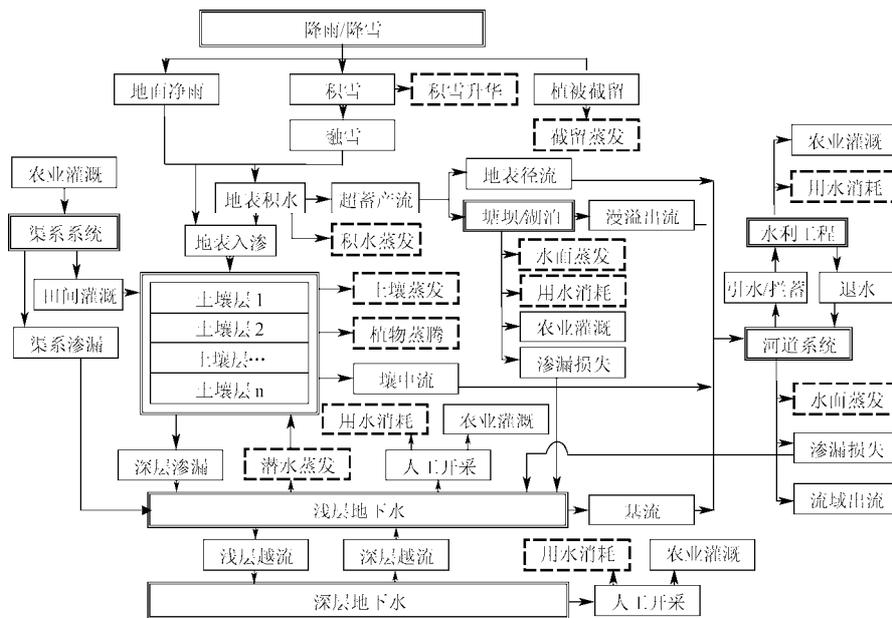


图2 MODCYCLE 模型水循环路径示意图 (虚线框表示蒸发消耗量)

Fig.2 Hydrological cycle path on MODCYCLE model (Imaginary line box means evaporation and transpiration)

前期含水率均匀分布在土壤剖面中，当水分入渗到土壤中时，模型假设湿润峰以上的土壤都是完全饱和的，并在湿润峰处将土壤含水率分布截然分开。

Green-Ampt 方程中时段内累计入渗量计算公式如下：

$$F_{inf,t} = F_{inf,t-1} + K_e \Delta t + \psi_{wf} \cdot \Delta \theta_v \ln \left[ \frac{F_{inf,t} + \psi_{wf} \cdot \Delta \theta_v}{F_{inf,t-1} + \psi_{wf} \cdot \Delta \theta_v} \right] \quad (1)$$

式中， $F_{inf,t}$  为当前时刻的累计入渗量，mm； $F_{inf,t-1}$  为前一时刻的累计入渗量，mm； $K_e$  为有效水力传导度，mm/h； $\Delta t$  为计算时段，d； $\psi_{wf}$  为湿润峰处的土壤水负压，mm； $\Delta \theta_v$  为湿润峰两端的土壤含水率差值，mm/mm。

上式中方程左右两端都有未知数  $F_{inf,t}$ ，可通过迭代求解方法进行计算。

从以上 Green-Ampt 方程可以发现，该方程并未考虑地表积水过程，影响地表产流量的控制因素主要是降雨/灌溉强度和地表的入渗能力，只要地表产流，就认为是有效的地表径流，这也是目前多数应用该方程的水文模型的通常做法。在现实情况下由于下垫面因素的复杂性，地表发生积水的现象很常见。自然情况下地表存在小的坑洼，树根、枯枝对地面径流的阻滞等，都具有一定的地表滞蓄作用。特别在人类活动区如农田，一般都有田埂存在，更是具有较强的积水能力。在降雨/灌溉能力超出土壤入渗能力时，地表虽有自由水产生，但不能形成

径流, 而是通过地表积水的形式存在。随着积水深度的增加, 在超出地表滞蓄能力之后才开始产流。

为刻画积水过程, 模型中设置地表的最大积水深度参数, 作为影响入渗量的重要参数, 只有当地表的积水深度超过地表最大积水深度时才能形成地表产流。因此原地表产流公式在 MODCYCLE 模型中被修正为地表积水公式:

$$Pnd_{day} = Pcp_{day} + Irri_{day} - F_{int,day} \quad (2)$$

式中,  $Pnd_{day}$  为当天末的潜在积水量, mm;  $Pcp_{day}$  为当天降水量, mm;  $Irri_{day}$  为当天灌水量, mm;  $F_{int,day}$  为当天累计入渗量, mm。

当天的地表产流量  $R_{day}$  的计算通过地表最大积水能力判断。

$$\begin{cases} R_{day} = Pnd_{day} - Pnd_{mx} & Pnd_{day} > Pnd_{mx} \\ R_{day} = 0 & Pnd_{day} \leq Pnd_{mx} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $Pnd_{mx}$  为地表的最大积水能力, mm; 其他符号意义同前。

在计算完当天的地表产流量后, 当天的地表积水量可计算为:

$$\begin{cases} Pnd'_{day} = Pnd_{mx} & Pnd_{day} > Pnd_{mx} \\ Pnd'_{day} = Pnd_{day} & Pnd_{day} \leq Pnd_{mx} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $Pnd'_{day}$  为当天末的地表的实际积水量, mm; 其他符号意义同前。

当天在地表没有入渗的水量  $Pnd'_{day}$  将与次日的地表降雨、灌溉量一起作为地表潜在入流量继续模拟地表入渗过程。

目前多数水文模型通常不考虑地表积水因素的影响, 本模型通过考虑对积水机理和积水过程的刻画, 可使入渗/产流模拟更加贴近实际情况。

### 1.3 日降水的时间展布

模型计算尺度为日, 所以输入日降水数据即可, 但由于其产流过程采用 Green-Ampt 方法进行模拟, 因此需要对日降雨进行日内分布。在模拟期间, 日尺度降雨数据将通过双指数函数的方法按 0.5 h 的时段大小进行随机分布。

日降雨量必须分配到当天中的某个时段, 分配方法通过双指数函数进行。假设降雨强度随着时间指数增长到峰值, 然后指数衰落到降雨结束。在一次降雨事件中, 分布函数形式如下:

$$i(T) = \begin{cases} i_{mx} \cdot \exp\left[\frac{T - T_{peak}}{\delta_1}\right] & 0 \leq T \leq T_{peak} \\ i_{mx} \cdot \exp\left[\frac{T_{peak} - T}{\delta_2}\right] & T_{peak} < T < T_{dur} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $i$  为  $T$  时刻的降雨强度, mm/h;  $i_{mx}$  为降雨强度的峰值, mm/h;  $T$  为降雨开始后的时间, h;  $T_{peak}$  为从 0 开始到降雨峰值到达的时间, h;  $T_{dur}$  为降雨持续时间, h;  $\delta_1$  和  $\delta_2$  为方程因子, h。

## 2 天津市 MODCYCLE 模型构建与验证

天津市位于华北平原东北部、海河流域下游, 北依燕山, 东临渤海, 素有“九河下梢”之称。地理坐标介于  $N38^{\circ}33'57'' \sim 40^{\circ}14'57''$ ,  $E116^{\circ}42'05'' \sim 118^{\circ}03'31''$  之间, 全市总面积 11919.7 km<sup>2</sup>, 其中平原占 93.9%, 山区和丘陵占 6.1%。属暖温带半湿润大陆性季风型气候, 多年年平均气温在 12℃ 左右; 多年平均降水量 574.9 mm, 由北向南递减; 多年平均蒸发能力约 900~1200 mm, 由北向南递增; 干旱指数为 1.20~2.08。流经天津市行洪河道 19 条, 排涝河道 79 条, 分属海河流域的北三河(蓟运河、潮白河、北运河)水系、永定河水系、大清河水系、海河干流水系、黑龙港运东水系和漳卫南运河水系。另外, 由于引滦入津工程的修建, 滦河成为天津市的重要供水水源。天津市共有大型水库 3 座, 中型水库 12 座。

### 2.1 输入数据

模型模拟时间为 1997—2004 年, 计算尺度为日。输入数据主要包括以下几部分: 1) 基础空间数据: 主要包括天津市行政区划图、2000 年遥感图、数字高程图(DEM)(90 m)、数字水系图(1:25 万)、2000 年土地利用类型图(1:10 万)及土壤类型图(1:100 万)等。2) 水文气象数据: 10 个国家气象站点的实测逐日气象数据(包括降水、气温、风速、太阳辐射量和相对湿度); 26 个天津市雨量站的实测逐日降水资料; 7 个水文站的实测流量等资料。3) 供用水数据: 1997—2004 年天津市各区县农业、工业和生活年用水数据及取水水源等。4) 作物相关参数: 各区县农作物种植结构、耕作制度、灌溉制度等。5) 水库参数: 模型中的水库分为两类, 一类是天津市实有的 15 座大中型水库; 另一类是 25 座河道水库, 模拟河道上的大中型蓄水闸; 模拟水库共计 40 座。主要包括库容、集水面积等基础参数及调度数据。6) 其他数据: 天津市土壤数据库及各种植被参数等。

根据 DEM、数字水系图、土地利用类型图、土壤类型图、区县分布图及各区县种植结构和管理操作将天津市划分为 356 个子流域和 6386 个最小模拟单元。再根据相关资料将实际用水展布到模拟单元上。

### 2.2 模型验证

MODCYCLE 模型具有严格的水量平衡校验机制, 在模拟过程中从最小模拟单元到全流域所有环节都遵守水量平衡原理。除水量平衡验证之外, 结合掌握的资料, 从整个区域水循环角度提出以下几点天津市 MODCYCLE 模型进行了验证: 1) 区域年出境水量及其过程与实测资料接近; 2) 区域蒸发蒸腾量(evaporation and transpiration, 即 ET)及变化过程与遥感 ET 相近; 3) 浅层地下水位变化及过程与实测接近。并利用相关系数法对对比结果进行误差分析。

模型中涉及大量参数, 率定过程中主要考虑其中对水分转化较为敏感的参数, 包括地表最大积水深度、蒸发/蒸腾因子、土壤对植物可利用水量体积比、土壤饱和渗透系数、主河道及子河道渗漏系数、辐射利用效率等。以下是参数率定完成后各检验目标的验证结果。

1) 年出境流量检验

天津市出境河流中除山区沟河流入北京海子水库外其他均注入渤海。将 7 个水文站实测数据作为输入条件控制径流，模拟期内模型模拟与实测出境水量对比见图 3。由对比图可看出，模型模拟与实际观测出境流量的年际变化规律一致，变化规律与降水量年际变化规律相似，二者相关系数达 0.98。从整体模拟效果看，能够满足率定要求。

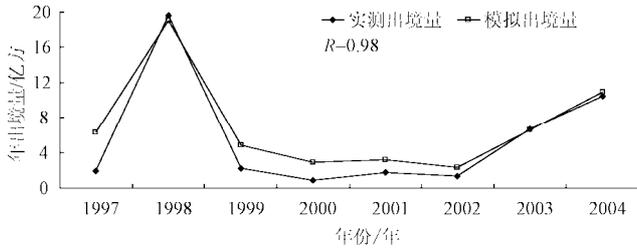


图 3 1997-2004 年模型模拟与实测出境及入海水量对比  
Fig.3 Comparison of simulated and observed yearly outflow from Tianjin

2) ET 检验

将模拟 ET 与 2002-2004 年遥感 ET 对比，结果见图 4~6。由图 4 可以看出，模拟 ET 与遥感 ET 略有差异，遥感得到的 ET 的最大值发生在 2003 年，而模拟 ET 2004 年最大，分析原因，主要是由于二者模拟降水量不同所致，由图 5 可以看出，遥感降水量 2003 年最大，而模拟降水量与《天津市水资源公报》中给出的降水量一致，3a 中 2004 年降水量最大。图 6 说明 2 种方法得出的各月 ET 变化规律基本一致，二者相关系数达 0.95，通过综合分析，认为模型模拟 ET 具有一定的可靠性。

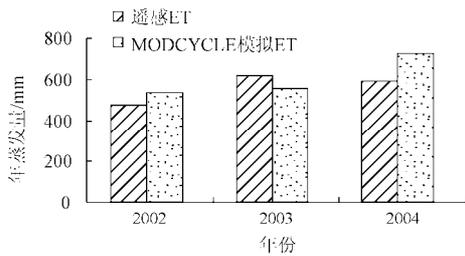


图 4 天津市模拟 ET 与遥感 ET 对比  
Fig.4 Comparison of simulated and remote sensed ET

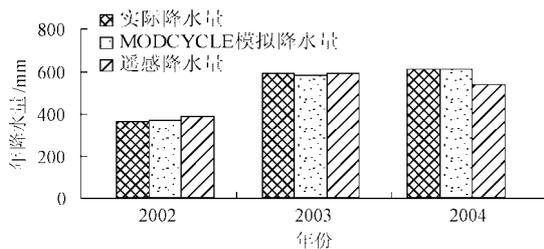


图 5 天津市模拟降水量与遥感降水量对比  
Fig.5 Comparison of precipitations

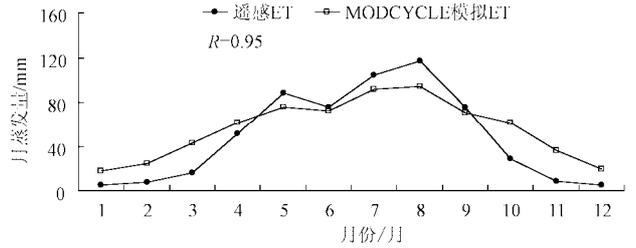


图 6 天津市模拟与遥感 3 年平均各月 ET 量  
Fig.6 Comparison of simulated and remote sensed monthly average ET

3) 地下水水位检验

选用武清区的 13 口浅层地下水观测井埋深数据对模型模拟浅层地下水系统进行校准和验证。通过调整参数，2001-2004 年研究区模拟与实测月平均浅水埋深对比见图 7，从实测和模拟浅层地下水埋深过程的对比来看，在 8a 的模型率定期内，模拟的浅层地下水埋深变化过程与实测数据基本一致，变化曲线吻合较好，二者相关系数为 0.76。

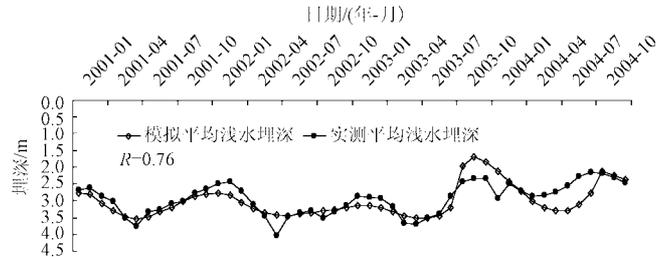


图 7 2001-2004 年武清区模拟与实测月平均浅水埋深  
Fig.7 Comparison of simulated and observed monthly average shallow groundwater depth

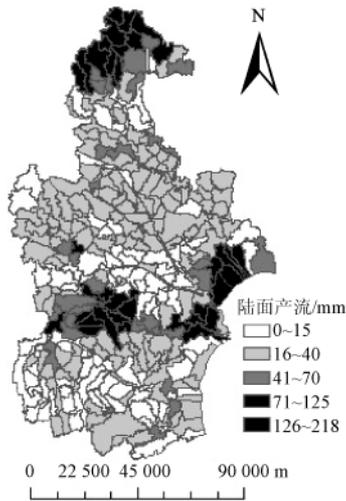
3 结果与分析

模型中按照陆面和水面两大过程分别进行模拟，通过模拟得出：1997-2004 年 8 a 平均情况下，天津市整个区域陆面 47.62 亿 m<sup>3</sup> 的大气降水，形成地表径流 3.08 亿 m<sup>3</sup>、壤中流 0.76 亿 m<sup>3</sup>、地下基流 0.73 亿 m<sup>3</sup>，扣除流入池塘/湿地的 0.45 亿 m<sup>3</sup>，总陆面产流 4.09 亿 m<sup>3</sup>，产流系数为 9.2%；湿地降水-产流系数约为 40%；水库降水-产流系数接近 100%；因此区域 55.01 亿 m<sup>3</sup> 的总降水量，产流 8.79 亿 m<sup>3</sup>，区域总产流系数约为 16%。

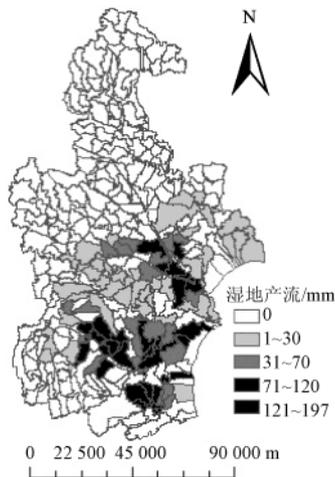
3.1 区域产流空间分布特征分析

天津市区域陆面产流、池塘/湿地、水库以及总产流的空间分布图见图 8a~d。由图 8a 可以看出：陆面产流主要集中在北部山区、中心城区及东部沿海地区，最大产流量为 218 mm，由此也可以看出，天然林草、城市区和沿海海滩地对陆面产流的贡献较大。由图 8b 可以看出：天津市的池塘/湿地产流主要集中在中部及东南部地区，产流量主要集中在 30~200 mm 之间，产流量较小的原因是由于水面蒸发量较大，无外来补水的情况下湿地呈萎缩的趋势。由图 8c 可以看出：从水库产流的空间分布上也可以看出天津市 40 座模拟水库的分布，其中包括 15 座大中型水库和 25 座河道水库，水库产流量集中在 300~

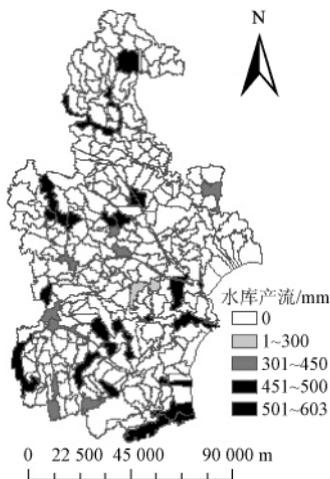
603 mm，产流量远大于湿地产流量。由图 8d 可以看出：天津市整个区域上的产流量介于 50~675 mm 之间，存在较大的空间差异，其中水库产流、北部山区天然林草产流、中部城市区产流及东部沿海河滩地的产流对区域总产流的贡献较大。



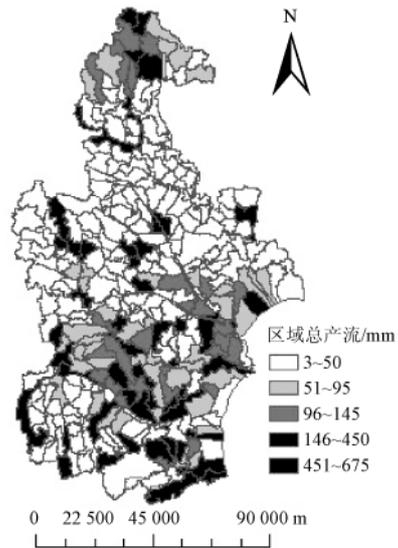
a. 天津市陆面产流空间分布图



b. 天津市池塘/湿地产流空间分布图



c. 天津市水库产流空间分布图



d. 天津市区域总产流空间分布图

图 8 天津市各产流空间分布图

Fig.8 Simulated runoff distribution from region of Tianjin

### 3.2 不同土地利用类型产流特点分析

水面产流特点较明确，水库产流系数近 100%，湿地产流系数约 40%，农田系统由于田埂的作用几乎不产流，以下主要分析陆面上对产流贡献较大的几种土地利用类型上的产流特点。

表 1 为这几种土地利用类型和全区域上的产流系数，由此更能直观的看出几种不同土地利用类型上的产流系数的不同：城市区产流系数最大，8 a 平均产流系数为 44.1%；农村居民地的产流系数也较大，为 24.5%；天然林草和河滩/盐碱地上的产流系数分别为 6.7%和 4.6%。全区陆面上的综合产流系数为 9.2%。

表 1 几种土地利用类型及全区陆面上的降水-产流系数  
Table 1 Runoff coefficient of precipitation from different land use type

|        | %      |       |      |      |      |
|--------|--------|-------|------|------|------|
| 年份     | 河滩/盐碱地 | 农村居民地 | 天然林草 | 城市区  | 全区   |
| 1997   | 2.9    | 15.7  | 6.5  | 38.9 | 6.0  |
| 1998   | 7.2    | 27.2  | 6.6  | 48.6 | 11.9 |
| 1999   | 1.8    | 15.1  | 6.6  | 34.0 | 5.1  |
| 2000   | 5.2    | 26.4  | 6.7  | 46.1 | 8.5  |
| 2001   | 4.1    | 24.2  | 6.7  | 44.4 | 8.5  |
| 2002   | 3.5    | 17.2  | 6.7  | 34.7 | 6.0  |
| 2003   | 6.2    | 34.0  | 6.7  | 51.8 | 12.6 |
| 2004   | 3.5    | 27.4  | 6.8  | 45.3 | 10.6 |
| 8 a 平均 | 4.6    | 24.5  | 6.7  | 44.1 | 9.2  |

### 4 结论

1) 1997—2004 年 8 a 平均天津市陆面产流系数为 9.2%；湿地降水-产流系数约为 40%；水库降水-产流系数接近 100%；区域总产流系数约为 16%。其中陆面产流占总产流的 47%，水面产流占总产流的 53%，水面产流相对较大，主要是由天津市处于海河流域入海处，水面面积所占比例较高所致。

2) 天津市不同土地利用类型上的产流存在较大的空间差异, 陆面产流主要集中在北部山区、中心城区及东部沿海地区; 池塘/湿地产流主要集中在中部及东南部地区; 水库产流区分布较分散, 主要集中在水库所在的区域。

3) 1997—2004年间天津市陆面产流中城市区产流系数最大, 8 a 平均产流系数为 44.1%; 农村居民地的产流系数也较大, 为 24.5%; 天然林草和河滩/盐碱地上的产流系数分别为 6.7% 和 4.6%, 农田系统产流最少, 由于田埂的作用几乎不产流。

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘贤赵, 康绍忠. 降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述[J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 57—62.  
Liu Xianzhao, Kang Shaozhong. Some developments and review of rainfall-infiltration-runoff yield research[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1999, 19(2): 57—62. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杨晓俊. 降雨产流影响因素分析[J]. 地下水, 2007, 29(5): 50—51.
- [3] 沈冰. 国外产流研究简介[J]. 水文, 1987, 3: 54—60.
- [4] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46—50.  
Li Yuyuan, Shao Ming'an. Impact of tillage on water transformation and runoff-sediment-yielding characteristics on slope land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1): 46—50. (in Chinese with English abstract)
- [5] 闵雷雷, 于静洁. 土壤斥水性及其对坡面产流的影响研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 29(7): 855—860.  
Min Leilei, Yu Jingjie. Progress in the research of soil water repellency and its influences on overland flow generation[J]. Progress in Geography, 2010, 29(7): 855—860. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 5—8.  
Hao Fanghua, Chen Liqun, Liu Changming, et al. Impact of land use change on runoff and sediment yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [7] 朱超洪, 李仁东. 洞庭湖区土地利用变化对地表产流的影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 566—569.  
Zhu Chaohong, Li Rendong. Impact of land use change on runoff-yield of Dongting-Lake area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2005, 14(5): 566—569. (in Chinese with English abstract)
- [8] 宋孝玉. 黄土沟壑区不同下垫面条件对农田降雨入渗及产流关系影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.  
Song Xiaoyu. The Influence on Natural Rainfall-Infiltration-Runoff Under Different Underlayer Surface Condition in Farmland of Loess Hilly Areas[D]. Yang Ling: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王栋. 长江三峡库区不同植被类型对降雨产流影响的研究——以重庆缙云山为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.  
Wang Dong. Research of Different Vegetations Types Affect Runoff Process in the Three-Gorges Area of Yangtze River——Sampled in Jinyun Mountain, Chongqing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李长兴, 范荣生, 李占斌. 流域产流理论研究进展[J]. 西北水资源与水工程, 1994, 5(4): 1—6.  
Li Changxing, Fan Rongsheng, Li Zhanbin. The progresses in theoretical study of catchment runoff generation[J]. Water Resources and Water Engineering, 1994, 5(4): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [11] 芮孝芳. 关于降雨产流机制的几个问题的讨论[J]. 水利学报, 1996, (9): 22—26.  
Rui Xiaofang. Discussion of some problems on mechanism of runoff yield[J]. Journal of hydraulic engineering, 1996, (9): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [12] 芮孝芳, 姜广斌. 产流理论与计算方法的若干进展及评述[J]. 水文, 1997, (4): 16—20.  
Rui Xiaofang, Jiang Guangbin. Some development of the theories and computational methods in runoff yield[J]. Journal of China Hydrology, 1997, (4): 16—20. (in Chinese with English abstract)
- [13] 肖登攀, 韩淑敏, 杨艳敏, 等. 太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 35—39.  
Xiao Dengpan, Han Shumin, Yang Yanmin, et al. Study on rainfall-infiltration-runoff under typical ground surfaces conditions in the hilly regions of taihang mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [14] 狄丕勋. 平原区降雨产流试验与机理研究[J]. 水文, 2007, 27(5): 61—64.
- [15] 宫渊波, 张君, 陈林武, 等. 嘉陵江上游不同植被类型小流域典型降雨产流特征分析[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 35—39.  
Gong Yuanbo, Zhang Jun, Chen Linwu, et al. Characteristic of typical rainfall-runoff on different vegetation types in the river basin in the upper jialing river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2): 35—39. (in Chinese with English abstract)
- [16] 宋孝玉, 李永杰, 陈洪松, 等. 黄土沟壑区不同下垫面条件农田降雨入渗及产流规律野外试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(4): 65—71.  
Song Xiaoyu, Li Yongjie, Chen Hongsong, et al. A field experiment study on farmland rainfall, infiltration and runoff under different underlayer surface conditions in hilly areas of loess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(4): 65—71. (in Chinese with English abstract)
- [17] Yu Jingjie, Yang Cong, Liu Changming, et al. Slope runoff study in situ using rainfall simulator in mountainous area of North China[J]. J. Geogr. Sci, 2009, 19 (4): 461—470.
- [18] 岑国平, 沈晋, 范荣生, 等. 城市地面产流的试验研究[J]. 水利学报, 1997, (10): 47—52.  
Cen Guoping, Shen Jin, Fan Rongsheng, et al. Experimental

- study on urban surface runoff yield[J]. Journal of hydraulic engineering, 1997, (10): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [19] 孙飞达, 蒋志荣, 王立. 不同降雨强度下农地的产流产沙研究[J]. 甘肃科学学报, 2005, 17(1): 53—56.  
Sun Feida, Jiang Zhirong, Wang Li. Study on sediment and yield runoff of farmlands under different intensities of rainfall[J]. Journal of Gansu Sciences, 2005, 17(1): 53—56. (in Chinese with English abstract)
- [20] 贾仰文, 王浩, 严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟(I)——模型开发与验证[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 534—542.  
Jia Yangwen, Wang Hao, Yan Denghua. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe River basin I. Model development and Verification[J]. Journal of hydraulic engineering, 2006, 37(5): 534—542. (in Chinese with English abstract)
- [21] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Sciences 1911, 4: 11—24. (in Chinese with English abstract)

## Regional runoff study based on MODCYCLE distributed hydrology model

Zhang Jun'e, Lu Chuiyu, Qin Dayong, Guo Yingxin, Ge Huaifeng

(Department of Water Resources in China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to analyze temporal and spatial variation law and distributed features of regional runoff on different underlying surface, MODCYCLE model, which is a distributed hydrology model with physical mechanism and recently developed by department of water resources in IWHR, was used in a case of study of Tianjin. On the base of considering the soil, land use and precipitation characteristics, MODCYCLE model applied the revised Green-Ampt equation with pond water system to calculate runoff. Results showed that: 1) Average runoff coefficient was about 16% on whole region between 1997 and 2004 in Tianjin, but the coefficient on land area was less than 10%. 2) The runoff on land area was mainly focused on northern hilly, central urban area, and eastern coastal regions, but the runoff on water was mainly focused on central and southeast areas. 3) Between coefficients of some parts on land area, the coefficient of urban area was biggest, up to 44.1%, the coefficient of residential-low density area was also bigger, as 24.5%, but coefficients of forest and grass were less than 10%, the farm land had almost no runoff because of the field ridge.

**Key words:** runoff, models, experiments, MODCYCLE model, distributed hydrology model, Green-Ampt, pond water system, Tianjin