

山前平原地下水侧向补给潜力空间变异模拟

黄 涛,雷玉平,郑 力

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源中心,河北 石家庄 050021)

摘要 SWAT 模型利用分辨率较高的 DEM 数据,可以估算山前地下水侧向补给的空间变异,并可以计算不同降水年型下补给量的差别。模拟需要对研究区进行填注、流向确定、汇流和河网水系的提取四步运算,并对河道临界支撑面积的取值进行分析。分别模拟了平水年和丰水年两种降雨年型下研究区 13 个出水口的地下水侧向补给潜力。在研究区,由于地形的变化,导致山与平原交接断面上出水口的集水面积变异非常大,因此山前平原所接受的地下水侧向补给量的空间变异也非常大。不同的降雨年型下,降雨量转化为地下水侧向补给量的比例也不同。平水年的转化比例较小,丰水年的转化比例较大。应用 SWAT 模型时,与 ArcView 的拓展模块有机结合,可以更方便提取完整的大流域,划分出合理的子流域。

关键词 地下水 ;侧向补给 ;集水面积 ;SWAT 模型

中图分类号 P641.8 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2006)04-0016-04

Spatial variation simulation of lateral recharge potential of groundwater in piedmont regions

HUANG Tao, LEI Yu-ping, ZHENG Li

(Center of Agricultural Resources, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract Based on the high-precision DEM, the SWAT model can be used to simulate groundwater lateral recharge in the piedmont regions, and to compute the recharges for years of different precipitations. In the simulation, the following steps must be carried out: sink filling, flow direction determination, flow accumulation, river network extraction, and the analysis of CSA value. The groundwater lateral recharges of thirteen outlets in the research area in normal year and wet year were studied respectively. The water catchment area of the outlet in the connection sections of mountain and plain differs greatly because of the change of topography, thus the spatial variation of groundwater lateral recharge in the piedmont regions is obvious. The rate of precipitation transforming into groundwater lateral recharges is different in different precipitation years, which is large in wet year and small in normal year. The combination of SWAT model with the extended module of ArcView is successful for the extraction of a whole basin and the rational division of sub-basins.

Key words groundwater ; lateral recharge ; water catchment area ; SWAT model

地下水是华北地区生产生活用水最重要的水资源。由于过量开采,自 20 世纪 80 年代以来,地下水位以年均 1 m 的速度下降,引发了一系列社会和生态问题^[1],因此更深入地研究该地区的地下水补给问题对水资源的可持续利用意义重大。地下水的侧向补给(或称侧向径流补给)是地下水补给的重要组成部分,是地下水在一定时间内沿水平方向通过

过水断面的水量。目前水利和水文勘察部门进行区域地下水资源评价所采用的侧向补给量计算模型为达西公式,主要参数包括计算断面上的水力坡度、土层厚度和含水层的水平渗透系数。由于以上参数空间和时间变异都非常大,难以在大范围内获得较精确的参数,因此该模型很难准确计算补水的空间变异。陈旭光等^[2]在计算天山北麓中段山区侧向补给

时采用的是水量平衡方法,并假设河道入渗水和渠系下渗水全部转化为地下水侧向补给量,该方法有无法控制参数空间变异的局限。SWAT 是近年来在国内外广泛应用的流域分布式水文模型,由于它在计算径流时可以充分考虑区域的异质性包括地形的影响,因此可以较准确地模拟主要由于地形变化引起的径流空间的走向与分布。本文尝试利用 SWAT 模型这一功能,计算太行山与平原交接地带出水口的集水面积,从地下水补给水源上角度来估算地下水侧向补给的空间变异。

1 研究背景

1.1 自然概况

研究区总体地形西高东低,西部是太行山山区,东部是河北平原,中部是山地平原过渡带。属于半干旱温带大陆性季风气候,年均降雨量 492 mm。模型计算范围为 114.05°E ~ 114.50°E,37.2°N ~ 38.1°N,面积为 2076 km²,海拔 100 ~ 1600 m,主要包括河北省元氏县、赞皇县和临城县境内的太行山区及山麓平原。

1.2 水文地质状况

太行山区部分,主要以花岗片麻岩为主,另有少量的石灰岩区,其中花岗片麻岩区基岩裂隙比较发育,因而地下水以裂隙水为主。山前平原区以冲积和洪积为主,由多层交迭、纵横交错的砂砾石层构成第四纪含水岩系。该地区第四系含水层粒度自上而下变化为细-粗-较细,可分为四个含水组,反映第四系以来径流呈弱-强-较弱的变迁过程,地下水的侧向补给主要发生在前两个含水组^[3]。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型简介

SWAT 模型是在 SWRRB 模型的基础上发展起来的长时段的流域分布式水文模型^[4]。从模型结构看,SWAT 属于第二类分布式水文模型,即在每一个网格单元(或子流域)上应用传统的概念性模型来推求净雨,再进行汇流演算,最后求得出出口断面流量^[5]。已经有不少研究者成功地将该模型应用于多种地貌类型,如王中根等^[6]将该模型用于黑河流域的径流量的模拟。

2.2 数据和参数处理

SWAT 模型需要的输入数据可分为四部分:①DEM 数据;②土地利用和土壤类型数据;③气象资料;④管理、耕作、施肥等数据。本文所采用的数据是 1:5 万的 DEM 图,土地利用与土壤类型数据来源是 2003 年 5 月 7 日和 2003 年 5 月 23 日 Landsat 卫星图像,利用 PCI 遥感图像处理软件进行处理,最

后得到土地利用/土壤类型图。为了明确简洁地将地下水侧向补给与集水面积关系表达出来,对研究区部分土壤特性进行了均一处理:土层最大厚度设为 20 mm,土壤质地的砂、黏土的比例设为 65% 和 9%。本文模拟了平水年和丰水年两种降雨年型下的侧向补给状况。气象资料采用的是平水年 1999 年(平均降雨量 492 mm)和丰水年 1993 年(平均降雨量 695 mm)的元氏县、赞皇县、临城县的县级气象站的降雨量和气温数据。管理、耕作、施肥参数采用 SWAT 模型的缺省值。根据研究区的总的土壤湿度状况以及地表产流状况,设定了降雨-径流曲线号。本文假设研究区地表流域系统和地下流域系统一致。

2.3 集水面积及地下水侧向补给潜力的求算

ArcView 水文分析和空间分析拓展模块的优点是能够提取出完整的大流域,缺点是划分子流域的结果不够理想。SWAT 模型中的 MASK 的优点是能够较好地划分子流域,缺点是提取大流域时有时不够完整。本文将 SWAT 模型和 ArcView 拓展模块结合,先在 ArcView 中提取出完整的大流域,然后在 SWAT 模型中进行子流域的划分。集水面积的计算经过填洼、流向确定、汇流、河网提取四步,前三步在 ArcView 中完成,第四步在 SWAT 模型中完成。“填洼”是通过调整网格的高程,处理当某网格周围的高程值都高于该网格时,水流不能继续向前流动的问题。“流向确定”的方法是在 DEM 中把二维的无穷流向简化成八个流向来对应于周围相邻的八个空间点,并按照最陡坡度原则使水流向下一个单元格流动。“汇流”计算全流域空间汇流的相关参数。当整个流域的面积较大时,根据每个栅格所对应的集水面积大小,分别把栅格定义为陆地坡面或河道。河网水系提取后,再进行子流域的划分并计算每个子流域的面积,进而得到出水口的集水面积。

3 研究结果

3.1 河网提取及临界支撑面积取值分析

临界支撑面积(Critical Support Area,简称 CSA)为支撑一条河流永久性存在所需要的最小汇水面积。SWAT 模型从 DEM 图中提取河网时,分析 CSA 值对提取数字水系总长度的影响来确定适宜的 CSA 取值。CSA 取值较小,划分的子流域的个数就较多,模型输出结果也较精确,但同时模型运行的时间也较长,而且数据量过多,最后的统计分析也比较繁琐。由于研究区流域面积较大,子流域和出水口较多,SWAT 模拟时难以一次模拟成功,需要根据出水口(Subwatershed)分块进行模拟,计算量很大,所以确定 CSA 的原则是在不明显影响模型输出结果的

前提下,尽量选取较大 CSA 值。本文通过在 SWAT 模型 CSA 建议值附近以不同的 CSA 值计算所对应的数字水系总长度,并得出数字河网总长度与 CSA 关系曲线,再依据曲线优化 CSA 值(图 1)。对本研究区,SWAT 模型给出的 CSA 建议值是 2 400 hm²,即 24 km²,此时提取的河网总长度是 55 km,但从图 1 可以看出,当 CSA 取值为 36 km² 时,所提取的河网总长度是 51 km,与取建议值 24 km² 时相差很小,因此本文 CSA 值采用 36 km²。CSA 增大后,模型运行速度大大提高,但 CSA 值如超过 36 km²,除了影响模拟精度以外,还会导致模型不能对某些面积较小的模拟区进行正常计算。

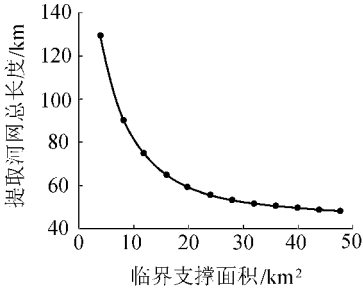
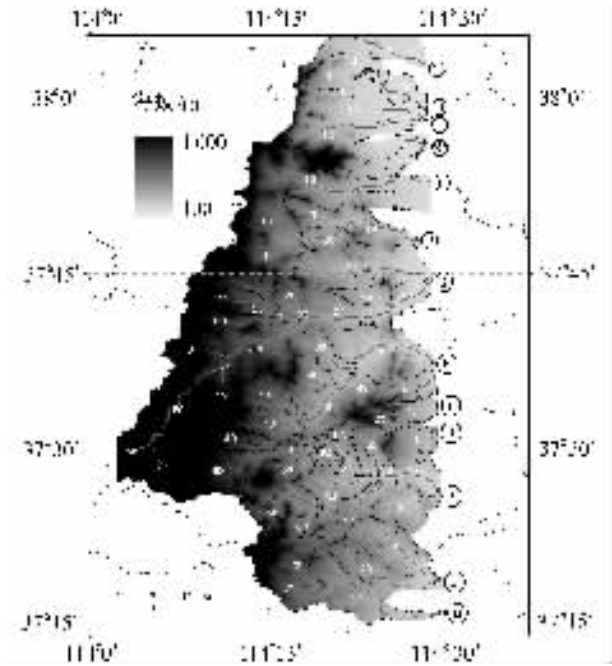


图 1 数字河网总长度与河道临界支撑面积关系

研究区经过以上的分析处理后,就可将子流域划分出来,与县行政区边界叠加,如图 2 所示。由图 2 可以看到,元氏县和赞皇县的西部以及临城的西南部都是以太行山山脊线作为县界的。图 2 中所显示的河道为根据临界支撑面积所提取出来的河道,虽然有的子流域(如子流域 45)河道非常短,甚至只表现为一个出水口点,说明在该子流域内可以达到



图中数字为子流域编号,字母为流域出水口编号

图 2 研究区子流域划分及河流主干道

河流的临界支撑面积的栅格非常少,这种子流域往往比较平坦。

表 1 按照出水口编号列出了其相关属性特征(对距离较近的出水口进行了合并)。

表 1 根据出水口编号划分的流域属性特征

出水口 编号	子流域 个数	集水面积/ km ²	出水口 编号	子流域 个数	集水面积/ km ²
A	1	57.9	H	8	270.7
B	5	87.7	I	1	36.4
C	3	121.9	J	2	38.9
D	3	54.8	K	14	430.9
E	1	121.7	L	3	105.3
F	5	165.7	M	3	125.4
G	18	517.5			

研究区总面积为 2 134.8 km²,按照出水口所划分出的亚流域的平均面积为 164.2 km²,亚流域面积大小悬殊。

3.2 地下水侧向补给空间变化

本文的地下水侧向补给量为 100 m 等高线附近出水口断面的径流量。由于研究区内裂隙发育,地表径流通过下渗大部分转变为地下径流,因此本文的地下水侧向补给潜包括了由地表径流转化而来的径流量。SWAT 模型没有直接输出断面径流量,但利用模型输出结果中的相关量可以计算侧向补给量。断面径流量(侧向补给量)计算公式:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \tag{1}$$

式中: Q_1 为运移损失是水文响应单元的河道里的水通过河床渗漏损失掉的水量。这一部分水量全都补给到了潜水层中; Q_2 为一定的时间范围内所有由根区底部下渗到潜水层和承压水层的水量; Q_3 为由于根区水分的亏缺从潜水层返回根区的水量。

从补给潜力的空间变异来看,研究区中部即 37.72°N 附近补给量最大,平水年该地区的单宽补给量达 8 m³/s,丰水年达 12.7 m³/s。两端地区补给量相对较小。37.55°N 出水口 G 附近的平水年单宽补给量为 0.3 m³/s,丰水年为 0.4 m³/s。

研究区平水年平均补给量为 1.56 m³/s,丰水年为 2.75 m³/s。

从图 2,3 可以看到这样的规律:①一个出水口所对应的源头子流域个数越多(如出水口 G),那么它的子流域总个数就越多,集水面积就越大,地下水的侧向补给量也就越大;一个出水口所对应的源头子流域个数越少,那么它的子流域总个数就越少,集水面积就越小,地下水的侧向补给量也就越小。②源头子流域的海拔越高,地下水侧向补给量就越大,源头子流域的海拔越低,地下水侧向补给量就越小。从模拟得到的结果可知,虽然有些子流域的一

部分位于三县县界以外(如子流域 16),但只要该子流域的最终出水口位于县界内,那么该子流域就属于该县的地下水侧向补给的集水区。再如子流域 49 虽然有较大部分位于赞皇县,但其出水口位于临城县,所以它只对临城县的地下水侧向补给有贡献。

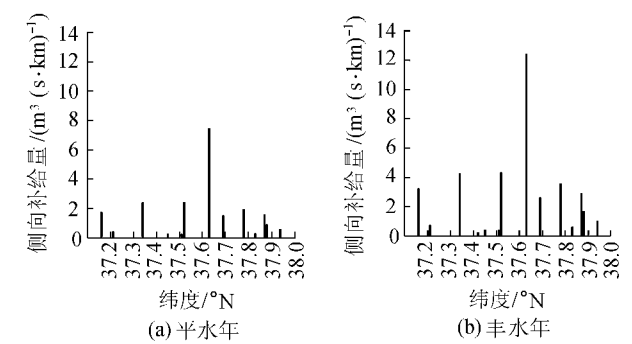


图 3 太行山山前平原平水年和丰水年地下水侧向补给潜力

3.3 不同降水年型侧向补给量的变化

图 3 为平水年和丰水年两种降水年型下,100 m 等高线附近出水口断面的地下水侧向补给潜力在南北方向上的变化示意图。分两次先后模拟了平水年年降雨量 492 mm 状况下和丰水年年降雨量 695 mm 状况下的地下水侧向补给量的情况。本文沿 100 m 等高线共采集了 13 处数据。将得到的这 13 处数据分别除以出水口所对应的侧向补给断面的长度,就可得到单位长度地下水侧向补给量。对于侧向补给断面长度的测算,本文采用的方法是先利用 Arcmap 作出地下水流场图,进而确定补给断面,然后利用 Arcmap 中的测量工具得到断面的长度。

对比丰水年和平水年的模拟结果可以发现:

- ①地下水侧向补给潜力的空间变化趋势是一致的,各个出水口侧向补给潜力的倍比关系没有太大变化。
- ②年降雨量虽然只是原来的 1.4 倍,但地下水侧向补给量要高于 1.4 倍,大约为 1.8 倍。其原因为 ①1993 年阴雨天较多,因而蒸发较弱,径流量较大。
- ②对于每一次降雨,降雨的前半期主要是消耗于冠层截留和填洼等,后半期主要用于形成径流,因而降雨量越大,冠层截留和填洼所占的比例就越小。

4 结 论

SWAT 模型利用分辨率较高的 DEM 数据,可以估算山前地下水侧向补给的空间变异,而且可以计算不同降水年型下的补给量的差别。在研究区,由于地形的变化导致的山与平原交接断面上出水口的集水面积变异非常大,因此山前平原所可能接受的地下水侧向补给量的空间变异也非常大。不同的降雨年型下,降雨量转化为地下水侧向补给量的比例

也不同。平水年的转化比例较小,丰水年的转化比例较大。应用 SWAT 模型时,与 ArcView 的拓展模块有机结合,可以更方便提取完整的大流域和划分出合理的子流域。

参考文献:

- [1] 河北省地方志编纂委员会. 河北省志·自然地理志 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1993: 78-79.
- [2] 陈旭光, 陈德斌, 卞予萍, 等. 天山北麓中段山区地下水对山前平原区侧向补给探讨 [J]. 新疆地质, 2002, 21 (3): 369-370.
- [3] 刘昌明, 魏忠义. 华北平原农业水文及水资源 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 61-65.
- [4] ARNON J G, WILLIAMS J R, MAIDMENT D R. Continuous-time water and sediment-routing model for basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121 (2): 102-103.
- [5] 张蕾娜, 李秀彬, 王兆峰, 等. 一种可用于表征土地利用变化水文效应的水文模型探讨-SWAT 模型在云州水库流域的应用研究 [J]. 水文, 2004, 24 (3): 4-8.
- [6] 王中根, 刘昌明. 基于 DEM 的分布式水文模型构建方法 [J]. 地理科学进展, 2002, 22 (1): 79-86.
- [7] O'Callaghan J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1984, 28: 63-65.
- [8] 熊立华, 郭生练. 分布式流域水文模型 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 69-70.

(收稿日期: 2005-04-20 编辑: 傅伟群)

《江苏环境科技》征订启事

《江苏环境科技》是由江苏省环保厅主管, 江苏省徐州市环境科学研究所、江苏省环境科学研究院联合主办的集学术性与实用性于一体的环境科学技术类期刊。国际标准刊号: ISSN1004-8642, 国内统一刊号: CN32-1363/X。刊物以为环境污染防治实践服务为宗旨, 重点报道环境科研、应用技术开发及环境管理, 促进环境科技成果、先进实用技术的推广应用。常设栏目有: 研究报告、污染防治、评价与规划、专论与综述、环境管理、环保论坛等, 从多角度向读者介绍国内外环境保护新成果、新技术、新动态、新经验等。对环境保护管理、科研院所、污染防治技术开发设计、环保产业、工矿企业等部门从事环保工作的管理和专业技术人员以及大专院校师生均有较强的参考价值。《江苏环境科技》为双月刊, 大 16 开本, 80 页, 每期 8 元, 全年 48 元(含邮费), 欢迎广大新老朋友订阅。编辑部联系电话: 0516-82365781 传真: 0516-85737126 电子信箱: jshjkj@126.com 订户可以从当地邮局订阅, 邮发代号: 28-179, 亦可以从邮局汇款订阅: 2210023 徐州市黄河南路 60 号 《江苏环境科技》编辑部 银行汇款: 徐州市环境保护局(收款单位名称) 开户行: 江苏省徐州市农行 帐号: 230101040044388