

Application of GPR Based SWAT-MODFLOW Model's Coupling Calculation in Xi'an Heihe River Basin

Bochao Chen, Haicheng Wen, Hairu Mao, Jiting Li, Jia Zhang

College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Shaanxi Xi'an
Email: 914372136@qq.com

Received: Sep. 23rd, 2015; accepted: Oct. 8th, 2015; published: Oct. 21st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Xi'an Heihe River basin hydrological changes will directly affect the water supply of about 3761 million residents in Xi'an, and quantity and quality of the Xi'an Heihe River Basin and its interaction between surface water-groundwater would surely have a great impact on the safety of the water supply in Xi'an. Based on the GRP technology and the coupled SWAT-MDFLOW, this paper simulates the surface water and ground water's interaction to explore the hydrological respondent mechanism, evaluates the potential changes in water resources assessment study area, and then discusses the adaptive counter measure.

Keywords

Surface Water, Groundwater, Coupling, GIS, SWAT-MODEFLOW Stimulation Model

基于GPR的SWAT-MODFLOW模型的耦合计算及应用研究——以西安黑河流域为例

陈博超, 翁海成, 毛海如, 李济婷, 张 佳

长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安

Email: 914372136@qq.com

作者简介: 陈博超(1994-), 男, 浙江奉化人, 在读本科生, 主要从事水文地质研究。

收稿日期：2015年9月23日；录用日期：2015年10月8日；发布日期：2015年10月21日

摘要

西安黑河流域水文变化情况将直接影响到西安市约3761万居民的生活用水问题，而西安黑河流域地表水-地下水之间的水量与水质交互作用极大的影响了西安供水的安全。本文基于GPR技术和SWAT-MODFLOW模型，模拟地表水-地下水交互作用探索地表地下水文循环的响应机制，评估研究区水资源的潜在变化，进而探讨适应性调控对策。

关键词

地表水，地下水，耦合，GIS，SWAT-MODFLOW模型

1. 引言

地下水与地表水的耦合交互既是水资源研究的核心和热点，也是流域内水文循环中地表和地下相互作用的重要物理过程，而地表水和地下水的转换及其过程耦合模拟，是水资源开发利用和科学评价的基础。随着气候变化和人类活动的影响，特别是大规模地下水抽取和跨流域调水工程实施，区域地表水和地下水的交互作用也越来越频繁，已经到了需要从过程上把两者作为一个整体系统进行研究的阶段。西安黑河流域位于陕西省西安市周至县境内，区内地表水地下水资源丰富，建有水源地，是向西安市提供饮用水的主要水源地。研究该地区地下水与地表水的相互作用，水文循环规律，对于水资源的开采管理，水源地合理供水具有重要的意义。本研究以西安黑河流域为靶区，基于 GPR 技术，利用 SWAT-MODFLOW 耦合模型，研究该地区地下水与地表水的相互作用，预测未来地下水位的变化。在当地进行水资源合理开发利用及生态环境的可持续发展，防止地下水环境灾害的发生，保障社会经济与环境的协调发展具有重要理论意义和实际应用价值。

2. 研究方法

2.1. SWAT 模型

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部农业服务中心开发的流域尺度模型。随着计算机技术和 3S 的飞速发展，将农业非点源污染负荷模型和 3S 技术结合。形成集空间信息处理、数据库技术、数学计算、可视化表达等功能于一身的大型专业软件。

近年来，SWAT 模型作为具代表性的分布式水文模型已经被广泛应用于世界各地，模型的应用结果鼓舞人心。Binger 应用 SWAT 模型对密西西比河的支流 Goodwin 河流进行了径流模拟[1]。结果显示，对于所有子流域和大多数子流域，10 年的年径流量模拟值分别为观测值的 76%和 90%，并得出，相对于单独的某一年，SWAT 模型更加适合于进行长时间段的流域水文模拟。SWAT 模型与其它模型相比有如下的优点：1) SWAT 是一个物理概念模型；2) SWAT 输入参数简单；3) 计算效率高；4)可以对流域进行长期模拟；5) SWAT 可以对流域内一系列复杂的物理过程进行模拟，例如水循环和营养物迁移转化等。流域内泥沙、营养物的产生与迁移都是建立在流域内水循环的基础之上。

2.2. MODFLOW 模型

MODFLOW (modular finite-difference groundwater flow model)是由美国地质调查局(USGS)开发的、用来模拟地下水流动和地下水中污染物迁移等特性的计算机程序，是基于达西定律和地下水质量平衡的具有物理意义的

三维地下水模拟模型，使用有限差分方法，采用模块化的程序结构。

MODFLOW 模型与其他模型相比具有以下优点：1) 在世界范围内普及率比较高。是世界上最为普及的地下水运动数值模拟的计算机程序。2) MODFLOW 采用有限差分法对地下水水流进行数值模拟。差分法易于程序的普及和数据文件的规范。

2.3. SWAT-MODFLOW 模型耦合方法

在 SWAT 模型中，水文响应单元(HRU)是模型最基本的计算单元，反映了子流域内土地利用和土壤覆盖情况的综合影响，是分布式模拟计算的基础。通过模拟，可以得到每个 HRU 内的地表径流、地下径流、壤中流、蒸发、渗漏量、地下水的补给量等计算结果，将 HRU 计算结果在子流域和整个流域进行累加，就得到计算模型要素在整个流域的空间分布。

MODFLOW 的基本计算单元是有限差分网格(cell)。根据 SWAT 中 HRU 和 MODFLOW 中有限差分网格的特点，构建 HRU-cell 的交互界面，见图 1。

2.4. 地质雷达

探地雷达(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)又称为地质雷达，是一种用于确定地下介质分布的光谱电磁技术[3]。它是利用超高频脉冲电磁波为震源，多以自激自收的形式，可采用连续、间断两种方式探测地下介质分布的一种地球物理勘探方法。具有快速、无损、连续检测等特点。波形示意记录图，见图 2。

3. 研究区域介绍

陕西西安黑河流域是渭河支流，流域在周至县境内。在水资源特性方面，黑河在地表水补给、地表水与地下水转换方面都具有明显的代表性：(1) 河川径流以降水补给为主：黑河流域源头分布有冰川 100 km²，估计冰储量 27.5 亿 m³，年均冰川融水 1.0 亿 m³，仅占河川天然径流量的 4% 左右。剩余部分由降水提供。(2) 中游地表水与地下水转换频繁：河流出山后，流入山前冲积扇，一部分消耗于农、林业的灌溉以及人畜饮用、工业用水，其余则沿河床下泄，补给了地下水。被引灌的河水，相当一部分下渗补给了地下水，在细土平原一带出露成为泉水，或者再向前回归河流，或者再被引灌，连同打井抽取的地下水，再进入补给地表水。

1999 年在黑河(N34°03'~E108°13')处拦河建成黑河金盆水库水利枢纽，主要任务为向西安市城市供水及 2.47 × 104 km² 灌区供水。该区山高坡陡，水土易于流失，人类活动对生态环境的破坏明显[5]。研究区域地理位置见图 3。

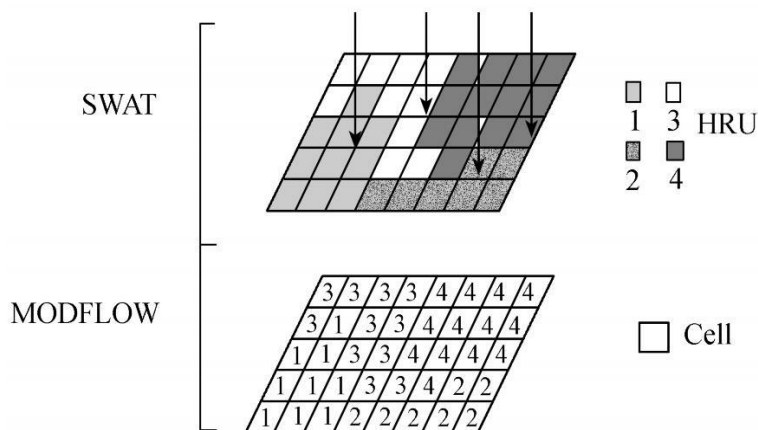


Figure 1. Schematic diagram of recharge computation in SWAT-MODFLOW [2]
图 1. SWAT 模型与 MODFLOW 的 HRU-cell 耦合示意图[2]

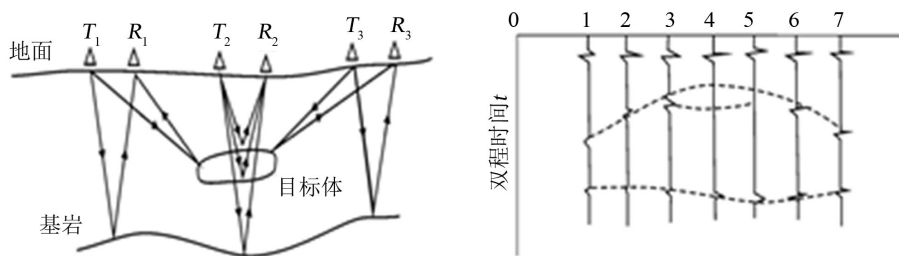


Figure 2. Schematic diagram of waveform recording [4]

图 2. 波形示意记录图[4]

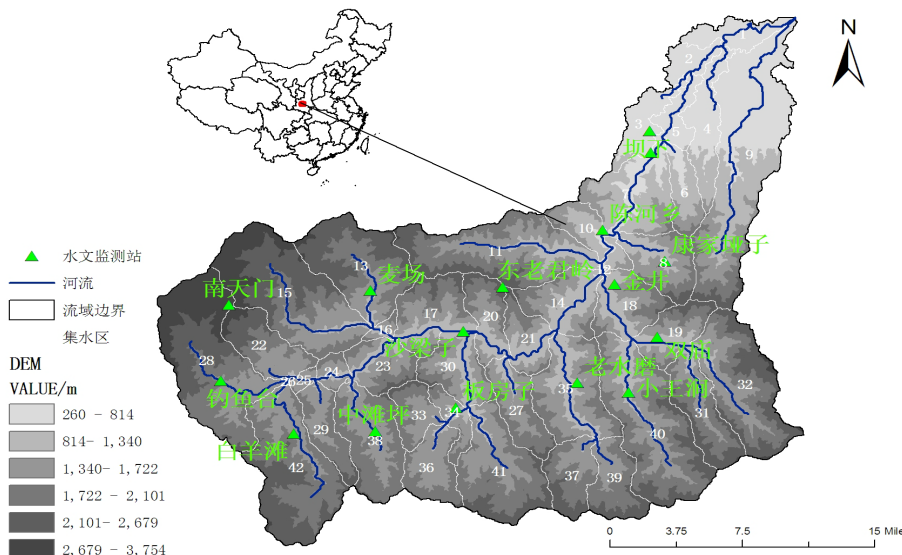


Figure 3. Location of Heihe river basin

图 3. 黑河流域地理位置

4. 结果与分析

4.1. SWAT 模拟计算和参数率定结果与分析

西安黑河流域属于干旱、半干旱气候，是一个面积较大的流域，流域内存在多种土壤类型和不同土地利用、植被覆被方式。根据研究区 DEM、土壤和土地利用的分布，将西安黑河流域划分为 42 个子流域和 107 个水文响应单元。子流域面积从 541 km² 到 12.583 km² 不等。在建模过程中，各站点日降水数据通过距离倒数法插值到每个子流域内，作为该子流域的面降水输入，而气温等其它气象数据则采用 SWAT 模型自带的方法进行插值。在模型控制文件(basins.cod)的配置中，产流模块采用 SCS 方程，潜在蒸散发的计算中，采用 Priestley-Taylor 公式。

根据已有的前人探索经验和黑河流域当地的地理环境实际情况想结合，本研究在进行 SWAT 数值模拟之前先假定一组参数，代入模型得到计算结果，然后把计算结果与实测数据进行比较，若计算值与实测值相差不大，则把此时的参数作为模型的参数；若计算值与实测值相差较大，则调整参数代入模型重新计算，再进行比较，直到计算值与实测值的误差满足一定的范围，见表 1。

本文将陈河乡水库的 2005~2013 年的月径流数据分为两部分，2005~2009 年为模型率定期，2010 年 1 月~2013 年 4 月为验证期。其运行结果如图 4 所示。

从表 2 我们可以看出，率定期月径流的相关系数 R² 为 0.8 模型效率系数 ENS 为 0.86，p 因子和 R 因子分别

Table 1. Main Parameters of Model Calibration
表 1. 模型率定的主要参数

编号 Number	参数名称 Parameter_Name	解释 Interpretation	最佳值 Fitted_Value	最小值 Min_Value	最大值 Max_Value
1	r_CN2.mgt	scs 径流曲线参数	69.482346	48.127235	90
2	v_ALPHA_BF.gw	基流消退参数	0.756769	0.587744	1
3	v_GW_DELAY.gw	地下水滞后参数	258.246521	155.191666	374.457336
4	v_GWQMN.gw	浅层含水层产生基流的阈值深度	173.561417	132.626953	405.523376
5	v_ESCO.hru	土壤蒸发补偿参数	0.896401	0.87543	0.959314
6	v_CH_N2.rte	主河道河床曼宁系数	0.114543	0.000189	0.128677
7	v_CH_K2.rte	沟道有效水传导率	122.315498	70.169815	123.928253
8	r_SOL_AWC(1).sol	土壤可利用水量参数	0.602177	0.469569	1
9	r_SOL_K(1).sol	饱和水力传导参数	454.030029	0	1297.228638
10	r_SOL_BD(1).sol	土壤饱和容量	1.247808	0.471731	1.833269
11	v_SFTMP.bsn	降雪气温参数	0.27961	-3.313508	1.89391

Table 2. Runoff simulation result
表 2. 径流模拟结果评价表

时间 Time	模拟变量 Simulation variable	R ²	Ens	p 因子 p-factor	r 因子 r-factor
率定期 Calibration	月径流 Monthly runoff	0.8	0.86	0.50	0.28
验证期 Verification period	月径流 Monthly runoff	0.83	0.79	0.19	0.14

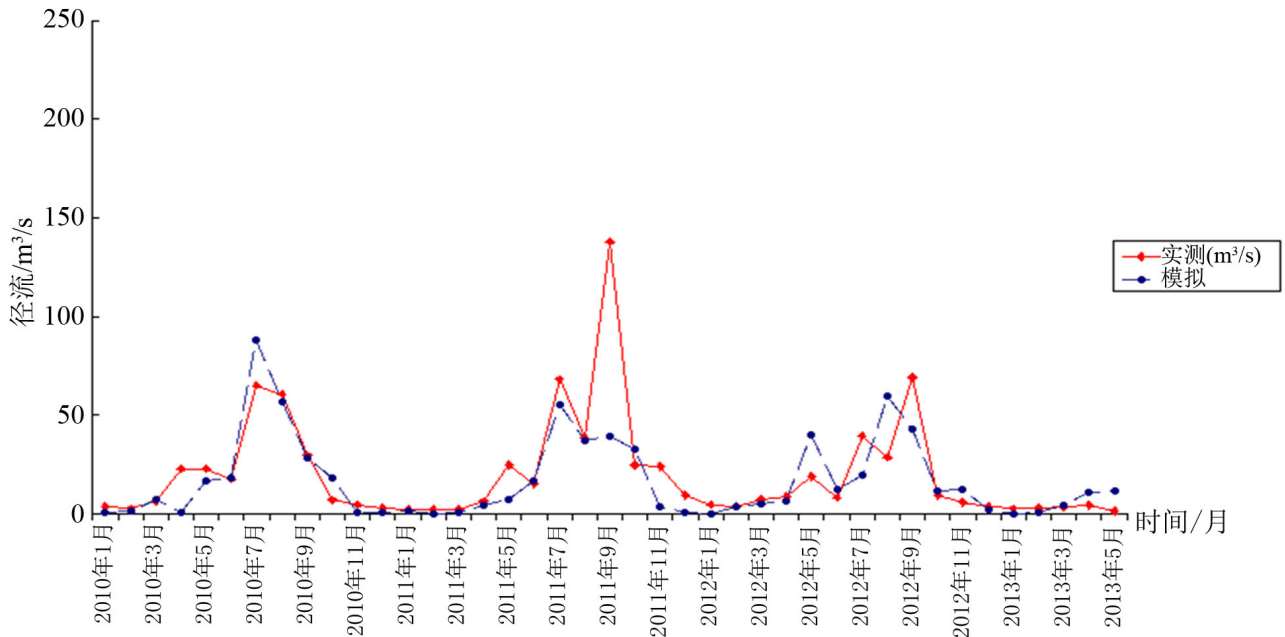


Figure 4. The validation period (2010-2013) monthly runoff measured values, the simulation value comparison
图 4. 验证期(2010~2013)月径流实测值, 模拟值对比

为 0.50 和 0.28。当率定完成后，用 2010~2013 年的数据进行径流验证，验证期相关系数 R^2 为 0.93，模型效率系数 Ens 为 0.79，与率定期的模拟变量十分的接近，验证期中的 p 因子和 R 因子分别为 0.19 和 0.14。相关系数和模型效率系数都高于 0.8 这表明 SWAT 模型在黑河流域的径流模拟具有良好适用性，但是 p 因子较小，同时 R 因子也较小，表明观测值落在不确定性区间的数量较少，径流模拟的实际不确定性较大，这可能与周围水库运行以及农业用水的影响有关。总体来说 SWAT 模型对该地区地表水循环的模拟较为合理、准确。

4.2. SWAT 与 MODFLOW 的耦合计算结果与分析

根据西安黑河流域的水文地质条件，以陈河乡所在的集水区为研究区，建立区域的 MODFLOW 地下水模型。模型分为 1 层，为非承压的孔隙含水层。模型网格划分为每层 32 行 × 32 列。对每个含水层，设置其渗透系数、地下水贮水率、给水度等参数和模型的边界条件[6]。黑河下游灌区北界为渭河大堤，受渭河强烈侧渗补给，为河流边界。西南和东界是 SWAT 模型提取的边界，地表径流和地下径流主要流向区域内部，可认为是无水流边界。垂向排泄主要是潜水蒸发和机井抽水。抽水量和抽水日期采用 SWAT 模型中的取值。垂直补给主要是降雨入渗补给，灌溉入渗补给和渠道入渗补给。应用 ARCGIS 软件，将 SWAT 模型计算的地下水补给量和潜水蒸发量结果引入 MODFLOW 模型边界条件中的地下水补给子模块 RCH 和潜水蒸发子模块 EVT 中，进行地下水模拟计算。

4.3. 模拟结果的 GPR 检验

利用 GPR 技术对当地部分地区地下水位进行测量，图 5 为模拟得到的区域内 GPR 实测地下水位的空间位置，图 6 为 2014 年 3 月 30 日实测地下水位与模型计算地下水位的散点图，模拟结果与实测值的相关系数 R^2 为 0.7373。计算得到的地下水水位随地下水补给量的变化趋势与实测地下水水位的变化基本吻合。模型所取参数和水文地质条件概化基本准确、合理，模型运行稳定，可用于黑河地区水量转化模拟。

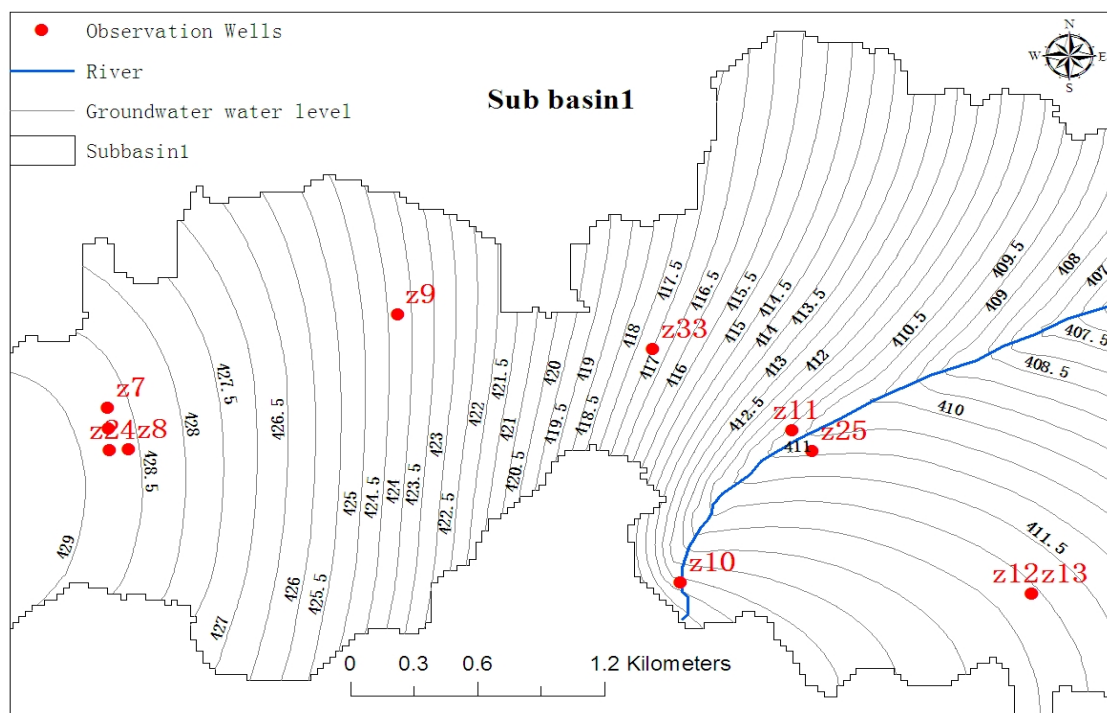


Figure 5. The spatial position of the measured groundwater sites

图 5. 实测地下水水位点的空间位置

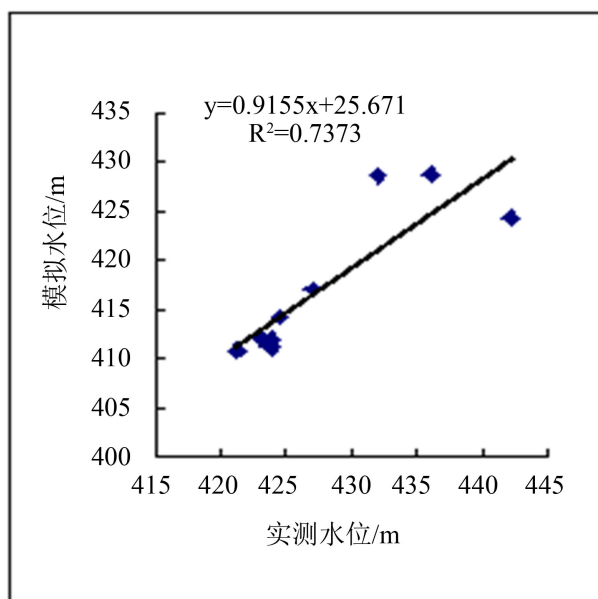


Figure 6. The scatter diagram fitting between simulate water table and measurement water table in sub basin

图 6. 子流域实测地下水位与模拟水位散点拟合图

5. 结论与讨论

本文利用 ARCGIS 建立 HRU 和 CELL 的交互界面, 从而实现了 SWAT 与 MODFLOW 的耦合, 并且将耦合结果应用于西安黑河流域地区的地下水水位模拟计算, 然后利用 GPR 技术对地下水为进行实地测量, 通过实地测量值与模拟值的比较吻合结果, 验证耦合模型。

对西安黑河流域地下水模拟计算结果表明: (1) 研究区域耦合模拟计算得到的地下水水位与实测结果基本吻合; (2) 本文将 GPR 技术应用于 SWAT 模型与 MODFLOW 的耦合计算, 对西安黑河流域水位进行了实地探测, 验证了用 GPR 探测灌区地下潜水位的可能性; (3) 根据 SWAT 分布式模型的特点, 将其水文响应单元(HRU)和 MODFLOW 的有限差分网格(Cell)相对应, 将 SWAT 模型计算结果中的具有空间分布特征的模型要素(地下水补给量和潜水蒸发量)引入 MODFLOW 的地下水补给模块(RCH)和蒸发模块(EVT)中, 实现了模型的耦合计算, 该方法可以推广应用到其它类似的区域研究中去; (4) 随着地下水和地表水耦合应用研究的不断深入和计算机技术、地下水运动理论、数学理论不断发展, 松散或是精密的地下水和地表水耦合模型的进一步发展面临着新的机遇, 在提高模型精度、模型耦合、与 GIS 的无缝集成等方面都具有广阔的发展空间。

致 谢

感谢长安大学环境科学与工程学院霍艾迪副教授在软件学习和研究方案上的指导及贺屹、王玮等老师们在模型构建方面的指导。

参考文献 (References)

- [1] BINGNER, R., GARBRECHT, J., ARNOLD, J. and SRINIVASAN, R. Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. Transactions of the ASAE, 1997, 40(5): 1329-1335. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.21391>
- [2] KIM, N.W., CHUNG, I.M., WON, Y.S. and ARNOLD, J.G. (2008) Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. Journal of Hydrology, 356(1-2): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024>
- [3] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
LI Daxin. Method and application of ground penetrating radar. Beijing: Geological Publishing House, 1994.

- [4] 张伟, 李姝昱, 张诗悦, 韦雄飞. 探地雷达在水利工程隐患探测中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 9(1): 34-38.
ZHANG Wei, LI Shuyu, ZHANG Shiyue and WEI Xiongfei. The application of GRP in the detection of hidden troubles in hydraulic engineering. Journal of Water Research and Architectural Engineering, 9(1): 34-38.
- [5] 李彦漫, 霍艾迪, 刘睿翀, 陈莎莎, 王晓峰, 李继东. 基于 SWAT 模型的城市水源地对未来气候变化的水文响应[J]. 水资源研究, 2013, 2(5): 301-308.
LI Yanman, HUO Aidi, LIU Yuchong, CHEN Shasha, WANG Xiaofeng and LI Jidong. Water resources responses to climate changes in Xi'an Heihe River Basin based on SWAT model. Journal of Water Resources Research, 2013, 2(5): 301-308.
- [6] NASH, J., SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. Journal of hydrology, 1970, 10(3): 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)