

非点源污染地下水数值模拟进展

陈建平^{1,2}, 董思宏¹, 李艳¹, 王明玉²

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 中国科学院研究生院水系统安全研究中心 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 非点源污染已经成为环境污染的主要来源,不断受到学者的关注。介绍了面源数值模型的产生和发展情况,并归纳总结了数值模型应用于非点源污染地下水的现状。最后提出了非点源污染地下水数值模拟的不足,并对模型的发展前景进行了分析。

关键词: 非点源污染; 环境污染; 数值模拟; 地下水

中图分类号: X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2013)02-0067-05

Groundwater simulation progress of non-point source pollution

CHEN Jianping^{1,2}, DONG Sihong¹, LI Yan¹, WANG Mingyu²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Center for Water System Security, Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution has become a major source of environmental pollution, and constantly attracted the attention of scholars. This article described the generation and development of non-point source numerical model, and summarized the present situation of numerical model which was applied to agricultural non-point source pollution of groundwater. Finally, it put forward the shortage of groundwater modeling in agricultural non-point source pollution and analyzed the future prospect of the model.

Key words: non-point source pollution; environmental pollution; numerical simulation; groundwater

1 研究背景

我国地下水资源占总水资源的1/3,占全国总供水量的20%,占饮用水供水量的70%^[1]。在全国水资源调查评价的197万km²平原区浅层地下水中,I类和II类水质面积仅为4.98%,III类水质面积为35.53%,IV类和V类水质面积高达59.49%^[2]。影响地下水水质的主要因素为非点源污染。非点源污染是指在工农业生产与人们的生活中,土壤泥沙颗粒、氮磷等营养物质、农药等有害物质、秸秆农膜等固体废弃物、畜禽养殖粪便污水、水产养殖饵料药物、农村生活污水垃圾、各种大气颗粒物等,通过地表径流、土壤侵蚀、农田排水、地表径流、地下淋溶、大气沉降等形式进入水、土壤或大气环境所造成的污染。从20世纪70年代以来,随着点源污染的有效控制,面源污染变的更加突出。在很多发达国家都引起了高度重视,并且采取了相应

的措施进行控制,而发展中国家对于非点源污染并没有引起应有的重视^[3]。对于非点源污染的研究通常有3种途径,包括实地考察监测、实验室模拟和数值模拟。数值模拟以其有效性、灵活性和相对廉价性逐渐成为地下水研究领域的一种不可或缺的重要方法,被越来越多地重视和广泛地应用。在进行非点源污染的量化研究、影响评价和污染治理时,最为有效的方法是通过建立地下水模型进行数值模拟来解决相关问题^[4]。

2 国内外地下水数值模拟的发展

20世纪70年代之前,非点源污染的研究仅仅限于因果的分析阶段,模型不能够反应溶质的迁移转化机理,只是根据数据进行污染结果的分析,应用局限性太强。初始的区域模型只对地表径流、地下水流动等物理模型进行模拟,不能模拟污染物的化学变化,如:HSPF(Hydrologic Simulation Program in

收稿日期:2012-11-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB428801)

作者简介:陈建平(1971-),男,博士,副教授,从事环境工程和地质工程等方面的教学和科研工作。

通讯作者:王明玉(1961-),男,山东乐陵人,教授,博导,从事水文地质和环境科学的教学和科研工作。

Fortran)^[5]、ARM、SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)、CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)。从20世纪80年代以后,非点源污染的模拟研究有了很大的进展,模型功能不断完善,很多模型在这个阶段被研发,如:SWMM (Storm Water Management Model)、ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environment Simulation)、GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)、AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model)、EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)、WEPP (Water Erosion Prediction Project)^[6]、SPARROW (Spatially Referenced Regressions on Watershed Attributes)、BASINS、USLE、Feflow (Finite Element subsurface FLOW system)等,这些模型被用于经济评价、径流模拟和非点源污染模拟。20世纪80年代以来,我国也出现了很多自主开发的模型,这些模型针对性强,不过大多缺乏复杂物理、化学过程的模拟。随着非点源污染的加重以及数值模型在工程实例中的应用,很多原有的模型往往不能满足实际工程中的需要,因此很多原有模型被整合和完善,如:Visual MODFLOW、AnnAGNPS等。同时,在原有模型的基础上,也有很多新的模型应运而生,如:DLBRM^[7] (distributed large basin runoff model)、DAN-SAT^[8] (Dynamic agricultural non - point source assessment tool)、GMS (Groundwater modeling system)。

2.1 数值模拟发展变化特点

计算机时代的到来及非点源污染重视程度的加深,越来越多的地下水污染模拟模型被建立。随着应用范围和内容的变化,对模拟精度的不断提高,原有模型不断地得到完善,同时新的模型也不断的涌现。

从模拟尺度上讲,地下水污染模拟从开始的农田小区,向小流域尺度迈进,随着工程实际的需要,模型又从小流域尺度向更大的流域尺度发展。从模拟的参数形式上讲,地下水污染模拟从开始的集总式模型向分布式模型不断地发展。集总式水文模型不考虑水文现象或要素空间分布,是将整个流域作为一个整体进行研究的水文模型。集总式水文模型中的变量和参数通常采用平均值,使整个流域简化为一个对象来处理。主要用于降水-径流模拟。分布式水文模型要考虑水文现象或变量以及各要素空间分布,具有分散输入、集中输出的特点。分布式水文模型考虑了降雨、蒸发蒸腾、土壤、地形等各因素

的空间变化,乃至时间变化。从模型的结构上讲,模型从开始的SCS水文模块、RUSLE土壤侵蚀模块、入渗和蒸发模块为主的基础上,不断的加入降雨初损、坡面流(如ANSWERS)等其他模块来完善模型的结构。从模型模拟的内容上来看,模型从开始进行的一些简单污染物的模拟发展到对复杂污染物进行模拟,从开始的物理模拟发展到物理、化学变化同时模拟的新阶段,对于化学模拟也从横向扩散发展到横向、纵向同时模拟。从模型的可视性方面来讲,从原有的1D、2D模型向更强的3D模型转变。非点源污染数值模型发展变化的特点见表1。

表1 非点源污染数值模型发展变化的特点

	初期阶段模型特点	现阶段模型特点
模拟尺度	农田尺度	大流域尺度
参数形式	集总式	分布式
模型结构	单一影响因子	多种影响因子共存
模拟内容	简单污染物、单一污染物的横向模拟	复杂污染物的横、纵向同时模拟
可视性	1维、2维	3维

2.2 非点源数值模型的特点及适用范围

2.2.1 适用流域的非点源污染模型 目前很多模型都用“3S”技术作为模型资料搜集、传输模拟、空间数据库的工具,以评价地下水污染问题^[9]。“3S”技术与模拟软件的结合使用,使得地下水模型建立更加方便、快捷、准确。用GIS和RS作为分析工具,还能够很好地模拟分析土壤侵蚀、泥沙的输送、N、P的输出负荷和农药的迁移转化等等,为BMP管理模式提供依据。Prakash Basnyat等用GIS和RS作为分析工具,对盆地或者尺度区域NO₃-的变化和污染情况进行了很好的分析,有利于对生态区域进行更好的规划和管理^[10]。田耀武等利用GIS、GPS作为数据收集工具,以AnnAGNPS模型为处理工具,模拟氮、磷和土壤的流失情况,评价三峡库区黑沟小流域退耕还林生态服务价值^[11]。

SWAT模型用于模拟流域水平衡、非点源污染关键区识别、BMPs和面源污染控制等诸多方面的模型。SWAT模型的优点包括:运行效率高,可同时计算数百个子流域;连续时间模型,能够进行长时间连续模拟;它不仅读入观测的流量数据和点源数据,还可以用于无法收集输入数据地区的模拟;模型方便地提取天气、土地利用、土壤类型、农业活动和其他输入数据的能力使它能够对大流域进行模拟。SWAT模型的不足在于:天气是模型的驱动力,

而天气数据在不同气象站搜集,不能代表整个流域;模型中一些地形因素并没有细化,较小的差异性土地利用类型并未考虑;植被模拟种类单一;大量模型参数仍然需要校准;HRUs 模块的非空间性使得 SWAT 模型不能模拟复杂的变化过程^[12-13]。目前 SWAT 模型已经比较广泛地应用于美国国家项目中,模型的有效性在各个项目中也得到了很好的证实。施练东等以 SWAT 模型为工具,分析汤浦水库流域的面源污染的主控因子,研究结果显示灌溉水田是总氮负荷的主要来源,水田和茶园是总磷负荷的主要来源^[14]。White M. J. 等利用 SWAT 模型为工具对美国俄克拉何马州的 Eucha 湖进行 BMP 管理方案的分析,结果显示强制性起诉可以使 Eucha 湖中的磷负荷减少 39%^[15]。

HSPF 模型是目前综合模拟径流、土壤流失、污染物传输、河道水力等过程,以及污染物相互反应的污染模型,已经广泛应用于区域面源污染模拟。HSPF 模型的优点包括:可模拟不同层面的污染物输移(地表、亚表面和地下水)的模拟;可用于污染物复杂的迁移转化以及进入水体后的模拟。HSPF 模型的不足在于:应用十分复杂,需要的数据支持量很大^[12,16]。邢可霞等以 HSPF 模型为工具,对滇池流域的主要污染物以及主要污染源进行了模拟,结果表明 80% 的 SS 来自农业面源污染^[17]。Ashok Mishra 等利用 HSPF 模型模拟印度 Hazaribagh 地区 N 和 P 的季节性变化,模拟结果显示 N、P 的流失与降雨量相关,模拟值与实测值吻合程度在 95% 以上^[18]。

AnnAGNPS 模型是参数分布式、基于物理过程、流域尺度的高级流域评价工具^[11],广泛用于农业非点源模拟的计算机模型。AnnAGNPS 模型的优点包括:可以对污染区域进行连续的模拟,并且以日为变化间隔;与 GIS 密合程度高,大部分信息可以自动提取。AnnAGNPS 模型的不足在于:计算网格的布置很重要,但是缺乏一定标准;模拟自然条件的不确定性和模拟参数的不确定性;适用区域有很大的局限性。LM Pease 等通过 AnnAGNPS 模型对 Pipestem Creek 流域的氮、磷和沉积物的污染情况进行了准确的评价^[19]。Yongping Yuan 等用 AnnAGNPS 模型来模拟长期施用 P 肥带来的负面影响^[20]。夏昊等利用 GIS 和 RS 作为信息搜集工具,通过 AnnAGNPS 模型来模拟龙门和流域面源污染情况,模拟结果正确的显示了 N、P 的分布情况以及暴雨对溶解态 P、吸附态 P 的影响^[21]。

2.2.2 适用地下水的非点源污染模型 Visual

MODFLOW 模型在地下水模型 MODFLOW 的基础上,加入了 MT3D、PEST 等模块。Visual MODFLOW 模型用于地下水数值模拟、粒子运动轨迹和传播时间模拟、污染物在地下水中输移过程模拟、水文地质参数估计与优化、区域水均衡分析,是目前最流行并被各国机构认可的三维地下水水流和污染物数值模拟评价的标准可视化专业软件。Visual MODFLOW 模型的优点包括:运行结果便于用其他软件进行进一步显示和处理;高度集成的软件包使得模拟的功能强大;具备 1D、2D、3D 模拟能力,可视化程度高^[22]。Visual MODFLOW 模型的缺点在于:采用有限差分法不利于区域细化;对于混合井的模拟一直存在问题。尉鹏翔等利用 Visual MODFLOW 对北京某污染区进行模拟,模拟结果显示污染物呈现椭圆形扩散^[23]。Seyed R. Saghravani 等通过实验室模拟,并且利用 Visual MODFLOW 模型作为工具进行分析,显示出 Visual MODFLOW 模型对于大尺度范围模拟的准确性,以及磷以纵向迁移为主的变化特点^[24]。

GMS 模型模块多、功能全,具有良好的使用界面,强大的前、后处理功能及优良的三维可视化效果,可用于进行地下水数值模拟、粒子运动轨迹和传播时间模拟、污染物在地下水中输移过程模拟等水流和溶质运移问题,所以得到了越来越广泛的应用。GMS 模型的优点包括:在概念模型的建立阶段,可以先输入参数及其他条件再一次性网格化,解决了重复性操作带来的不便;可以直接导入 modflow 等其他模块的信息,计算结果可视化程度高;程序结构的模块化、离散方法的简单化和求解方法的多样化也是 GMS 模型的优势所在。GMS 模型的不足在于:在数据输入方面,以及操作修改方面有不便^[25]。Souleymane Keita 等利用 GMS 模型作为工具对杭嘉湖地区进行地下水和地表水体模拟,模拟结果显示工业、生活垃圾的堆放对地表水和地下水造成了不同程度的污染,并且实验结果与模拟结果基本一致^[26]。

Feflow 是有限元地下水数值模型的杰出代表,可以用于模拟地下水区域流场,模拟非饱和带以及饱和带地下水流及其温度分布问题,模拟污染物在地下水中迁移过程及其时间空间分布规律,模拟“降雨-地表水-地下水”水资源系统。Feflow 模型的优点包括:不仅能够定义三种边界,而且可以对边界增加特定的限制条件;可以进行非稳定流、稳定流和滞流模拟;自动调整有限元网格密度,以获得随流场时空变化的最佳数值解。Feflow 模型的缺点在于:对于地层缺失、断层的模拟只能认为厚度为无限

小;源汇项的菜单功能过于集中,导致调参浪费时间。孙继成等通过 Feflow 模型对秦王川盆地南部地区地下水进行模拟,结果表明应该调整灌溉区作物种植结构来预防沼泽化、次生盐渍化^[27]。蒙媛等通过 Feflow 模型对北方某市垃圾填埋场附近地下水进行模拟,结果显示如果地下水开采不合理,可能会导致地下水体的严重污染^[28]。

3 地下水污染模型的不足和发展趋势

经过 40 多年的发展,地下水污染模拟得到了很快的发展,此同时,各种模型仍然存在很多的问题。

(1)非点源污染模拟的不确定性^[29]:①实验数据的误差,包括径流、灌溉、降水、温度等。②模型建立不完整,参数选择不能达到最优。

(2)模拟尺度问题:小流域方面模拟较完善,大尺度方面发展不够,利用小尺度模型模拟大尺度区域会产生更大的偏差。输出系数法是 20 世纪 70 年代初在北美被提出,主要用于评价土地利用和湖泊富营养之间的关系。由于它使用的输出系数多是前人的主观经验,不同条件下的区域以及不同尺度的区域应用同样的输出系数会带来明显的误差^[30]。

(3)非点源污染模型之间的数据库不能兼容,浪费人力物力^[12]。

(4)国内对于模型的构建多局限于单一因素,很少考虑气象因素。如崔振东等采用 MEP 法以及 VC++ 开发的地下水模拟软件,对影响因素的考虑不全面^[31]。

(5)污染物纵向模拟处于起步阶段,纵向模拟中多将包气带和饱和带分开,不能有效的形成整体^[32]。

基于以上不足,地下水污染模型的发展趋势可以概括为以下几个方面:

(1)完善模型结构、模型参数、输入数据和验证数据方面带来的不确定性,加强分析参数之间的相互联系,减少不同模块之间的差异性。与此同时,应该改善模型带来的操作复杂和人机交流不便等问题。

(2)完善模型结构,更加全面的考虑气象因素和地形地貌带来的影响。建立模型应该不断的完善模拟区域土地利用的细化程度;非点源污染会涉及到水文、地质、气象等很多学科,应该加强各学科数据收集的准确性,同时各学科之间应该建立统一的数据库为数据处理带来方便。

(3)模型应完善污染物横、纵向迁移转化。污染物在地下水中的迁移转化包括在包气带、饱和带

等不同层面的横向变化,同时也包括污染物纵向在界面之间的迁移转化。模型应该细分不同层面的横向迁移转化,也加强模型具备同时模拟污染物在横、纵向不同空间层面的迁移转化的能力。

(4)模型应该向大尺度、多污染源的复杂流域及复杂污染物方向发展。农业面源污染区通常由农田、果园、畜牧业和鱼塘等多种污染源构成的大尺度范围,并且由于多污染源导致的多污染物共存的污染现状。模型应该完善多污染源共存、复杂污染物共存的模拟。

参考文献:

- [1] 于爽,严毅萍,康彩霞. 浅议我国地下水现状及地下水的污染防治[J]. 广西轻工业,2010(1):42-43+48.
- [2] 薛禹群,张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义[J]. 环境科学学报,2009,29(3):474-481.
- [3] 裴亮,王理明,于国强. 农业非点源污染研究的现状及应用新进展[J]. 水利水电技术,2010,12(42):58-61.
- [4] 牛志明,解明曙,孙阁等. 非点源污染模型在土壤侵蚀模拟中的应用及发展动态[J]. 中国水土保持,2001,19(2):20-22.
- [5] Ashok M, Kar S, Raghuwansi N S. Modeling nonpoint source pollutant losses from a small watershed using HSPF Model [J]. Journal of Computer Science,2009,135(2):92-101.
- [6] Ascough II J C, Baffaut C, Nearing M A, et al. The WEPP water shed model [J]. Transactions of the ASABE,1997,40(4):921-933.
- [7] He Chansheng and Carlo DeMarchi. Modeling spatial distributions of point and nonpoint source pollution loadings in the great lakes watersheds [J]. World Academy of science, Engineering and Technology,2009,54:795-810.
- [8] Jaepil Cho, Saied Mostaghimi. Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANSAT): Model development [J]. Biosystems Engineering,2009,102(4):486-499.
- [9] 李巧,周金龙,贾瑞亮. 地下水农业面源污染研究现状与展望[J]. 地下水,2011,33(2):73-76.
- [10] Prakash Basnyat, Teeter L D, Lockaby B G, et al. The use of remote sensing and GIS in watershed level analysis of non-point sources pollution problem [J]. Forest Ecology and Management, 2000,128:65-73.
- [11] 田耀武,肖文发,黄志霖. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区黑沟小流域退耕还林生态服务价值 [J]. 生态学报,2011,30(4):670-676.
- [12] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型-理论方法与应用 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [13] 张蕾,卢文喜,安永磊. SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展 [J]. 生态环境学报,2009,18

- (6):2387-2392.
- [14] 施练东,俞海平,朱建坤,等. 基于 SWAT 模型的汤浦水库流域非点源污染模拟[J]. 水生生态学杂志,2011,32(3):66-70.
- [15] White M J, Storm D E, Busteed P R, et al. Evaluating potential phosphorus management impacts in the lake eucha basin using SWAT[J]. Transactions of the ASABE, 2011,54(3):827-835.
- [16] 薛亦峰,王晓燕. HSPF 模拟及其在非点源污染研究中的应用[J]. 首都师范大学学报,2009,30(3):61-65.
- [17] 邢可霞,郭怀成,孙延枫. 基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟[J]. 中国环境科学,2004,24(2):229-232.
- [18] Ashok Mishra, Kar S, Raghuvanshi N S. Modeling non-point source pollutant losses from a small watershed using HSPF Model[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009,135(2):92-100.
- [19] Lyndon M Pease, Oduor P, Padmanabhan G. Estimating sediment, nitrogen, and phosphorous loads from the Pipestem Creek watershed, North Dakota, using AnnAGNPS [J]. Computers & Geosciences,2010,36(3):282-291.
- [20] Yuan Yongping, Megan H M, Ricardo D L, et al. Jackson. AnnAGNPS model application for nitrogen loading assessment for the future midwest landscape study[J]. Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA Online,2011,3(1):196-216.
- [21] 夏昊,王云鹏. AnnAGNPS 模型在龙门河流域面源污染模拟应用[J]. 环境科学与技术,2009,32(6C):39-43.
- [22] 胡轶,谢水波,蒋明,等. Visual MODFLOW Visual Modflow 及其在地下水模拟中的应用[J]. 南华大学学报(自然科学版),2006,20(2):1-5.
- [23] 尉鹏翔. Visual Modflow 在地下水污染物运移模拟中的应用[J]. 水资源保护,2011,27(4):19-22.
- [24] Seyed R Saghravani, Sa'ari Mustapha, Shaharin Ibrahim, et al. Simulation of phosphorus movement in unconfined aquifer by means of visual MODFLOW[J]. Journal of Computer Science,2010,6(4):446-449.
- [25] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质,2003,30(5):53-55.
- [26] Souleymane K, Tang Zhonghua, Dong Shaogang. Evaluation of some organic pollutants transport into the shallow groundwater and surface water of Jiaying landfill area[J]. American Journal of Applied Sciences,2009,6(12):2010-2017.
- [27] 孙继成,张旭昇,胡雅杰. 基于 GIS 技术和 FEFLOW 的秦王川盆地南部地下水数值模拟[J]. 兰州大学学报,2010,46(5):31-38.
- [28] 蒙媛,施项,汪家权. 某市地下水的模拟计算与分析[J]. 地下水,2010,32(2):13-15.
- [29] 廖瑶,谦瑶,沈珍瑶. 农业非点源污染模拟不确定性研究进展[J]. 生态学,2011,30(7):1542-1550.
- [30] 薛利红,杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学,2009,28(4):755-761.
- [31] 崔振东,唐益群,严学新,等. 地下水流与水质联合数值模拟应用研究[J]. 土木建筑与环境工程,2009,31(1):121-124.
- [32] 张倩,苏保林,罗运祥. 农田面源氮素垂向运移负荷估算方法综述[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(3):35-38.

(上接第 66 页)

- [16] 孙栋元,赵成义,魏恒,等. 干旱内陆河流域平原区生态环境需水分析——以新疆自治区台兰河流域为例[J]. 水土保持通报,2011,31(4):82-88.
- [17] 彭祥,胡和平. 不同水权模式下流域水资源配置博弈的一般性解释[J]. 水利水电技术,2006,37(2):53-56.
- [18] 刘韶斌,王忠静,刘斌,等. 黑河流域水权制度建设与思考[J]. 中国水利,2006,21(6):22-24.
- [19] 钟华平. 黑河流域水资源使用权合理分配模式研究[D]. 江苏:河海大学,2005.
- [20] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 内陆河流域分布式水文模型——以黑河流域干流山区建模为例[J]. 中国沙漠,2004,24(4):416-424.
- [21] 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.
- [22] 贾仰文,王浩,严登华. 黑河流域水循环系统的分布式模拟(II)——模型应用[J]. 水利学报,2006,37(6):655-661.
- [23] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进集应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):22-26.
- [24] 李扬,秦中庸,于福亮,等. 黑河中游地区水资源优化配置模型研究[J]. 人民黄河,2008,30(8):72-74.
- [25] 李福生,侯红雨,谢越韬. 黑河中游地表水、地下水转化及水资源配置模型[J]. 人民黄河,2008,30(8):64-66.
- [26] 赵勇,裴源生,于福亮. 黑河流域水资源实时调度系统[J]. 水利学报,2006,37(1):82-89.
- [27] 裴源生,赵勇,王建华. 流域水资源实时调度研究——以黑河流域为例[J]. 水科学进展,2006,17(3):395-401.
- [28] 李新,程国栋,丁永建,等. 黑河流域水资源信息系统设计[J]. 中国沙漠,2000,20(4):378-382.
- [29] 李新,程国栋,吴立宗. 数字黑河的思考与实践 I:为流域科学服务的数字流域[J]. 地球科学进展,2010,25(3):297-305.
- [30] 盖迎春,李新. 黑河流域中游水资源管理决策支持系统设计与实现[J]. 冰川冻土,2011,33(1):190-196.