



Advanced Simulation and Modelling for Urban Groundwater Management-UGROW

全球城镇化水问题丛书

城市地下水管理高级仿真与建模 UGROW

[塞尔维亚 / 英国] Dubravka Pokrajac (杜布拉夫卡 · 波克拉贾克)
[加拿大] Ken Howard (肯 · 霍华德) 编

郭晓晨 雷晓辉 穆祥鹏 廖卫红 马景胜 等 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全球城镇化水问题丛书

城市地下水管理高级仿真与建模 UGROW

[塞尔维亚 / 英国] Dubravka Pokrajac (杜布拉夫卡 · 波克拉贾克) [加拿大] Ken Howard (肯 · 霍华德) 编

郭晓晨 雷晓辉 穆祥鹏 廖卫红 马景胜 等 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

- "Original title: *Advanced Simulation and Modelling for Urban Groundwater Management-UGROW*
First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 7,
place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France and Co-publisher Taylor & Francis The Netherlands,
P. O. Box 447,
2300 AK Leiden, The Netherlands

© UNESCO 2010

© China Water & Power Press 2014, for the Chinese translation.

The present edition has been published by the China Water & Power Press, by arrangement with UNESCO."

"本出版物所使用的名称和引用的资料，并不代表联合国教科文组织对这些国家、领土、城市、地区或其当局的法律地位以及对边界或国界的划分表达任何观点和看法。

本出版物所表述的想法和观点均属于作者本人，并非联合国教科文组织所持观点，并不代表联合国教科文组织机构的意见或决定。

本书中文版本由中国水利水电出版社翻译提供。"

北京市版权局著作权合同登记号：图字 01-2013-9231

图书在版编目 (C I P) 数据

城市地下水管理高级仿真与建模——UGROW / (英)
波克拉贾克, (加) 霍华德编; 郭晓晨等译. — 北京:
中国水利水电出版社, 2015. 5
(全球城镇化水问题丛书)
书名原文: Advanced Simulation and Modelling
for Urban Groundwater Management - UGROW
ISBN 978-7-5170-2893-2

I. ①城… II. ①波… ②霍… ③郭… III. ①城市用
水—地下水资源—水资源管理—仿真模型 IV.
①TU991. 31

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第097344号

书 名	全球城镇化水问题丛书
原 书 名	城市地下水管理高级仿真与建模——UGROW Advanced Simulation and Modelling for Urban Groundwater Management-UGROW
编 者	[塞尔维亚/英国] Dubravka Pokrajac (杜布拉夫卡·波克拉贾克)
译 者	[加拿大] Ken Howard (肯·霍华德)
出 版 发 行	郭晓晨 雷晓辉 穆祥鹏 廖卫红 马景胜 等 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×230mm 16开本 14.75印张 217千字 14插页
版 次	2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	58.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

全球城镇化水问题丛书

专家委员会

(排名不分先后)

名誉主任：刘昌明（中国科学院院士）

林学钰（中国科学院院士）

主任：王浩（中国工程院院士）

副主任：陈明忠（水利部水资源司司长）

邵益生（住房和城乡建设部城市水资源中心主任）

宫辉力（首都师范大学校长、教授）

汤鑫华（中国水利水电出版社社长）

委员：万力（中国地质大学副校长、教授）

王建华（中国水利水电科学研究院水资源所所长、
教授级高级工程师）

王金生（北京师范大学教授）

王忠静（清华大学教授）

刘斌（北京市水务局副局长）

左其亭（郑州大学教授）

沈大军（中国人民大学教授）

李文运（天津市水务局副局长）

李鸿源（台湾大学土木工程学系教授）

姜文来（中国农业科学院研究员）

谈广鸣（武汉大学副校长、教授）

董新光（新疆农业大学教授）

董增川（河海大学教授）

金 炎（中国水利水电出版社原总编辑、编审）

李中锋（中国水利水电出版社副社长）

办公室主任：齐兵强（水利部水资源司水资源管理处处长）

徐丽娟（中国水利水电出版社国际合作部主任）

办公室成员：董 君 张 潭 蔡晓洁

译者序

城市地区是世界经济的动力引擎，其长期可持续发展的能力在很大程度上依赖于充足的水供给。对此，建立整个城市水循环的数值模拟模型，揭示城市地下水和地表水的交互作用机理，优化利用各种水资源，应成为城市发展的一个主题。

我国目前有 2/3 的城市以地下水作为主要的供水水源。近年来，随着城市化进程的加快、城市人口的增长以及经济的发展，水资源供需矛盾突出，大大增加了城市对地下水资源的开采，同时人们对地下水资源认识的不足和开发利用的不当，导致了令人触目惊心的地下水问题。突出表现在过度开采引起的水位下降、地面沉降、海水入侵等地质危害，以及污染状况严重引起的疾病流行、可供水量减少。并且在我国已经造成了巨大危害。如果可用地下水资源受到严重的污染，会导致可供水源的缺乏，严重制约城市经济的发展和社会的进步。但是为了维持城市的正常运转，人们不得不花费人力、物力和财力寻找新的水源。我们必须对此予以高度重视，采取有效措施以促进城市地下水资源合理开发、利用和保护。因此，需要借助城市水系统数值模拟技术的进步，研究地下含水层中水体的运动以及被污染的地下水中污染物的迁移情况。从而，揭示地下水、城市供水系统、城市排水系统、城市地表径流系统之间的相互作用机理，提出解决这些问题的具体措施。

UGROW 是目前最先进的城市水管理建模工具之一，它完全集成了包括城市地下水在内的所有城市水系统模拟组件。UGROW 的应用能够显著提高人们对城市水系统中各组件之间相互作用的认识水平，对城市水问题的决策作出必要的支撑，解决广泛存在的城市水问题。UGROW 建立在坚实的科学基础上，具有高效的计算效率和杰出的图形界面支持。UGROW 是作为联合国教科文组织国际水文计划第六阶段（IHP-VI）项目的一部分开发的，基于城市水环境的需

求进行了测试和改进。

本书中提出的概念和新的想法，将对城市水管理者、政策决策者以及我国从事相关专业的科研工作者都有巨大的价值。本书的翻译，是促进城市水资源可持续管理科学知识的一大贡献，将有助于更好地理解城市水系统之间的相互作用关系，在整体上优化城市水资源的配置，更好地管理城市区域的地下水资源。

本书第1章详细介绍了城市地下水管理中存在的问题，地下水系统独特的水文地质特点，城市典型含水层模型的挑战，以及城市地区地下水数值模拟技术的现状；第2章介绍了UGROW模型的基本概念，模型算法及应用，地下水模型的模拟过程（包括：非饱和土中的水运动、地表径流、用户界面），以及模型应用中的模型率定、不确定性分析和灵敏度分析；第3章对3个典型案例进行了详细介绍，对数值模拟结果进行了分析和总结，并给出了解决措施；第4章对本书进行了总结，并对UGROW的未来发展进行了展望。

本书的翻译工作由郭晓晨总体组织，并负责译稿的整理和校核工作。参与该书翻译工作的还有：郭晓晨、雷晓辉、穆祥鹏、廖为红、马景胜、郭春生。此外，水利部海河水利委员会王道坦、国务院南水北调工程建设委员会办公室张晶、水利部水资源管理中心万毅、雅砻江流域水电开发有限公司张东明、水利部水文局董秀颖也参与了部分章节的翻译、校译工作。

本书的出版工作得到了国家自然科学基金面上项目“基于延迟微分方程的明渠输水预测控制方法研究”（51079161）、水利部公益性行业科研专项经费项目“地下水开发与绿洲安全用水关键技术研究”（201301102）、国家科技重大专项课题“水质水量调控与应急处置关键技术研究运行示范”（2012ZX07205-005）等项目的资助，在此一并感谢。

由于译者水平所限，译文中难免有错漏和不足之处，敬请读者批评指正。

译者

2014年10月

原 著 序

地下水是储量最大的可用淡水资源，为人类提供了可靠的饮用水源。当今，世界上大部分城市人口以地下水为饮用水。一般情况下，地下水水质比地表水好，仅需要适度处理即可直接作为饮用水。由于地下水资源容易开发且成本相对较低，在世界范围内，被广泛应用于生活、工业和农业用水。因为地下水水质良好，而且在城市水循环中能够减轻干旱，对城市水系统影响方面有着重要作用，人们广泛认识到地下水的重要性。然而，由于过度开采和污染导致地下水水质退化，使得大部分城市及周边地区的地下水资源受到威胁。

编写本书的目的是使用模拟和仿真工具促进城市地下水资源的有效管理，以更好地了解地下水与城市水系统的相互作用。本书介绍了一种模拟和仿真工具——UGROW，是迄今为止最先进的城市地下水模拟系统，它集成了所有的城市水系统单元。UGROW 技术以支持城市水管理决策为目标，并通过研究不同的城市地下水案例进行了测试。

为更好地推动城市地下水资源管理，联合国教科文组织国际水文计划第六阶段（IHP-VI，2002—2007 年）开展了一项针对城市地下水模拟的项目。该项目得到了由城市地下水专家、水文地质专家和建模专家组成的专家组的支持，通过一系列的研讨会，最终实现了本书的出版。英国阿伯丁大学的 Dubravka Pokrajac 以及加拿大多伦多大学的 Ken W. F. Howard 是本书的编辑和主要撰稿人，他们的贡献对于本书的出版是不可缺少的，在此对他们表示诚挚的感谢。

作为联合国教科文组织国际水文计划城市水系列丛书之一，本书是在国际水文计划城市水管理项目负责人、国际水文计划副秘书长 J. Alberto Tejada-Guibert 以及联合国教科文组织国际水文计划城市

水管理和水质专家 Sarantuyaa Zandaryaa 的主持和协调下筹备出版的。作为该系列丛书的联合主编，他们为本书出版所作的努力是至关重要的。同时也要感谢另一位联合主编，英国帝国理工的 Ćedo Mak-simović。

联合国教科文组织感谢所有撰稿人的突出贡献。相信，在这本书中提出的概念和新的想法，将对全世界范围内从事城市水管理、政策决策以及相关专业教育工作的人员都有巨大的价值。本书的出版，是对促进城市水资源可持续管理的一大贡献。将有助于更好地理解城市区域的地下水资源。

联合国教科文组织 (UNESCO)
国际水文计划项目 (IHP)

原 著 前 言

UGROW 是 IHP-VI 的一部分

在人口密集的地区，确保健康和可持续的生活条件已成为一个严重的全球性的挑战，为饮用和卫生设施提供安全和可持续的水供应是这个问题的核心。我们应该采取重要的管理决策，承认整个城市水循环以及地下水、地表水和复杂的供水服务网络——包括污水管道和增压供水系统——之间发生的复杂的相互作用是至关重要的。

从历史上看，地下水在城市水循环过程中发挥的至关重要的作用已被严重忽视。在一定程度上，这反映了一种“眼不见，心不烦”的思想，主要反映在忽略了地下水的运动。此外，因为地下水和地表水系统的空间层次分明，在水流速度上，地表水和地下水的时间尺度差异较大，因此，人们常常忽略地下水的作用。撇开这些原因不谈，不幸的是，城市水管理的工具很少。如果有的话，无论是在分析阶段还是在随后的决策过程阶段，都未能对城市含水层和地下水的相互作用进行充分的了解。这些态度必须改变，并且必须马上改变。世界范围内对优先考虑城市水循环整体管理的需要的认同日益增加。相应地，如果来实现城市可持续发展的目标，实用的、健全发达的城市水系统的建模工具是必不可少的。

面对这样的挑战，UGROW (UrbanGROundWater, 城市地下水) 是目前最先进的城市供水管理工具之一。UGROW 是联合国教科文组织国际水文计划第六阶段 (IHP-VI) 期间开发的，充分整合了包括地下水在内的城市水系统的所有组成部分。其主要目的是提高对城市水系统组成部分之间相互作用的认识，以支持决策管理，并解决广泛的城市水问题。该模型具有坚实的科学基础，计算高效，并有出色的图形支持。它已通过一系列苛刻的城市条件测试，并在这一过程中不断完善。

Ken W. F. Howard 和 Dubravka Pokrajac

缩 略 词

3D	三维
3DNet—UGROW	UGROW 集成的一种水文信息工具
AISUWRS	评估和改善城市水资源和水系统的可持续性
ARCINFO®	一种 GIS 软件
ASC II	美国信息交换标准代码
ASR	含水层存储和恢复
CCTV	闭路电视
CNTB	坦帕湾中北地区
CSIRO	联邦科学与工业研究组织
DAG	有向无环图
DELINEATE	UGROW 中一个用于确定集水区面积的组件
DHI	丹麦水力研究所
DHI-WASY GmbH	DHI 在德国的分公司
DSS	决策支持系统
DTM	数字地形模型
ESI	国际环境系统
EU	欧洲联盟
FEFLOW®	一种有限元地下水模型
GEOLOGY	UGROW 中一个用于处理地质层的组件
GEOSGEN	UGROW 中生成 3D 实体的算法
GIS	地理信息系统
GO	图形对象
GRID	用于数据处理的一种 GIS 参照物

GROW	UGROW 中模拟地下水流的模型
GTA	大多伦多地区
GUI	图形用户界面
HSPF	Fortran 语言编写的水文模拟程序
ICU	中间结构单元
IHP	联合国教科文组织国际水文计划
ISGW	地表水和地下水集成软件
IWRM	水资源综合管理
MESHGEN	UGROW 中用于生成网格的算法
MKL	中间砾石层
MODFLOW	一种有限差分地下水模拟模型
MODFLOW-SURFACT	一种包括包气带水流、延迟给水和垂直直流模块的模型
MODPATH	一种三维的粒子追踪模型
MS-Access	一种数据库软件
MT3D	一种三维的污染物运移模型
NAPL	非水相流体
NEIMO	网络渗出渗入模型
OKL	上部砾石层
OROP	优化区域行动计划
PEST	参数估计和自动率定软件代码
POSI	一种专门设计的不饱和区模型
PSLG	平面直线图
QA	第四纪早期
SAS	表层含水层系统
SDI	SDI 环境服务公司，一家从事水文咨询服务的公司
SEAWAT	一种变密度的瞬态地下水流三维模型
SEWNET	WATER 中处理城市排水的模块
SI	国际标准单位制

SLeakI	一种专门设计的不饱和区模型
STREAMNET	WATER 中处理城市河流的模块
TIN	不规则三角网
UFAS	上佛罗里达含水层系统
UFIND	UGROW 中为每个网格单元分配补给源的算法
UGROW	城市地下水建模系统
UL_FLOW	一种专门设计的不饱和区模型
UNSAT	UGROW 中模拟不饱和区水流的模型
USDA-SCS	美国农业部土壤保持局
USGS	美国地质调查局
UTM	通用横轴墨卡托
UVQ	城市体积和质量模型
UWP	城市水计划
WATER	UGROW 中用于处理所有水系统的组件
WATNET	WATER 中处理供水系统的模块
W - E	由西向东

符 号 表

a	系数
as	表示第 s 个面源的下角标
a_i	第 i 个多项式的系数，与时间相关的未知系数
a_i^{new}	H 在计算节点的新值
a_i^{old}	H 在计算节点的旧值
a_s	定义第 s 个面源位置的面的几何形状
b	系数
d	地下水位的深度
dt	时间微元
dx	x 坐标微元
dy	y 坐标微元
dW	W 微元
f	沿有限元的一侧定义的函数
f_j^q	第 j 个方程的右侧项
f_j^B	第 j 个方程的右侧项
g	重力加速度
h	毛细管压力水头
h_0	压力水头参考值
h_1	土壤表面的毛细管势能
h_j^{k+1}	节点 j 处， t^{k+1} 时刻的水头
h_p	土壤表面水层的规定深度
i	表示笛卡尔坐标方向的下角标
$\vec{i}$	x 坐标的单位基矢量
j	表示笛卡尔坐标方向的下角标
$\vec{j}$	y 坐标的单位基矢量
k	渗入或渗出的阻力系数，非饱和土的水力传导率
k_0	渗漏参数参考值

$\vec{k}$	z 坐标的单位基矢量
k_a	渗入或渗出的阻力系数
k_b	渗入或渗出的阻力系数
k_c	渗入或渗出的阻力系数
k_{ij}	多孔介质固有渗透系数
l_{top}	覆盖在含水层单元上部的低渗透层（隔水层）的厚度
l_s	表示第 s 个线源的下角标
l_s	定义第 s 个线源位置的线的几何形状
m	Genuchten 土壤参数
n	固体基质的有效孔隙率，基函数的序号，Genuchten 土壤参数
n_{eff}	有效孔隙率
n_x	边界的单位法向量的 x 分量
n_y	边界的单位法向量的 y 分量
p	宏观压力，REV 内部的平均孔隙压力
p_s	表示第 s 个点源的下角标
q	单位体积通量
q_i	比流量（达西速度）
q_i^{leak}	第 i 个渗漏源的单位排放量
q_z^{bot}	含水层底部渗漏率
q_z^{top}	含水层上边界渗漏率，水进入潜水含水层地下水位以上存储区域的渗漏率
q_{G1}	土层表面的势通量
r	表示“相对”的下角标
s	表示“固体”的下角标——沿迹线的固有坐标
t	时间
t_c	从单元到出口的移动（集中）时间
t_k	第 k 个时间点
v	试或权重函数
$\bar{v}$	沿域边界的试或权重函数
x_0	REV 的中心
$\mathbf{x}$	REV 内的点
x	笛卡尔坐标，全局笛卡尔坐标

x_i	第 i 个方向的笛卡尔坐标
x_s	源 s 的 x 坐标
y	笛卡尔坐标, 全局笛卡尔坐标
y_s	源 s 的 y 坐标
z	垂直向上或垂直向下的笛卡尔坐标
A	系数
A_{as}	面源 s 的系数
A_j	时间-面积图的增量面积
A_{ls}	线源 s 的系数
A_{ps}	点源 s 的系数
B	系数, 饱和含水层厚度
B_{as}	面源 s 的系数
B_{ls}	线源 s 的系数
B_{ps}	点源 s 的系数
C	系数, 土壤含水量
C	控制体积 W 内的污染物浓度
C_{as}	面源 s 处的污染物浓度
C^{bot}	通过含水层底部的补给中的污染物浓度
C_{ls}	线源 s 处的污染物浓度
C_{ps}	点源 s 处的污染物浓度
C_{sr}	地表径流系数
C_G	沿模型边界的地下水中的污染物浓度
D	系数, 直径
D_3	基于段的迹线追踪传播
D_n	基于节点的迹线追踪传播
ET	潜在蒸发
ET_0	潜在蒸发参考值
ET_p	潜在蒸腾
H	电势 (水头), 地下水位
H_i	高斯点 x_i 的权重系数
$H_{\min}$	影响下水道补给的最低水位
H_s	下水道典型水头
H^*	哈伯特流体势, 电势

$\overline{H}$	边界处规定的水头
Inflow	进入控制体积的水的体积
J	雅可比矩阵
K_{ij}	水力传导系数张量, 第 j 个方程的第 i 个系数
K_{top}	低渗透层 (隔水层) 的水力传导系数
K_s	饱和水力传导系数
K_x	x 方向的饱和水力传导系数
K_y	y 方向的饱和水力传导系数
K_z	竖直方向的饱和水力传导系数
L	基础 PDE 的一般形式, 长度
M	含水层单元的厚度, 水的分子量
N	计算节点的总数
N_1, N_2, N_n	多项式形式的基函数
N_a	面源数
N_i	外部来源流入的水的积累率, 第 i 个多项式
N_j	第 j 个多项式, 计算节点数
N_l	线源数
N_p	点源数
N'	N 的转置
Outflow	流出控制体的流体体积
P	净降雨量
PAT	描述一个量如何随时间变化的形函数
P_0	降雨量参考值
P_{eff}	有效降雨量
Q	出口处的径流
Q_{as}	来自面源 s 的体积补给率
Q_{ls}	来自线源 s 的体积补给率
Q_{ps}	来自点源 s 的体积补给率
R	通用气体常数
R_1	第一时间步长的过量降雨
R_{off}	直接径流
RH	相对湿度
S	含水层释水系数