



PCSWMM
Stormwater Management Model
Theory and Application

[加] 加拿大计算水力研究所
(Computational Hydraulics International) / 著
于 磊 龙玉桥 等 / 译著

PCSWMM

雨洪管理模型
理论与应用

中国环境出版集团

PCSWMM 雨洪管理模型理论与应用

[加] 加拿大计算水力研究所 著
(Computational Hydraulics International)

于磊 龙玉桥 等 译著



中国环境出版集团·北京

图书在版编目(CIP)数据

PCSWMM 雨洪管理模型理论与应用/加拿大计算水力
研究所著;于磊等译著. —北京:中国环境出版集团,
2019.10

ISBN 978-7-5111-4129-3

I. ①P… II. ①加…②于… III. ①城市—暴雨洪水
—雨水资源—水资源管理—水文模型—研究 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 231035 号

出 版 人 武德凯
责任编辑 周 煜 宋慧敏
责任校对 任 丽
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67138929 (第六分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2019 年 10 月第 1 版
印 次 2019 年 10 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 37.75
字 数 804 千字
定 价 150.00 元

【版权所有。未经许可,请勿翻印、转载,违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本集团更换

中国环境出版集团郑重承诺:

中国环境出版集团合作的印刷单位、材料单位均具有中国环境标志产品认证;
中国环境出版集团所有图书“禁塑”。

序

在全球气候变化和城镇化快速发展的共同影响下，城市极端暴雨和洪涝事件近年来呈现增多趋强的趋势。根据水利部应对气候变化研究中心的分析成果，1981—2010 年与 1961—1980 年两时段暴雨序列相比，上海、南京、苏州、宁波等长三角地区主要城市的主城区暴雨天数增幅明显高于郊区。在城镇化进程快速推进的过程中，由于城市不透水面积增加，下渗率减少和流域汇流加快，以及城市排水除涝系统建设不够完善或遭破坏等因素，导致我国城市洪涝问题愈加突出。同时，随着经济社会的发展，城市生活污水和工业废水排放量大幅度增加，引起了城市水体水质恶化、水生态退化等诸多环境和生态问题。城市洪涝和生态环境恶化是当今世界最突出、最急需解决的环境问题，世界各地都进行了探索和实践，如我国的海绵城市建设和水生态文明建设、美国的低影响开发（Low Impact Development, LID）、澳大利亚的水敏感城市建设（Water Sensitive Urban Design, WSUD）、英国的可持续城市排水系统（Sustainable Urban Drainage System, SUDS）等。海绵城市建设是一项城市水综合治理的系统工程，基于城市水文发展规律，以城市规划建设和管理为载体，综合采用和有机结合绿色、灰色基础设施，充分发挥植被、土壤、河湖水系等对城市雨水径流的积存、渗透、净化和缓释作用，使得城市如同海绵一样具有良好的弹性和可恢复性，从而有效减缓自然灾害和环境恶化的影响，实现城市防洪治涝、水资源利用、水环境保护与水生态修复的综合效益。

PCSWMM（城市暴雨污水及流域雨洪管理建模软件）是加拿大计算水力研究所（Computational Hydraulics International，简称 CHI）基于美国国家环境保护局（United States Environmental Protection Agency，简称 USEPA）雨洪管理模型（Storm Water Management Model，SWMM）和 EPANET 开发的商业化软件，是一个全面、专业的城市和流域排水系统、供水系统建模工具。自 1984 年

上市以来,其用户已遍布全球 85 个国家及地区,为不同国家及地区海绵城市建设的规划—设计—建设—管理提供全过程的技术支持。PCSWMM 于 2016 年入围我国《海绵城市建设先进适用技术与产品目录(第一批)》(建科评〔2016〕6 号)。PCSWMM 主要应用于低影响开发评估、滞洪蓄水设施设计、排水管网设计与评估、洪水风险分析、一维管道与二维洪泛区耦合模拟、集水区和流域管理建模、动态双排水系统设计、水质评估及污染负荷控制、卫生系统设计、雷达降雨校准等多领域,已取得大量的项目应用成果。该软件具有强大的水文、水力、水质模拟模块,能够计算降雨地表产流、地表汇流、管网水动力传输和水质变化,可模拟完整的降雨径流和污染物运移过程,对单场暴雨或连续暴雨所产生的降雨径流进行动态模拟,并解决与暴雨径流相关的水量与水质问题。

本书译著团队通过对大量中英文文献资料的搜集整理,从基本原理、操作界面、功能实现、典型案例四个方面对 PCSWMM 软件进行了详细介绍。在基本原理方面,详细介绍了 PCSWMM 的模块组成、基本原理、模型对象及相应的计算方法;在操作界面与功能实现方面,详细介绍了软件的各类操作界面、主要功能的实现方法和多种模型的操作过程;在典型案例方面,详细介绍了一维-二维耦合城市洪水模拟、LID 模拟、水质模拟、双排水系统模拟等案例;附录部分详细说明了 PCSWMM 的术语、文件类型、常用参数取值等内容。

目前,尽管 PCSWMM 软件已经在国内外得到了较广泛的应用,然而有关技术资料绝大多数仍为外文,本书是国内第一本系统介绍 PCSWMM 软件的中文图书。本书理论基础扎实、逻辑结构清晰、内容丰富、深入浅出,可作为 PCSWMM 软件应用的辅助工具书,特向各位从事城市雨洪资源利用、管理和研究的科研人员和工程技术人员推荐。衷心希望本书的出版,能够对相关研究人员开展城市降雨径流和水质模拟工作有所帮助,以提升对城市水问题的认识,为我国城市洪涝灾害防治、水环境提升和雨洪资源综合利用提供技术支撑。

中国工程院院士
南京水利科学研究院院长

张健云

2018 年 9 月 6 日

前 言

当前,我国正处于城镇化高速发展阶段。1981年全国城镇化率仅为20.2%,而2017年达到了58.52%,城市建成区面积也由1981年的0.74万 km^2 增长至2016年年底的5.43万 km^2 。我国城镇化已由单个城市的快速发展转变为多个城市组团发展的格局。加快城市群建设发展是我国“十三五”期间的重要任务。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》明确提出京津冀、长三角、珠三角等19个城市群建设发展布局。

城镇化对于推动我国经济社会现代化起到了至关重要的作用,然而在快速城镇化进程中也产生了一系列资源环境问题,其中城市水问题尤为突出,已成为影响城市公共安全和人居环境的突出问题,严重制约了城市可持续发展。城市水问题主要表现在水资源、水环境和水生态、洪涝灾害三个方面,且在我国诸多城市中同时存在并相互交织。

随着我国城市水问题的凸显,“建设自然存积、自然渗透、自然净化的海绵城市”已迫在眉睫。自2013年习近平总书记提出建设海绵城市以来,中央政府投入巨资先后资助了两批共30个海绵城市建设试点,许多非试点城市也积极将海绵城市理念与模式应用于城市水问题治理。海绵城市的建设需在自然地理、经济背景、区域水问题的基础上,制订顶层设计方案,从流域、区域、城市、社区等不同尺度上制定建设方案。

PCSWMM(城市暴雨污水及流域雨洪管理建模软件)是加拿大计算水力研究所(Computational Hydraulics International, CHI)基于美国国家环境保护局(USEPA)SWMM(Storm Water Management Model)和EPANET开发的商业化软件,是一个成熟的、综合的城市暴雨水量、水质预测和管理模型,能通过模拟分析预报城市雨洪、内涝积水、管网排水、污染迁移等情况,为海绵城市建设的规划—设计—建设—管理提供全过程的技术支持。

本书的译著者是在学习和使用PCSWMM的过程中汇聚在一起的。随着交

流的不断加深,大家共同意识到急需一本全面、系统地介绍 PCSWMM 的中文书籍,这便有了译著此书的初衷。本书是 PCSWMM 英文教学资料的中文译著版,系统地介绍了 PCSWMM 的基本原理、操作界面和典型实例,其主要内容来源于 CHI 的技术支持网站。

本书主要面向水利、市政、环保等有关专业的科研和工程技术人员,科研院所相关专业的教师、学生、培训师也可以将其作为参考资料使用。考虑到本书读者可能具有不同的专业背景,对本书所述内容的熟悉程度不尽一致,因此本书从基础知识开始,逐步引导读者进入专业级别的主题。

基础部分(第1章和第2章)介绍了 PCSWMM 的基本原理和操作界面,专业部分(第3章和第4章)介绍了如何实现专业功能和典型实例。本书将涉及的重要术语和常用参数列在附录中,方便读者快捷查阅。读者可以按章节顺序阅读使用本书,通过了解原理等基础知识,理解和掌握软件的功能和操作,最终应用于典型实例。有一定基础的读者也可以将本书当作工具书,直接查阅感兴趣的章节内容。

参加本书译著的人员有于磊、龙玉桥、崔婷婷、刘海娇、杨丽慧、薛丽娟、王姝、程琳琳、李伟、李海杰、吴春勇、周美娜等。全书由于磊和龙玉桥统稿。在译著伊始,译著者们并未预计到本书的译著是一项十分艰巨的任务。两年来,译著者在肩负繁忙工作的同时,保持着密切的联系,多次集体磋商、研究,重复着翻译、校对、统稿的工作。在翻译和定稿的过程中,我们重新编排了外文原著章节的次序,补充了原文中省略的词句,增添了注释,以便读者更好地理解有关内容。我们与 CHI 的相关专家反复讨论确定书稿的内容,力求准确地表达原文的含义。为了正确地阐述相关基本原理,并使译文符合中文习惯,我们参阅了有关著作与文献的原文,并参考了《水文学手册》《水文学原理》等基础文献以及国内介绍 SWMM 的相关书籍。本书受到水利部技术示范项目(SF-201706)资助。

尽管译著者们付出了辛劳与努力,但跨文化的专业著作翻译极具挑战。原文中有些术语尚新,含义晦涩,译文欠缺“信达雅”之处,恳请读者不吝指正。

译著者

2019年9月5日

目 录

1	PCSWMM 基本原理	1
1.1	计算模块与模型对象	2
1.2	计算方法	32
1.3	二维模型基本原理	51
2	操作界面	55
2.1	主界面	55
2.2	“文件”面板	56
2.3	“项目”面板	58
2.4	“属性”面板	108
2.5	“地图”面板	136
2.6	“表格”面板	148
2.7	“图表”面板	150
2.8	“剖面”面板	153
2.9	“详细资料和状况”面板	155
3	功能实现	168
3.1	项目管理	168
3.2	方案处理	177
3.3	地图对象处理	190
3.4	时间序列处理	279
3.5	打印、报告、演示	287
3.6	误差分析和校准	292
3.7	导入数据	297
3.8	导出数据	303
3.9	模型审核	313

3.10	一维-二维耦合模型	327
3.11	一维洪水模型	363
3.12	LID 及绿色基础设施	374
4	典型案例	383
4.1	入门练习篇	383
4.2	起步练习篇	396
4.3	LID 建模篇	450
4.4	一维-二维耦合模型篇	471
4.5	水质模拟篇	498
4.6	PCSWMM 工具篇	509
4.7	一维淹没模型篇	523
4.8	农村 SWMM 模型篇	532
4.9	卫生系统建模篇	535
4.10	调度控制建模篇	553
5	附录	574
5.1	PCSWMM 术语	574
5.2	PCSWMM 文件类型	582
5.3	常用参数取值	586
	参考文献	593

1 PCSWMM 基本原理

PCSWMM（城市暴雨污水及流域雨洪管理建模软件）是加拿大计算水力研究所（Computational Hydraulics International, CHI）基于美国国家环境保护局（USEPA）SWMM（Storm Water Management Model）和 EPANET 开发的商业化软件，是一个全面、专业的城市和流域排水系统、供水系统建模工具。该软件于 2016 年入选《海绵城市建设先进适用技术与产品目录（第一批）》（建科评〔2016〕6 号），于 2017 年入选“第十四届国际水利先进技术（产品）推介会名录”。自 1984 年上市以来，其用户已遍布全球 85 个国家及地区，广泛应用于防洪排水系统设计、滞洪蓄水设施设计、洪水风险分析、海绵城市 LID 规划设计、水质分析、污染控制、污水管路、城市暴雨管理和供水管理等方面。

PCSWMM 具有霍顿（Horton）、格林-安普特（Green-Ampt）等 5 种入渗模型可供选择；支持水文学及水动力学 2 种计算方法；可通过 8 种误差测量方式对反应函数、目标函数进行多重验证；支持单机多核并行计算和局域网内多台电脑并行计算 2 种并行计算方式；内置 60 余类设计暴雨模型；支持 50 余种 GIS/CAD 格式数据的直接导入；可模拟水泵、管道、堰等 10 余种工程设施过水情况；支持入渗沟槽、透水路面、集雨桶等 8 种常用 LID 设施模拟；不限制模型规模大小，可为 250 000 条以上的管道、渠道提供优化支持；具有丰富的快捷工具，能有效节约项目建模时间，提高工作效率；具有强大的后处理功能，拥有绘图、动画和数百万数据点的分析绘制、报告、打印以及全面的导入、导出工具；提供 SRTC（基于灵敏度的无线电调谐校准）模型校准工具，能够快速准确地实现模型校核。

PCSWMM 是基于 EPA SWMM 和 EPANET 开发的商业化软件，其地表产汇流计算、管网水力计算、水质计算原理与 SWMM 相同，但 PCSWMM 并不拘泥于 SWMM，它在 SWMM 的基础上开发了衍生时间序列、数学表达式和一维-二维耦合模型等功能。本书将在接下来的内容中介绍 SWMM 以及 PCSWMM 自有的基本原理。

1.1 计算模块与模型对象

1.1.1 计算模块

SWMM 将排水系统概化为在几个主要环境模块间交换的一系列水流和物质流，并利用计算模块和 SWMM 对象实现水量和水质的模拟。SWMM 的计算模块包括大气模块、地表模块、地下水模块和运移模块。

降水和污染物从大气模块降落到地表模块上。SWMM 使用雨量计对象描述进入排水系统的降水量。

地表模块接收来自大气模块中雨或雪形式的降水，并将接收的降水以入渗的形式出流至地下水模块中，或是以地表径流和污染物负荷的形式输送到运移模块中。SWMM 使用一个或多个汇水区对象刻画地表模块。

地下水模块接收地表模块的入渗量，并将部分入渗量输送到运移模块。SWMM 采用含水层对象刻画地下水模块。

运移模块将水流输送至排水口或水处理设施，它由一系列输水单元（渠道、管道、泵和阀门）、存储单元或水处理单元组成。此模块的入流项包括地表径流、地下水、壤中流、下水道系统生活用水（旱季入流）或用户自定义的流量过程。SWMM 采用节点对象和链路对象刻画运移模块的各组成部分。

一个 SWMM 模型中并不需要包括所有的计算模块。例如，可以将预定义的流量过程作为模型输入项，仅模拟运移模块代表的水流运动和污染迁移过程。

1.1.2 可见对象

1.1.2.1 雨量计

雨量计为研究区域内的一个或多个汇水区提供降雨量数据。雨量数据可以是自定义的时间序列，或来自外部文件。SWMM 支持多种常用雨量数据文件格式，以及一种标准的自定义格式。

雨量计的主要输入参数包括：

- 雨量数据类型（如强度、体积或累计降水量）；
- 记录时间间隔（如每小时、每 15 分钟等）；
- 降雨量数据来源（输入时间序列或外部文件）；
- 降雨量数据源名称。

1.1.2.2 汇水区

汇水区是陆地的一个水文要素，在地形和排水系统的作用下，汇水区中的地表径流都汇集到一个排泄出口。根据需要将研究区域划分为一系列汇水区，并确定各汇水区出口节点。排水口可以是排水系统的节点，也可以是其他汇水区的节点。

汇水区被划分为透水区域和不透水区域。地表径流能渗入透水区域的上部土层，但是不能渗入不透水区域。不透水区域被划分为两部分：一部分是具有洼地蓄水功能的区域，另一部分是不具备蓄水功能的区域。同一个汇水区中，径流可以从一个区域流向另一个区域，不同区域中的径流也可直接流向汇水区的排泄出口。

SWMM 有 5 种入渗模型描述降水渗入汇水区上部饱和土壤层的过程，分别是霍顿模型、改进的霍顿模型、格林-安普特模型、改进的格林-安普特模型和曲线数法。

当降水以降雪的形式发生时，为了模拟汇区内降雪的堆积、再分配和融化过程，必须为其设置一个积雪对象。为了模拟汇水区下部含水层和排水系统节点之间的水量交换，必须为该汇水区分配一组地下水参数。汇水区的污染物积累和冲刷与该汇水区的土地利用情况有关。在汇水区中设置 LID 控制对象后，SWMM 就可以模拟 LID 设施收集和储存降水和径流的情况。SWMM 可模拟的 LID 设施包括生物滞留单元、渗渠、透水铺装、植草沟和雨水桶。

汇水区的主要输入参数包括：

- 雨量计；
- 出流节点或汇水区；
- 土地利用类型；
- 汇水区面积；
- 不透水性；
- 坡度；
- 坡面汇流特征宽度；
- 透水区域和不透水区域表面的曼宁系数 n ；
- 透水区域和不透水区域的洼地蓄水量；
- 无洼地蓄水的不透水区域面积百分比。

1) 汇水区划分工具

PCSWMM 中的子流域划分工具（Watershed Delineation Tool, WDT）是根据数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）划分汇水区的多功能工具。它具有一个“烙印河流”（burn-in a stream）的选项，可根据河流曲线图层创建一个修正的 DEM。与现有的汇水区划分软件相比，PCSWMM 工具不仅能划分汇水区，还能产生一个完全与之匹配的 SWMM

模型。模型中的汇水区、汇流点和河流管渠是正确相连的，各模型实体也被赋予了与 DEM 相关的参数。如果存在已有模型，PCSWMM 将沿用该模型水力学设置，只在上游区域生成汇水区 and 新增的水力学计算部分（例如，如果在该区域有一个 HEC-RAS 模型）。

PCSWMM 中的汇水区划分工具通过流向计算、流量累积计算、基于阈值的河流界定计算和汇水区划分等一系列计算步骤将汇水区划分出来（Jenson and Domingue, 1988; Maidment, 2002）。如果在模型中定义了排水口，则将排水口视为出流点，并根据出流点划分汇水区。如果没有定义排水口，子流域划分将在整个 DEM 范围内进行。

可从地图面板中访问子流域划定工具：工具→汇水区→汇水区划分（如图 1-1 所示）。

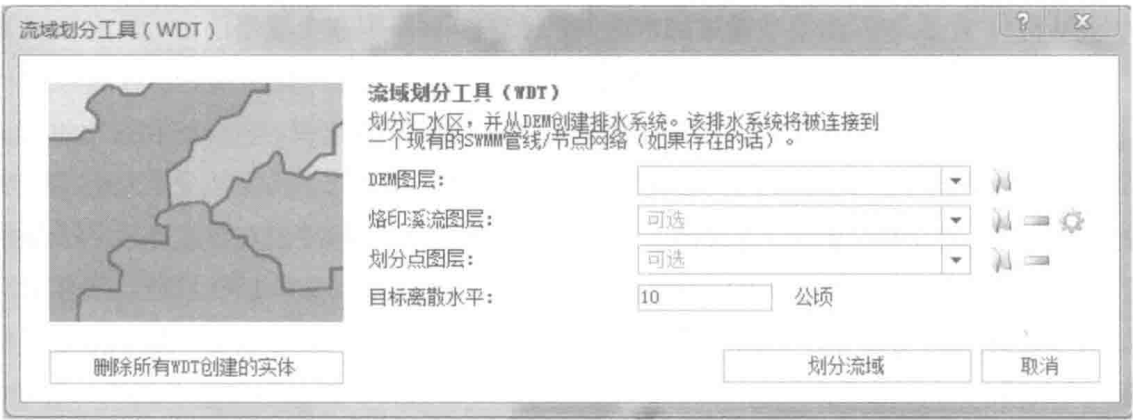


图 1-1 汇水区划分 WDT 工具设置窗口

汇水区划分所涉及的步骤包括：

- 烙印河流（burn-in a stream）（可选）

烙印河流选项会在原来的 DEM 上沿着指定的线状图层刻画或烙印出一条沟渠。PCSWMM 使用 AGREE DEM 方法（Hellweger, 1997）完成烙印河流运算。它可使高程沿着河流线急剧下降 100 m，也可使高程在指定的河流宽度范围内平稳下降。这使得它能消除由交叉道路和真实水坝引起的 DEM 高程的突变。

- 填洼（Filling Pits）

DEM 中的局部凹陷会影响 DEM 单元上的连续水流。填洼确保了 DEM 的水文正确性。PCSWMM 使用 Planchon 和 Darboux（2001）的方法来消除所有的凹坑或洼地。在去除洼地的过程中，如果存在排水口，这些排水口将被当作蒙版，以保持其高程不变（这是为了防止烙印的河流被再次填充）。PCSWMM 会保存一个名为“WDT FillPits”的新 DEM 图层。

- 计算流向（Flow Direction）

水流出计算单元的方向即为流向。计算单元与相邻的 8 个单元间最大的坡度决定了水流的方向。因此，这种方法被称为 D8 法（Jenson and Domingue, 1988; Tarboton, 1997）。

在地势平坦的区域确定水流方向是很困难的，PCSWMM 采用 Barnes 等（2014）的研究成果分析地势平坦区域的水流方向，其分析成果与 Garbrecht 和 Martz（1997）的成果类似，但效率更高。PCSWMM 会将分析成果保存成一个名为“WDT 流向”的新 DEM 图层。

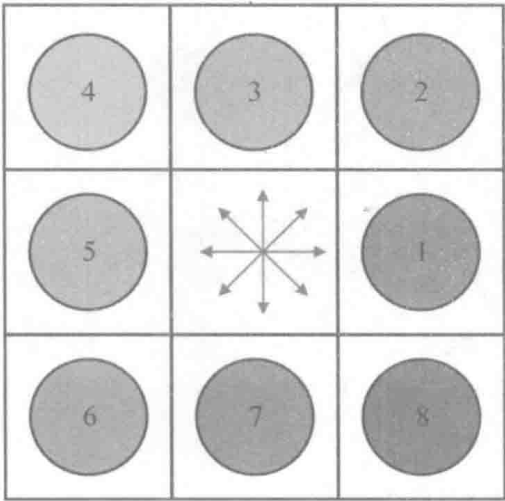


图 1-2 D8 法的计算单元与相邻 8 个单元

PCSWMM 创建网格，并且为每一个 3×3 的网格找到最低点网格，然后保存为一个新的栅格网格图层。

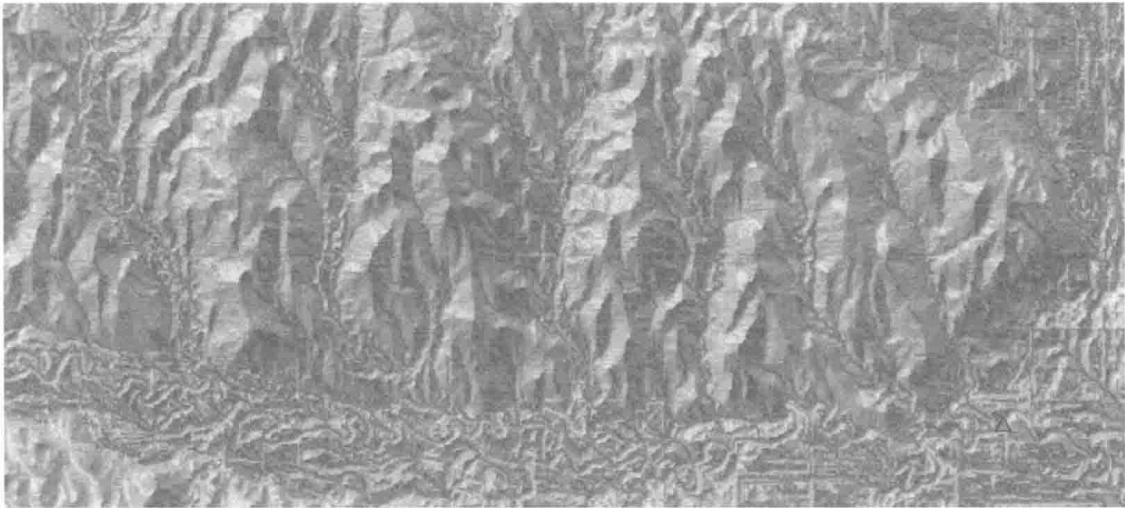


图 1-3 流向土层示意图

● 汇集贡献区域（Contributing Area）

基于水流通过的栅格网格数量，建立一个“贡献区域（或流量累积）”DEM 图层。PCSWMM 会保存一个名为“WDT 贡献区域”的新 DEM 图层。

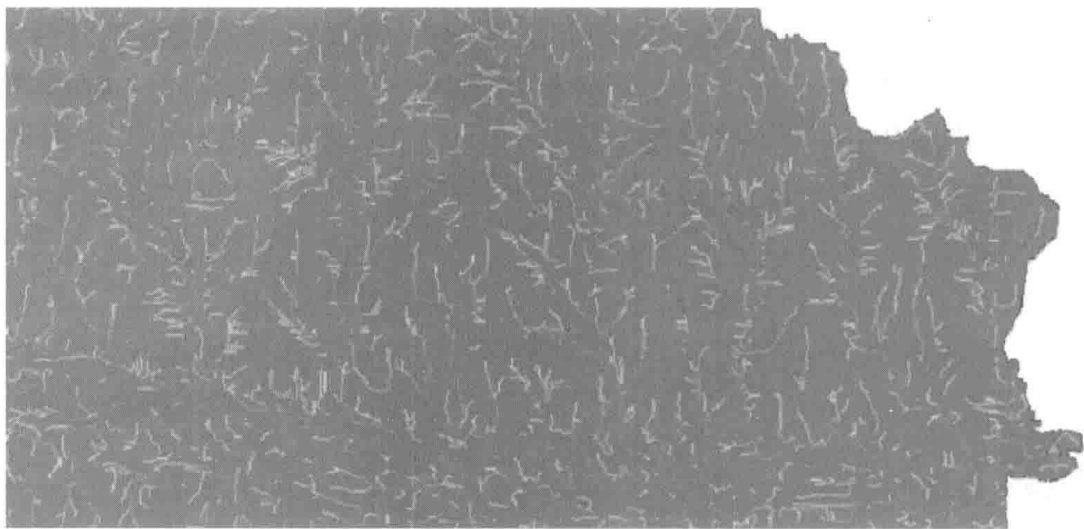


图 1-4 贡献区域

● 定义河流 (Stream Definition)

用户通过设定的河流阈值 (若使用公制单位, 贡献区域面积以 hm^2 表示, 若使用美制单位, 则以 $\text{acre}^{①}$ 表示) 定义河网。每个像素被分配一个 0 值 (以绿色显示) 和 1 值 (以红色显示), 如果一个像素被分配了 1 值, 则意味着该像素的面积足够大, 足以将其视为河网的一部分。PCSWMM 会保存一个名为 “WDT 河流阈值” 的新 DEM 图层。

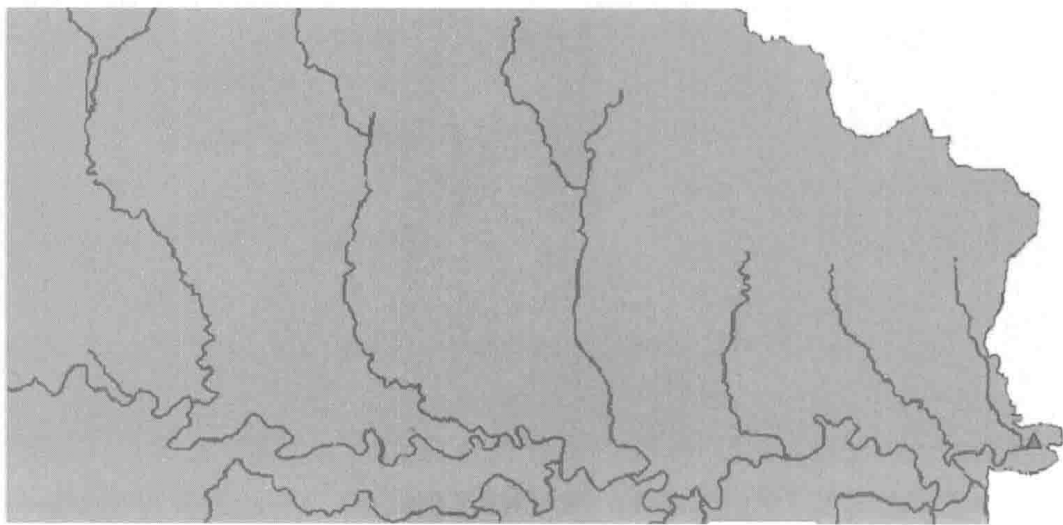


图 1-5 WDT 河网

① $1\text{acre} = 0.404\,856\,\text{hm}^2$ 。

● 汇水区划分 (Watershed Delineation)

借助河流栅格和汇集区域即可划定汇水区。每个单独的子流域是在每个河流线汇交点处进行划定的。如果待划分区域内有排水口，则在汇水区划定前，所有排水口都要归入最近的河流中。

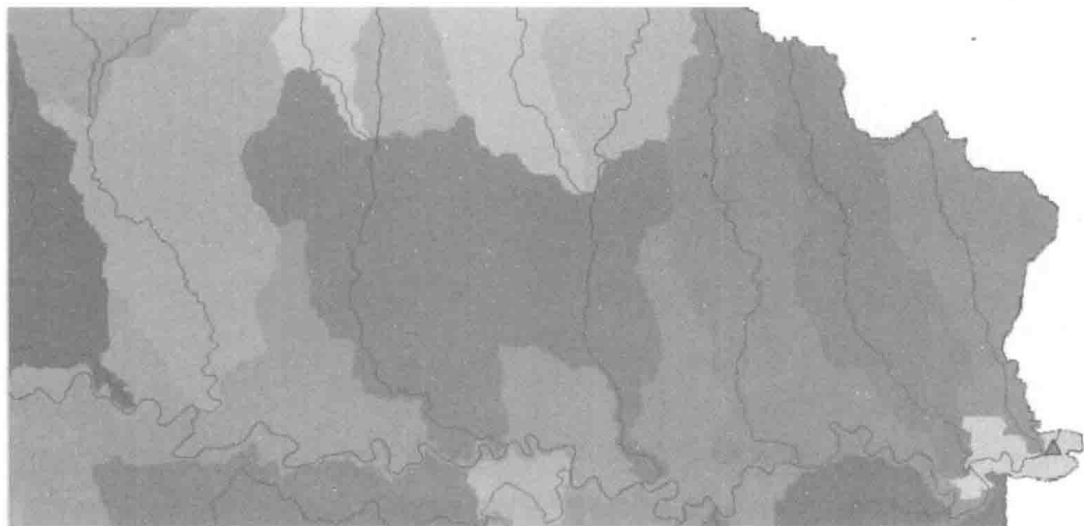


图 1-6 汇水区划分

如果选择了“优化汇水区大小”选项，PCSWMM 会合并相邻的小汇水区，从而减少小汇水区的数量，并在较大的汇水区中使用较小的阈值将过大的汇水区离散成较小的汇水区（基于内部参数）。

如果选择了“使汇水区平滑”选项，划定的汇水区将被平滑化，以移除锯齿状的线条。此操作可能会产生重叠或小缺口。一般情况下，新管渠需要平滑的汇水区。

所有创建的 DEM 图层将以 ArcInfo 二进制栅格格式 (FLT) 保存到与被分析的 DEM 图层相同的文件夹中。

● 创建水文/水力学模型

创建的汇水区将在水文模型中起到集水的作用。在划定汇水区之前，已有的汇水区将被移动到名为“旧汇水区”的背景图层中，并用红色线条表示，而新划定的汇水区则以蓝色线条表示。

划分之后，软件将根据 DEM 更新汇水区参数。将根据坡度图层生成划定汇水区的平均坡度，并采用 Guo 和 Urbonas (2009) 的方法计算汇水区的宽度。

在汇水区划定后，新生成的水力网络（汇流点和管道）将被合并到已有的网络中。原有管渠将表示为黄色实线，而新生成的 DEM 管渠将以红色虚线表示。一些原有的管渠可能会被分解，以便连接至新的支流中，并根据 DEM 图层确定新汇流点的底部高程。

如果汇流点的前缀是空的（默认对话框），则将它设置为“J”，以避免与原有的汇

流点和汇水区名称相同。所有新生成的汇流点、管渠和汇水区将标记上“WDT”，以示区别。

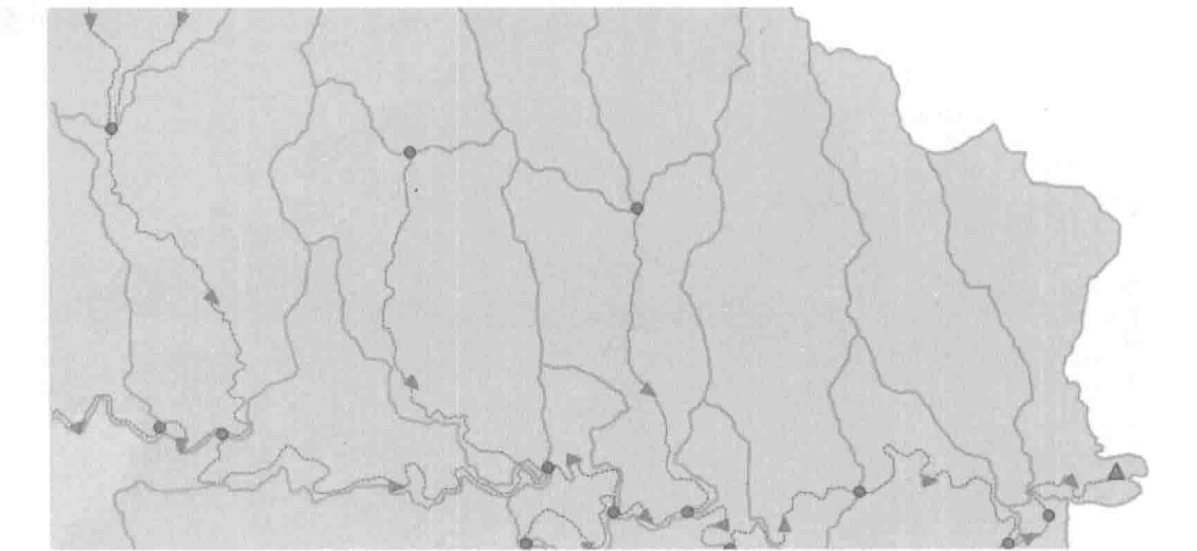


图 1-7 WDT 执行后的结果

2) WDT 实体属性

WDT 计算的属性将用于所有新创建的实体。所有其他属性值均采用系统的默认设置。如果需要加载来自 WDT 网络的侧向入流，就需调整此时已有的 SWMM5 实体。如果 WDT 创建的实体不影响原有水力模型实体，则不需改变原 SWMM 模型属性值。

表 1-1 WDT 创建的实体属性

图层	属性	WDT 工具改动
汇水区	标签	“WDT”
	出水口	基于汇水区最低底部高程的检查井分配出水口
	面积	基于地图坐标系统计算汇水区面积
	宽度	使用 Guo 和 Urbonas (2009) 方法计算
	流长	汇水区面积与宽度之比
	坡度	根据 WDT 坡度图层划定汇水区的平均坡度值
检查井	名称	以前缀“J”命名
	标签	“WDT”
	底部高程	使用 DEM 高程计算
	深度	假设为 0