



# 河南省水文地质与 环境地质问题研究

—2007 年河南省水文地质环境地质地质灾害论文集

河南省地质学会水文地质与环境地质专业委员会 编  
河南省地质学会地质灾害专业委员会



黄河水利出版社

# 河南省水文地质与环境地质问题研究

——2007年河南省水文地质环境地质地质灾害论文集

河南省地质学会水文地质与环境地质专业委员会  
河南省地质学会地质灾害专业委员会 编

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

本书是河南地质工作者近年来对全省水工环地质调查研究工作部分成果的总结,内容涵盖水文地质、环境地质、地质灾害防治等方面,具有较强的实践性和指导性。

本书可供相关技术人员借鉴参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

河南省水文地质与环境地质问题研究:2007年河南省水文地质环境地质地质灾害论文集/河南省地质学会水文地质与环境地质专业委员会,河南省地质学会地质灾害专业委员会编. — 郑州:黄河水利出版社,2008.4

ISBN 978 - 7 - 80734 - 409 - 4

I. 河… II. ①河…②河… III. ①水文地质 - 河南省 - 文集②环境地质学 - 河南省 - 文集③地质灾害 - 河南省 - 文集 IV. P641 - 53 X141 - 53 P51 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 042166 号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13

字数:300 千字

印数:1—1 000

版次:2008 年 4 月第 1 版

印次:2008 年 4 月第 1 次印刷

---

定价:30.00 元

## 编辑委员会

顾问：杨昌生 谢俊卿

主任：甄习春 梁世云

编委：（以姓氏笔画为序）

王军领 王现国 王心义 乔国超

张 良 杨昌生 赵云章 梁世云

谢俊卿 甄习春 皇甫行丰

执行主编：甄习春 朱中道 宋云力 邱金波

# 前 言

河南省人口众多,地质条件复杂,自然资源相对不足。对地质环境和自然资源的过度开发和不合理利用,造成了自然生态的失衡和破坏,各类环境地质问题凸现,不少地方呈现出资源、环境双向恶化的趋势。随着经济的高速发展,面临的人口、资源、环境问题还会发展,并成为经济发展、社会进步的制约因素。

为系统总结河南省近年来水文地质、环境地质和地质灾害方面的研究成果,2007年9月,由河南省地质学会水文地质与环境地质专业委员会、河南省地质学会地质灾害专业委员会共同主办,河南省地质环境监测院协办、河南省地矿局第一地质工程院承办的“2007年河南省水文、环境、灾害地质学术交流会”在驻马店铜山湖召开。会议收到论文40余篇,内容涵盖水文地质、环境地质、地质灾害等方面,涉及面广,针对性强。这些论文既是宝贵的经验总结,又是初步的理论概括,将为今后的进一步研究打下基础。会后结集出版了《河南省水文地质与环境地质问题研究》。

本书的出版,河南省地质学会、河南省地质环境监测院给予了大力支持,河南省地矿局第一地质工程院给予了经费资助,也凝聚着专业委员会各委员单位领导、地质工作者的劳动和心血,在此一并致谢。

编 者

2007年11月

## 目 录

- 单孔多层地下水监测井设计与建设 ..... 甄习春 朱中道 卢豫北(1)
- 降水入渗过程中优先流量的计算 ..... 齐登红 赵承勇 常珂(6)
- 地质灾害前兆监测与临灾过程的模拟和控制 ..... 李满洲(14)
- 河南省平原区浅层地下水动态演变特征 ..... 王继华 王新让(20)
- 郑州市地下水水质现状分析 ..... 王新让 董伟 朱中道(24)
- 河南省三门峡市地热资源开发前景预测评价 ..... 黄光寿 李国敬 张炜等(29)
- 陕县温塘地热矿泉水的合理开发利用 ..... 商真平 姚兰兰 张巍(36)
- 东沟铝矿区水文地质特征 ..... 王军强(39)
- 丹江口水源区(河南省域)矿山地质环境问题及其对库区环境的影响  
..... 罗文金 王军领 刘春华等(43)
- 强风化花岗岩区滑坡的勘查方法 ..... 商真平 姚兰兰(47)
- 山西平顺天脊山国家地质公园地质遗迹特征及评价  
..... 黄光寿 王春晖 郭山峰等(52)
- 河南洛宁神灵寨地质公园地质遗迹评价 ..... 郭自训 杨新梅(59)
- 南水北调中线丹江口水源区(河南省域)矿山地质环境评价  
..... 吕志涛 王军领 郭公哲等(67)
- 方城县独树镇马庄萤石矿塌陷机理与防治措施 ..... 李进莲 王朝平(74)
- 中原油田矿区环境调查分析及保护、治理初步研究 ..... 孙建波 葛小冬(77)
- 河南省鲁山县尧山镇泥石流灾害治理的必要性 ..... 张辉 吕志涛 郭公哲(82)
- 注浆工艺在禹登高速路下伏采空区中的应用 ..... 张子恒 谢林(87)
- 乙二胺四乙酸二钠——钡容量法检测污水中硫酸盐 ..... 郑月贤 齐光辉 杨巧玉(91)
- 河南省重点防治地区地质灾害评价研究 ..... 黄景春 赵振杰 王玲等(93)
- 郑州市汛期地质灾害气象预警初步研究 ..... 李华 李俊英(101)
- 河南省地热资源开发利用现状及保护对策 ..... 王继华 杨怀军(107)
- 河南省鲁山县尧山镇石人山泥石流发育特征初探 ..... 王西平 祁合伟 李相晨(113)
- 南水北调中线总干渠Ⅳ段(黄河北~漳河南)泥石流沟的发育特征及  
防治对策探讨 ..... 马喜(118)
- 巩义小关铝矿主要矿山环境问题及其防治对策 ..... 陈学林(122)
- 基于 Web 的地质灾害预警信息发布与反馈系统研究 ..... 霍光杰(125)
- 中国银行焦作市支行办公楼基坑降水工作的几点启示 ..... 陈学林 秦琬玲(129)
- 陇海铁路(潼关—关帝庙段)地质灾害调查研究 ..... 杨军伟 杨巧玉 赵振杰(134)
- 河南泌阳县陡岸村泥石流特征及防治 ..... 魏玉虎 杨巧玉 李满洲等(139)
- 河南省汝州市滑坡地质灾害的发育特征及防治对策 ..... 马喜(144)

---

基层地质灾害防治工作存在的问题及对策 .....	耿百鸣(147)
沁阳市地质灾害发育特征及防治对策 .....	井书文 李洪燕(150)
注重固体矿产勘查中的水文地质工作,为矿山建设设计提供可靠保证 .....	李进化 张兴辽 张婉婉(154)
小秦岭金矿区矿渣泥石流灾害防治方法探讨 .....	王永良(158)
焦作市岩溶地下水污染状况及防治措施 .....	杨 涛 王 让 司 莉 等(161)
前游子庄地面塌陷形成原因及防治 .....	罗志吉 杨 涛 王 让 等(166)
浅谈河南省辉县市吴村煤矿沉陷区治理与环境恢复工程 .....	罗志吉 王 让 杨 涛 等(170)
新乡市地质灾害成因及防治浅见 .....	王 让 杨 涛 罗志吉 等(172)
注水采油对中原油田生态环境的影响分析 .....	赵修军 赵东力 宋红伟 等(176)
河南省巩义市铁生沟滑坡特征及防治措施研究 .....	田东升 董 伟(179)
河南矿业开发对地下水环境影响分析 .....	赵承勇 杨怀军(184)
连霍高速公路河南段地质灾害发育特征 .....	王现国 邱金波 刘 涛 等(189)
方城县地质灾害分布及发育特征 .....	于松晖(194)
河南省鲁山县段店铝土矿床底板突水预测 .....	曾文青 任鸿飞 黄志强 等(196)

# 单孔多层地下水监测井设计与建设

甄习春<sup>1</sup> 朱中道<sup>1</sup> 卢豫北<sup>2</sup>

(1. 河南省地质环境监测院 郑州 450016

2. 河南省郑州地质工程勘察院 郑州 450003)

**摘要:**在调研欧洲发达国家地下水多层监测技术的基础上,立足国内现有条件,经过充分论证,提出了松散岩类孔隙水地区单孔多层(4层)地下水监测井设计方案,在监测井的井孔设计、施工工艺、管材等实现了重大突破。成功完成了井深350 m的单孔多层地下水监测井建设,为类似地区单孔多层地下水监测井建设提供了技术示范,为国家地下水监测工程的实施提供了参考依据。

**关键词:**单孔多层 地下水 监测井 设计 建设

## 1 引言

我国监测井多以单井或一组不同深度的群井组成,存在的主要问题是投资大、施工周期长、占地多、不便于管理。监测井的管材多采用钢管或铸铁管,这种材料易腐蚀、维护难度大、使用寿命较短。为了解决上述问题,在黄淮海平原地区开展了单孔多层地下水示范监测井建设,力求在监测井的成井工艺和管材使用上有所创新,为国家地下水监测工程的实施提供参考依据。

## 2 区域环境条件

单孔多层地下水示范监测井位于郑州市区西南部。郑州北临黄河,是河南省省会,陇海—兰新经济带重要的中心城市,全国重要的交通枢纽,著名商埠,河南省政治、经济、文化中心,中原城市群的中心城市。

郑州是一个水资源严重缺乏的城市,人均水资源占有量为 $198\text{ m}^3$ ,尚不足全省人均值的 $1/2$ 、全国人均值的 $1/10$ ,水资源短缺已成为郑州市经济社会可持续发展的主要制约因素。地下水类型以松散岩类孔隙水为主,依含水层的埋藏深度和开采条件分为浅层、中深层、深层和超深层地下水。浅层地下水以 $\text{HCO}_3\text{---Ca}\cdot\text{Mg}$ 型为主;中深层地下水以 $\text{HCO}_3\text{---Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{---Ca}\cdot\text{Na}$ 型为主,达矿泉水标准;深层地下水水温一般为 $25\sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,属低温矿泉地热水资源;超深层地下水水温为 $40\sim 48\text{ }^\circ\text{C}$ ,属温热矿泉地热水资源。市区浅层地下水资源补给量为 $18\,747.5\text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,中深层地下水为 $11\,174.77\text{ 万 m}^3/\text{a}$ ;浅层地下水可采资源量为 $8\,332.557\,2\text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,中深层地下水可采资源量为 $11\,174.714\text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,深层矿泉水的可采资源量为 $4\,135.8\text{ 万 m}^3/\text{a}$ ,超深层矿泉水可采资源量为 $130.75\text{ 万 m}^3/\text{a}$ 。近年来,由于郑州市区违规凿井现象严重,造成地下水过量开采,地下水年开采量约 $8\,500\text{ 万 m}^3$ ,地下水水位平均以 $2.0\text{ m/a}$ 的速度在下降,中深层地下水降落漏斗面积近 $400\text{ km}^2$ 。

监测井位置的选择主要考虑了以下几个方面:一是具有区域水文地质单元代表性,郑



州市位于黄淮海冲积平原冲积扇顶部,松散层厚度超过 600 m,在含水层垂向上表现为下粗上细多个沉积韵律,可以作为黄淮海平原地下水系统的代表性控制点;二是监测资料具有实用性,监测井位于郑州市区浅层地下水和中深层地下水降落漏斗的边缘,示范监测井的布设符合《地下水动态监测规程(征求意见稿)》,可以有效监测郑州城市不同地下水开采层的动态变化,为地下水资源的合理利用、监督管理与保护提供可靠依据;三是有利于开展地下水开发利用和保护的科学的研究,监测井所在的郑州地下水均衡试验场在我国“六五”、“七五”期间进行了大量基础性的水文地质研究工作,积累了长系列的研究资料,并已列入国家地下水监测工程重点建设的地下水均衡试验基地,一孔多层地下水示范监测井建设可以与试验设施相结合,在地下水资源的合理利用和保护研究方面实现突破;四是施工条件便利,不需征地,水电路施工条件好,维护方便。

### 3 监测井的设计

#### 3.1 技术路线

我国单孔多层地下水监测井建设目前处于起步阶段,监测井的设计是以实现单孔多层地下水监测为目标,重点突破单孔多层监测井的设计、施工、成井、材料等成套技术,主要遵循成本低、耐腐蚀、使用寿命长、维护保养方便”等原则,进行了前期研究和论证工作。

(1) 研究不同水文地质条件下单孔多层地下水监测井建设的可行性。我国是水文地质条件复杂的国家,特别是北方缺水地区,地下水开发利用程度较高,地下水开发深度可达千米,地层复杂,含水层位多,成井技术难度大。建立单孔多层地下水监测井是否可行,在郑州地区监测深度控制在哪些范围、控制几层监测等都需要研究和论证。

(2) 在单孔多层地下水监测井建设过程中的钻探、扩孔、变径、下管、止水、洗井、无套管成井技术等方面进行试验研究,力求在施工和成井工艺上有所创新。

(3) 研究论证无套管一次成井技术和新材料应用,如采用 PVC-U 等新材料作为井管等,从成本、工期等方面论证其经济性。

为全面监控郑州市浅层、中深层和深层地下水的动态特征并便于对比,单孔多层地下水示范监测井设计井深为 350 m,全孔取心并录井。其中,0~180 m 钻井口径为 600 mm,180~350 m 为 450 mm。采用裸孔下入 4 根监测管分层成井方案,设计初期考虑观测管材料为球墨铸铁(规格 DN100,外径 118 mm)或 PVC-U 管,暂定小于 150 m 的观测管采用 PVC-U 管,大于 150 m 的观测管采用球墨铸铁管;设计审查时根据专家意见,将监测管材料定为 PVC-U 管,滤水管为 PVC-U 铊缝式。

#### 3.2 风险分析

该监测井首次在国内组织实施,尽管钻井深度只有 350 m,但是采用 PVC-U 管材在无井壁保护管的情况下,分别在同一眼井内成井 4 次尚属首次。所以,该项目存在的主要风险有以下几方面:

(1) 由于 PVC-U 管材密度仅  $1.45 \text{ kg/m}^3$ ,与泥浆密度差较小。所以,监测管在井内不容易下到位,并且目前采用该管材成井没有成功经验可借鉴。

(2) 成井过程中若泥浆参数不合理或其他措施不力时,很可能出现井管挤毁事故,特

别是 PVC-U 管材铣缝后强度降低。

(3) 钻井口径大,地层松散,分 4 次成井,在成井过程中有井壁坍塌的风险。

(4) 单孔多层成井若止水工序出现问题,将会导致 4 段含水层水位连通,工程报废。

针对上述存在的风险问题,在成井过程中必须严格从设备、钻探施工和事故处置、抗风险预案做到缜密考虑和部署,确保工程万无一失。

## 4 施工技术与成井工艺

### 4.1 钻探设备

目前,国内外还没有施工单孔多层地下水监测井的专用设备,本次选择红星-400 型钻机和 TBW-850/50 泥浆泵作为监测井的主要钻探设备,钻具和钻探辅助设备选择与常规水文水井一样。

### 4.2 钻探工艺

为保证岩心采取率,选择  $\phi 127$  mm 单管合金取心钻头,采用正循环泥浆钻井工艺,本次黏土层岩心采取率达 95%,砂层岩心采取率为 65.8%,平均岩心采取率为 80.4%。

扩孔采用正循环泥浆钻进工艺,由于该井上下口径不同,先用  $\phi 450$  mm 三牙轮钻头和钻具组合钻进至设计井深后,再用  $\phi 600$  mm 合金钻头和钻具组合钻进至 200 m,最后用  $\phi 450$  mm 三牙轮钻头划眼并下入井底进行彻底冲孔换浆。

### 4.3 管材

通过调研,选用江阴市星宇塑胶有限公司生产的  $\phi 110$  mm PVC-U 给水用硬聚氯乙烯管作为监测井管材。

国产 PVC-U 管材在深度超过 150 m 的井中应用几乎是空白,为此进行了管材和连接扣拉力试验、液压试验、落锤冲击试验和抗弯曲变形试验等专门试验(见表 1)。要求 PVC-U 给水用硬聚氯乙烯管规格为外径 110 mm、单根管长 6 m,井管材料技术参数应达到以下要求:

- (1) 监测井管采用丝扣连接方式,其拉力破坏极限不小于 18 000 N。
- (2) 滤水管采用 PVC-U 铣缝式,其缝宽为 1 mm,孔隙率在 10% 以上。

表 1 单孔多层地下水监测井 PVC-U 管材技术指标

规格	外径 (mm)	壁厚 (mm)	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	冲击试验 TIR(%)	液压试验 (MPa)	密封试验 (MPa)
参数	110	7.2	1.45	$\leq 5$	42	3.36

### 4.4 成井工艺

滤料选择河南嵩山产天然石英滤料,规格为  $\phi 2 \sim 5$  mm。

止水材料选择机制黏土球,规格为  $\phi 20$  mm。

钻井液类型为低固相钠土泥浆,其主要性能指标:相对密度为 1.0~1.2,黏度为 25~35,失水小于 30,切力为 5~10,pH 为 8~10。

下管分 4 次采用钻机提吊法由深到浅依次下入,管材连接通过管箍丝扣连接,管箍外

径为  $\phi 140$  mm。

止水根据孔内空间的大小,选择合适的滤料和黏土球直径,投滤料和黏土球的体积要计算精确,工序不能出错。

当 4 套井管全部下完和成井后,选择空压机分 4 次分别洗井至水清沙净,然后取 4 组水样进行水质测试。单孔多层地下水监测井成井结果见表 2。

表 2 单孔多层地下水示范监测井成井结果

监测井序号	成井深度 (m)	含水层位置 (m)	滤水管长度 (m)	水位埋深 (m)	水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	90.0	72.0 ~ 78.0	6.0	40.00	18.0
2	198.0	175.5 ~ 196.5	18.0	75.10	19.5
3	270.0	256.0 ~ 263.0	12.0	94.78	20.5
4	348.0	319.0 ~ 332.5	12.0	93.24	21.0

## 5 监测方案

单孔多层地下水监测井施工完成后,对采取的岩心进行登记和压缩存放保存,进行自动化监测运行。地下水自动化监测主要是依靠科技进步,更新与改进传统的地下水动态监测手段、方法与设备,逐步实现监测资料的处理、整理、分析、传输和监测成果发布的及时性、自动化、信息化和智能化。

在单孔多层地下水监测井中安装 4 套水位水温遥测、自动记录混合系统(XY-Ⅱ型)分站仪器,仪器探头位置分别在井口下 76.0 m、179.0 m、255.0 m、320.0 m 处,监测传输频率设置为 2 次/d。通过一个多月的调试运行,水位、水温动态基本稳定,分站、主站运行良好。

根据单孔 4 层地下水监测井的水位、水温动态变化曲线,分别与郑州市区就近的浅层、中深层、深层地下水动态比较,与该监测井附近各层位监测井水位与水温监测数值基本一致,变化幅度较小,充分说明单孔 4 层地下水示范监测井的分层止水效果显著。

## 6 结语

### 6.1 主要技术创新

该示范监测井项目的实施,使我国在单孔多层地下水监测技术方面取得了突破。

(1) 填补了国内单孔多层地下水监测井的一项空白。成功地完成最大井深 350 m 单孔多层地下水监测井建设,成为目前我国监测井深度最大、观测含水层段最多的单孔多层

地下水监测井。

(2)首次采用无套管成井工艺,解决了 PVC-U 管材下井困难和容易挤毁的问题,实现了单孔多层监测井施工中分层下管、分层止水和分别成井的技术创新。

(3)在井管材料应用上实现突破。本次选用的 PVC-U 管材具有重量轻、成本低、不腐蚀、不结垢等特点。通过该项目的实施,说明在 400 m 以内的多层监测井中采用 PVC-U 管材作为监测井管是可行的。PVC-U 管材在连接技术和 PVC-U 滤水管的加工等方面具有创新。

## 6.2 推广应用前景

监测井建设采用无套管成井工艺,平均每米监测井可节约成本 943 元。管材方面,采用 PVC-U 管材每米可节约成本近 100 元。单孔多层地下水监测井体现了节约用地、节省资金、缩短施工周期和便于管理等众多优点,还解决了井管腐蚀问题,不仅具有显著的经济效益,而且具有广阔的推广应用前景。

本文得到了河南省地矿局赵云章教授级高级工程师的悉心指导,在此一并致谢!

# 降水入渗过程中优先流量的计算

齐登红 赵承勇 常珂

(河南省地质环境监测院 郑州 450016)

**摘 要:**针对优先流难以定量描述的问题,以郑州地中渗透仪观测资料为基础,探讨了新乡亚砂土等试筒降水入渗过程及其优先流补给问题。通过土壤水分运移模拟模型刻画降水入渗过程中的活塞流,计算活塞流入渗量,再与实测降水入渗补给总量对比,确定优先流的量及其在总补给量中所占的比例。结果表明,随着土壤黏粒含量的增加,优先流所占比例呈增加趋势;随地下水位埋深的增大,优先流所占比例呈逐渐下降趋势。

**关键词:**地中渗透仪 优先流 降水入渗补给 模拟模型

## 1 序言

土壤中的优先流是指土壤在整个人流边界上接受补给,但水分和溶质绕过土壤基质,只通过少部分土壤体的快速运移。优先流的产生是由于土壤中往往存在大量的根孔、虫孔等大孔隙以及裂隙等,根据其形成原因,又被称为大孔隙流、绕流、漏斗流、指状流、沟槽流、捷径流、部分驱替流和地下风暴流等。优先流的运移速度快,对地下水补给起重要作用。准确确定优先流的量,对于深入认识入渗补给过程、准确评价地下水补给资源以及地下水污染分析具有重要意义,但土壤中分布着复杂的大孔隙和裂隙,导致优先流的量难以确定。目前,用于描述土壤中优先流的模型有基于可动-不可动概念的二流域模型、双重空隙模型、双重渗透性模型、运动波模型、两阶段模型等。这些模型大都需要了解土体的结构、渗透性等信息,而土壤大孔隙和裂隙的分布不规则性使这些模型的使用存在局限性。本文通过分析郑州地中渗透仪监测资料,研究了降水入渗补给过程,利用数值模拟技术,计算假定均质各向同性情况下地中渗透仪中的活塞式入渗补给过程,通过对比降水入渗实际观测资料和土壤水分运移模拟结果,来分离降水入渗过程中的活塞流量和优先流量,并计算出优先流量及所占比例。

## 2 降水入渗补给模式

降水入渗方式有两种,活塞式和捷径式(优先流)。活塞式入渗是鲍得曼(Bodman)等人于1943年在对均质砂进行室内入渗模拟试验的基础上提出的。这种入渗方式是入渗水的湿锋面整体向下推进,犹如活塞的推移,故称为活塞式入渗。活塞式入渗过程中的水分整体运移过程可直接用基于连续理论的理查德(Richards)方程刻画。

土壤中除了粒间孔隙、颗粒集体体内和颗粒集体体间的孔隙外,还存在根孔、虫孔和裂缝等大的孔隙通道。当降水强度较大,细小孔隙来不及吸收全部水量时,一部分降水将沿着渗透性良好的大孔隙通道优先快速下渗,并沿下渗通道水分向细小孔隙扩散,下渗水通过大孔隙通道的捷径流优先到达地下水。

### 3 优先流的确定方法

#### 3.1 确定机理

降水入渗过程中往往同时存在两种补给模式。由于降水入渗补给过程中包气带中的水分除存在垂向运移外,还存在水平运移,而且大孔隙、裂隙的分布规律很难刻画,因此优先流的量及其在总入渗补给中所占的比例很难确定。地中渗透仪可以直接测量降水入渗补给量,而且其四周封闭,土体内水分以垂向一维运移为主。测量值包括了优先流及活塞流,假定活塞流可用 Richards 方程刻画,比活塞式先补给地下水的那部分实测补给量即为优先流的量(见图 1)。

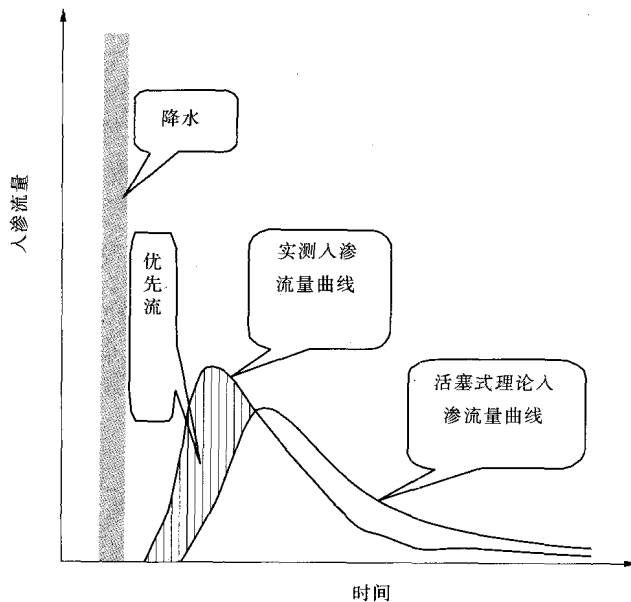


图 1 优先流补给模式与活塞式补给模式入渗曲线对比示意图

#### 3.2 活塞流描述

地中渗透仪中活塞流可用一维非饱和土壤水分运移方程(即 Richards 方程)描述,即

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \\ \theta(z, t) = \theta_0(z) \\ h(z, t) \Big|_{z=B} = h(B, t) \\ -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \Big|_{z=0} = q_0(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\theta$ ——土壤体积含水量;

$h$ ——负压水头, [L];

$z$ ——垂向坐标, 零点取在地面, 向上为正, [L];

$t$ ——时间, [T];

$K(\theta)$ ——对应含水量  $\theta$  时的土壤渗透系数, [L/T];

$q_0(t)$ ——上边界处的水分通量, [L/T];

$h(B, t)$ ——下边界处负压值, [L], 地中渗透仪的底边界取为定水头边界, 其压力水头为 0;

$B$ ——深度, [L]。

模型中不考虑土壤吸、脱水之间的滞后作用。

方程(1)为一非线性偏微分方程, 而且上边界条件复杂多变, 难以用解析法求解, 一般用数值方法求解, 本文采用迦辽金有限单元进行求解。将实测补给流量与模拟结果进行比较, 确定优先流的量。

#### 4 降水入渗补给过程中优先流量的确定

根据上述方法, 以郑州地下水均衡试验场新乡亚砂土为例, 确定其降水入渗过程中优先流的量。选择地下水位埋深为 2 m、3 m、5 m 和 7 m 的 4 个试筒(内设有中子仪观测土壤含水量资料), 对其中的降水入渗过程中的活塞流部分进行模拟。

##### 4.1 活塞流模拟

2 m 试筒中地下水位埋深较小, 入渗补给过程短, 而且补给的速度快, 补给量大, 土壤含水量变化较大, 与地下水位埋深较大的试筒相比, 更能反映土壤岩性水力性质对降水入渗过程的影响。因此, 选用 2 m 试筒对该岩性的水力参数进行识别, 并分析其中水分运移规律, 然后用识别后的参数分别对 3 m、5 m 和 7 m 埋深的试筒进行模拟, 计算降水入渗过程中优先流的量。

土壤水分运移模拟一般按如下过程进行: 首先进行离散化。模型深度取至地下水水面(即整个试筒), 按照 2 cm 间隔进行剖分。模拟时段从 2000 年 5 月 1 日~2001 年 12 月 31 日, 共 609 天。第二步确定边界条件和初始条件。试筒顶部土体裸露于空气中, 直接接受降水入渗补给和蒸发, 处理为已知流量边界, 直接在模型顶部单元上赋实测降水量和潜在蒸发量。各试筒均采用马里奥特瓶来观测降水入渗补给量和地下水蒸发量, 地下水位保持恒定, 下界面处理为定水头边界。从 2000 年 4 月 1 日开始监测土壤含水量, 为尽量避免由于中子仪安装等可能造成的误差, 且整个 4 月份几乎没有降水, 因此可取 2000 年 5 月 1 日作为初始时刻。将 2000 年 5 月 1 日的实测不同深度土壤含水量, 按线性插值的方式为各节点赋初始含水量。第三步选取水力参数。土壤水分特征参数采用常用的 vanGenuchten 模型。由于缺少土壤水分特征曲线试验资料, 利用土壤颗粒分析资料和经验模型初选相关参数。USSL(United States Salinity Laboratory, 美国国家盐改中心)根据 1 913 个不同岩性的颗粒组成、干密度、土壤水分特征曲线参数、饱和渗透系数等实测数据, 利用人工神经网络技术建立了土壤水分特征曲线参数和饱和渗透系数与土壤颗粒组成、干密度之间的函数关系(Rosetta 软件)。根据该试筒实测土壤颗粒组成(见表 1), 利用 Rosetta 软件提供的神经网络模型来初步计算该岩性的土壤水分特征曲线参数。

根据建立的土壤水分运移模型, 用计算的土壤含水量和实测的土壤含水量进行拟合和对比分析, 反复修改参数, 当两者之间误差达到标准后, 即认为此时的参数值代表该土壤的入渗参数。计算土壤含水量和实测含水量之间的误差的目标函数如下:

表1 新乡亚砂土岩性颗粒分析资料

项目	颗粒组成			UNSODA 定名
	砂粒	粉粒	黏粒	
粒径(mm)	2~0.05	0.05~0.005	<0.005	Loam
所占比例(%)	45.0	40.5	13.5	

$$E = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_j (\theta_{ij}^e - \theta_{ij}^0)^2 \quad (2)$$

式中  $m$ ——时段总数;

$n$ ——观测点总数;

$W_j$ ——权系数;

$\theta_{ij}^e$ —— $i$ 时刻第 $j$ 个观测点的计算土壤含水量;

$\theta_{ij}^0$ —— $i$ 时刻第 $j$ 个观测点的实测土壤含水量。

当目标函数 $E$ “最小”时的参数值即为待求的参数,实测浅层土壤含水量与拟合土壤含水量对比曲线见图2,同时结合 Rosetta 初选的经验参数对参数进行识别,识别后的参数见表2。

#### 4.2 优先流部分的确定

利用表2中的参数分别对地下水位埋深为2 m、3 m、5 m和7 m的新乡亚砂土中降水入渗补给过程进行模拟。图3为不同水位埋深新乡亚砂土试筒的模拟入渗补给量与实测入渗补给量历时对比曲线,可以看出,亚砂土中普遍存在优先流。按照前述分离优先流量的方法计算各试筒中的优先流入渗量,并分时段统计如表3所示。

由表3可以看出,2 m埋深试筒中,优先流的量较大,约占总补给量的46.19%,随着地下水位埋深的增加,优先流所占比例逐渐减小,3 m、5 m、7 m试筒中优先流所占比例分别为40.91%、34.13%和11.72%,见表4。

#### 5 结论

利用 Richards 方程计算活塞式入渗补给流量,再用实测入渗补给流量减去活塞式补给流量,即为优先流补给量。计算结果表明,土壤黏粒含量越高,越容易产生裂隙和虫孔等大孔隙,优先流明显,所占比例越高;在埋深较浅(2~3 m)的黏性土试筒中,优先流补给形式占主导地位(41%~80%);随着地下水位埋深增大,优先流所占比例呈递减趋势,说明导致优先流的大孔隙和裂隙等主要发育于浅部。



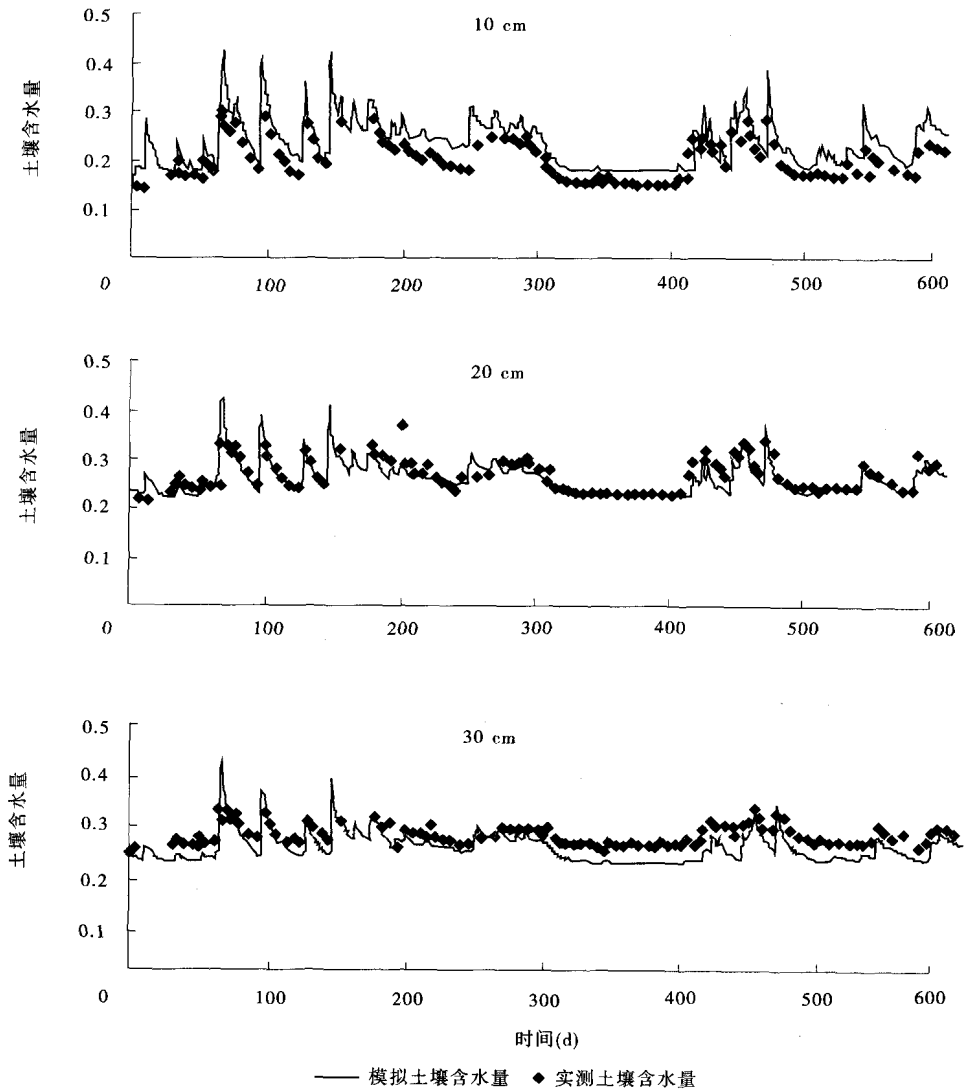


图2 亚砂土中模拟土壤含水量与实测土壤含水量对比曲线

表2 识别后的新乡亚砂土水力参数

岩性	水力参数					
	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$N$	$m$	$K_s$ (cm/d)
新乡亚砂土	0.049 6	0.455 0	0.012 4	1.635 8	0.388 7	28.15