

2016 年“深圳杯”数学建模挑战赛决赛
A 题论文

“清源” vs “截流”

队员： 余宇航（山东大学数学学院）

李子彦（山东大学数学学院）

刘梦源（山东大学计算机学院）

指导老师： 刘保东（山东大学计算机学院）

山东大学

摘要

本文取少量变量进行强约束，对大量变量进行指标化处理，利用在强约束条件下各个区域选择分、混流排水方式形成的解集，并对解集中的解做其他变量的指标化处理，生成许多方面的指标供决策人参考。充分利用了排水方式中存在非常多的因素会对决策人产生影响，且这些因素之间的关系较小的特点。

首先，本文研究了分、混流排水方式对污水处理系统与海绵城市的影响，探究了污水处理系统与海绵城市在分流排水方式与合流排水方式下的不同。合流制排水方式需要更大的污水处理厂处理能力，与较大管径的合流排水管道，雨季雨量较大时会产生比较大的溢流污染，同时，在非雨季，需要对雨源型河流进行额外的补水工程。分流制排水方式需要更高工程监测程度以防混接，同时雨水的冲刷会带来难以避免的初雨污染，根据区域的地理及社会属性实施改造工程的难易程度较难与成本较高。

然后，在小区域内将泊松盘采样的雨水口连成管网，用树型动态规划给出小区域管网在经济上的最优值，并将此结果视为对小区域修建该种管网的经济概算。根据已修建管道的类型以及管道是否完善，将小区域分为五种类型，分别给出每种类型下该区域进行管网改造的经济概算。以设定重现期下不发生明显的截留式溢流为强约束条件，对所有小区域进行 0-1 规划，同时要求所有区域经济概算的累加在经济最优情况下其经济概算的 k 倍。取规划解集中的每一个解，计算其征地谈判时间，由错接造成的污水排放流量等指标，供决策者参考。

其次，本文以深圳市茅洲河光明片区为例，通过收集光明新区的 DEM 数据、用地类型降雨量等资料，通过 ARCGIS 绘制可视化资料，并研究光明片区的自然地理环境与人文环境。利用道路将光明新区进行区域划分，并绘制出划分图。利用给水排水中的公式及施工建设费用公式，绘制光明新区的街区雨量图、街区污水图、街区施工建设费用图。使用判定模型可以得到光明新区的排水方案图，并生成选择方案的各项指标以供参考。并依照个人观点，给出个人观点下的最优方案。

最后，通过对判定模型及各项指标的研究，给出对未来排水方案选择的建议。同时通过对模型的回顾及分析，深化研究模型的优缺点。针对模型的缺点，给出可能改善模型缺点的方案。

关键词：分混流排水方式、污水处理系统、海绵城市、树型动态规划、0-1 规划、ARCGIS

目录

第一章	绪论.....	4
1.1	概述	4
1.2	研究背景.....	4
1.2.1	国内研究背景.....	4
1.2.2	国外研究背景.....	5
1.2.3	排水系统的研究进展.....	5
1.2.4	深圳市现状.....	6
1.3	研究意义.....	7
1.3.1	研究分混流的判定的环境效益.....	7
1.3.2	研究分混流的判定的经济效益.....	7
1.4	主要内容.....	8
第二章	分混流对污水处理系统的影响.....	9
2.1	径流系数法计算进入管道的雨水量.....	9
2.2	进入管道的污水量.....	11
2.3	管道参数.....	11
2.3.1	管道水力计算.....	11
2.3.2	管道存在的约束.....	15
2.3.3	分混流对管道的影响.....	16
2.4	污水处理厂的影响.....	16
2.4.1	污水处理厂费用.....	16
2.4.2	污水处理厂的影响.....	17
第三章	分混流对海绵城市的影响.....	18
3.1	“海绵城市”相关概念理解	18
3.2	海绵城市建设在排水建设工程上的要求 ^[19]	19
3.2.1	减轻城市防洪排涝的压力.....	19
3.2.2	缓解城市水资源短缺的现状.....	20
3.2.3	致力于改善城市的生态环境.....	20
3.3	分、混流排水机制的水污染模型.....	20
3.3.1	基于 SWMM 的雨水径流污染模型.....	20
3.3.2	分流制与合流制污染负荷计算 ^[24]	25
3.3.3	分、混流污染物计算比较.....	27
3.4	河道补给流动模型.....	30
3.4.1	生态流量和生态需水量概念.....	30
3.4.2	最小生态需水量计算 ^[27]	31
3.4.3	雨污排放机制对河道补给模型的影响.....	32
第四章	分混流选择方式的判定模型.....	33
4.1	征地谈判模型.....	33
4.2	区域内部管网价格模型.....	33
4.2.1	入水口的选取.....	34
4.2.2	管道连接策略.....	34
4.2.3	入水口流量计算.....	36
4.2.4	价格计算.....	37

4.3	总判定模型.....	38
第五章	针对茅洲河光明片区的研究.....	41
5.1	背景介绍.....	41
5.1.1	光明片区介绍.....	41
5.1.2	茅洲河介绍.....	41
5.2	模型应用流程图.....	42
5.3	数据收集与整理.....	43
5.3.1	收集思路.....	43
5.3.2	区域划分与数据收集处理具体方法.....	45
5.4	模型应用.....	52
5.4.1	光明新区施工费用.....	52
5.4.2	排水方式规划方案.....	54
5.5	SWMM 对方案进行仿真与可视化展示:	55
第六章	模型的优缺点及展望.....	58
6.1	优点	58
6.2	缺点	58
6.3	展望	58
参考文献	60
附录	63

第一章 绪论

1.1 概述

目前我国的大多数城市都要面临一个难题，排水管道的改造。随着城市的发展，城市化水平越来越高，人们对于污染问题的不断重视，城市排水管道所暴露出来的问题便引起了许多人的关注。城市化程度的提高，使得不少地区的地表径流增加，而随着城市人口的密集化，生活污水的产生量也在不断提高，而同时污水处理厂的处理能力却较为有限。因此研究“截排”与“清源”的选择是十分必要的。

深圳作为一个发展十分迅速的城市，在发展过程中同样要碰到这个困扰着其他城市的难题。深圳市在过去的若干年都是采用的“截排”来解决深圳市的污水问题。截排式排水方案存在一定的优点，比如说施工较为简单、前期投入成本较低、可以拦截一定的初雨带来的径流污染等，但截排式的缺陷也十分明显，比如污水处理厂的负荷较大、溢流直接污染环境、旱季河道缺水需额外投入补水工程等。而分流改造却也因为施工、管理、投入等方面的原因，并不能直接选择完全改造。

海绵城市概念的提起，LID 研究的增多，让人们看到了许多可以改变的新的方面。而“截排”和“清源”对海绵城市的影响，新兴污水处理方法如何去更好的解决城市污水处理问题，正是现在研究的重点。

利用数学模型，研究在什么样的区域选择什么样的排水方式才是合适的，可以帮助深圳市解决排水管道的改造问题和海绵城市建造问题，达到深圳市提出的“一年初见成效，三年消除黑涝，五年基本达标，八年让碧水和蓝天共同成为深圳亮丽的城市名片”，满足深圳市提出的 2020 年的水质要求。

1.2 研究背景

1.2.1 国内研究背景

由于国内城市发展迅速，针对城市水环境质量的研究再不断增多。北京和上海的部分城区一直在开展雨污分流改造工作，许多其他城市也主要采取“混流”改为“分流”的思路，希望通过这种方法，减少对水体的污染。然而在老城区进行雨污分流改造面临许多制约，不仅耗费了大量的资金和时间，改造工作也困难重重，部分先行的改造也不彻底，效

果不佳。在 2012 年，“海绵城市”的概念被提出，2015 年，16 座城市入选“海绵城市”试点城市。2016 年，14 座城市入选“海绵城市”试点城市。开启了我国对于新兴污水处理方法的探索。

许多大城市的污水处理率大幅提高，但是城市的水环境质量并没有得到很好的改善。例如北京市城区的污水处理率从 20 世纪 90 年代初的 20% 提高到 2009 年的 94%，但从水质数据来看，水体污染并没有得到彻底的解决。^[1]

1.2.2 国外研究背景

国外也存在很多合流制的管道系统，有不少国家在如何解决合流制管道系统排水污染上进行了深入研究，并取得了不小的成果，而这些成果都可以被国内拿来借鉴和研究，并因地制宜的发展适合中国的管道系统。

2004 年美国环保署（EPA）向国会提交的一份关于污水溢流问题的研究报告表明，在美国的 31 个州和哥伦比亚区内，772 个合流式污水系统每年排放 8500 亿加仑未经处理的污水和雨水，每年将发生 2.3~7.5 万起 SSOs，排放 30 亿~100 亿加仑的污水。^[2]

日本的管道大部分也是合流制，同样面临着非常严重的溢流污染，为了减轻溢流污染，日本大多是采用建立雨水含蓄装置、增强地面的下渗能力等策略。比如：大阪建造了许多雨水储存管、雨水隧道、蓄水池等，东京使用雨水贮留设施和渗透设施。^[3]

德国更加注重从源头上控制污染，在城市内修建了大量的雨水池来收集雨水与溢流污水、并通过生态设施来减少径流量及净化雨水。德国因地制宜保留了大量的合流制系统，通过许多生态措施在源头上实现了对 CSO 污染的控制。^[3]

1.2.3 排水系统的研究进展

现在存在许多排水系统，有很多排水系统因为自身缺陷过于明显且无法避免，已经被淘汰，还有许多排水系统仍然在使用。不同的地区适用于不同的排水系统，只有选择合适的排水系统才能更好的解决城市的排水问题。

排水管道分为合流制和分流制。其中合流制分为直排式合流制与截流式合流制，分流制分为完全分流制、不完全分流制、半分流制（截流式分流制）。

直排式合流制是指污水和雨水在一根管道中直接被排入河流，是中国大多数城市在早期所使用的主要方式，但由于污染问题较为严重，已经被淘汰。截流式合流制是指污水与

雨水使用一根管道，在管道进入河流之前设置截流干管，当雨量小时，雨水和污水通过截流干管进入污水处理厂，当雨量大时，超过负荷的部分则直接排入河流中。

完全分流制是指既有污水管道也有雨水管道，污水经由污水管道进入污水处理厂，雨水经由雨水管道进入河流。不完全分流制是指只设污水管道，雨水经地表漫流或明渠进入河流。截流式分流制是指既有雨水管道也有污水管道，同时在雨水干管上设计截流。当雨水量较小时，进入污水处理厂处理，当雨水量较大时，污染较大的初雨被截流，超出雨水进入河流。

合流制的主要优点是管线造价低、使用空间小、排水管道简单、管道沉积物可以被冲刷、部分雨水被处理，缺点是运行费用较高、污水处理厂要求较高、旱季易产生沉积、雨天的冲击负荷大、溢流可能产生较大污染。分流制的主要优点是雨天不会产生冲击、污水处理厂进水稳定、污水处理厂设计规模较小，缺点是需要进行较多的改造、工程量大、施工难度高、管理要求高、占用空间较多、降雨少的地区利用率低、初雨污染较大、污水管道沉积物得不到冲刷。^[4]

1.2.4 深圳市现状

深圳是中国改革开放建立的第一个经济特区，是中国改革开放的窗口，已发展为有一定影响力的国际化城市，创造了举世瞩目的“深圳速度”，同时享有“设计之都”、“钢琴之城”、“创客之城”等美誉。然而深圳市现在一直在饱受水体黑臭的困扰。

深圳市绝大多数河流河道短小，是雨源型河流，雨季是河，旱季干涸，缺乏动态补充的水源，城市污染负荷远远超过了本地水环境承载力，河流受到普遍污染，水环境治理压力巨大。^[5]深圳市五大河流（深圳河、茅洲河、观澜河、龙岗河、坪山河）均达不到地表水Ⅴ类标准，甚至部分河流超标 2~33 倍。^[6]

深圳市排水系统是按照雨污分流和集中处理原则建设和管理的，而特区外宝安区、龙岗区、光明新区、坪山新区由于缺乏统一规划和建设，市政基础设施建设相对滞后，仅在中心城区、开发区等规范建设区域建成雨污分流制排水管网，其余大部分地区仍以合流方式为主。^[7]深圳市水体污染的第一大污染源是城中村的雨污合流，排入河道的污水有一半来自于城中村。深圳市河流污染的第二大污染源是住宅小区，每天有大约 16 万吨的污水直接排入河道。^[7]

近年来，深圳市大力推进水污染治理，增强区域内污水处理厂的处理能力，优化污水

运输管道，建设海绵城市。通过多种多样的方式，减少并治理区域内的水污染。并提出了“一、三、五、八年计划”，希望能够使深圳的自然环境更加美好，创造一个美丽的深圳。

1.3 研究意义

1.3.1 研究分混流的判定的环境效益

不管是分流制排水方式还是合流制排水方式，两者都存在着部分缺陷，由于现实情况的不同，不同的自然地理环境及人文环境适合不同的排水方式。

分流制排水中只有采用截流式分流制排水才可以避免初雨的污染，其他分流制排水中初雨污染，限于排水方式，将会无法避免的直接排入河流之中。所有的分流制排水方式都存在管理困难与管道错接问题。污水管错接到雨水管及其他污水排入雨水管等问题造成的污染在河流污染中占比较大的比重。不少地区由于建筑排布，地下空间利用等问题，无法进行管道改造工程。

合流制排水在雨季雨量较大的地区，若截流倍数较小，可能会产生比较大的溢流污染，若截流倍数过大，可能会导致河流旱季流量过低，甚至干涸。雨季的雨量大，导致管道内的流量在雨季与旱季之间的波动过大，雨季时对污水处理厂的负荷过大，会影响污水处理厂的各项参数。旱季时，由于混流管道的流量过小且基本只有污水，可能会造成过大的污染物沉积。

因此在降雨量较小或进入管道的雨水量小、施工环境复杂、错接率高的区域采用合流制排水方案将会比分流制排水方案有更低的污染排放。而对于降雨变化明显、雨季雨量较大、施工环境简单的地区分流制排水方案有着更低的污染排放。

在城市中，根据地区进行选择排水方案，将进入河流的污染减到最低。因此，研究区域选择合流或分流的判定标准，并给出区域的污水处理方案，能够更好的增强城市的污水处理能力，减少污水排放对水体造成的污染，并与治理污染的方案相配合，最终使河流重新恢复。

1.3.2 研究分混流的判定的经济效益

影响人们对于分混流排水方式的选择的一个主要因素便是经济。尽管污染问题十分的严重，但是环保效益的高低仍然是人们需要考虑的一个重要问题。如何用更少的钱去避免

更多的污染一直是人们所研究的问题，而由于分混流在不同区域所需要的修建及运营成本不同，因此做出在区域分混流的判定可以帮助市政部门减少不必要的预算。

合流制排水方式所需的管道施工较为简单，所需的施工费用较小，且无需对原有管道进行大规模施工及地下所占空间较小，能够简化施工难度。但截流式的排水方式会对污水处理厂提出较高的要求，而且污水处理厂在旱季可能会出现大量的过剩处理流量。同时截流式排水方式会将原本应该流入河道的雨水截流，这一现象在旱季尤为明显，对雨源型河流会产生较大的影响，需要额外投入资金设置补水工程。

分流制排水方式对施工方面提出了较高的要求。由于合流制排水方式要有两套管网，管理时较为复杂，尽量不能出现错接的问题，且对于大部分老城区需要额外进行施工更改，部分地区施工难度过大，施工费用过高，或不具备施工条件，讲造成整体工程费用过高、实现难度较大。但分流制排水方式可以减少对污水处理厂的负荷，以此节省污水处理厂所需的建造及运营成本。

1.4 主要内容

在现代卫生设备问世之前，各种废水大多从地面流入排水管道，然后就近排入天然水体，因污染量低，废水无需处理。随着卫生设备的出现、人口密度的增长以及工业废水的增加，这种原始的直排方式接连被合流制和分流制取代，但是事实证明，单纯的合流制或者分流制都达不到预期的效果，于是当今排水体制先进的国家，如德国等，均是采用分流合流共存的方式。然而，如何判断哪些地方采用分流哪些地方采用合流一直没有一个好的标准与方法，很多地方采取了不合适的排水体制而造成严重的污染或者经济损失，给了当地政府惨重的教训。本文研究了分混流对污水处理设施与建设海绵城市的影响，进而给出了创造性的评判方法，并以深圳光明新区为例，给出了合适的污水处理方案，并对此进行了可行性分析。

之所以判断标准难以界定的原因，一是相关变量过于繁多，数据过于无序，对这些因素进行综合分析时，无论是从物理角度还是从数据角度，都难以给出适用性广、说服力强的权重；二是管网拓扑结构过于复杂，特别是由于工程疏忽等实际管网情况与真实情况有所差距，无论是从宏观上考虑整个管网还是微观上考虑管网各个细节都欠妥。

本文以经济和截流溢水为主要约束条件，筛选出数量较少的一族方案，再由这些方案计算出各自的其他指标如征地谈判时间、由错接带来的污水流量等，制成表格，届时，考

考虑当时的情况，由不同指标在领导及相关专业人士心中的权重，进一步得到最佳方案。这样通过强约束条件得到满足最重要条件的方案，再用几个直观的指标剔除杂乱变量的干扰，解决了变量繁多数据无序带来的问题。

第二章 分混流对污水处理系统的影响

2.1 径流系数法计算进入管道的雨水量

暴雨可以用雨量计记录的两个基本数值（降雨量和降雨历时）表示其降雨历程，而雨水管道和混流管道中占据雨季流量大部分的都是雨水。因此简单、准确的估算管道的雨水进入量对管道设计十分重要。

暴雨强度指的是降雨的集中程度。一般以一次暴雨的降雨量、最大瞬间降雨强度、小时降雨量表示。其计量单位通常以 mm/min 或 L/(s · ha) 表示。我国气象上规定，24 小时降水量为 50mm 或以上的雨称为“暴雨”。按其降水强度大小又分为三个等级，即 24 小时降水量为 50~99.9mm 称“暴雨”，100~200mm 以下称为“大暴雨”，200mm 以上称“特大暴雨”。^[10]

由于管道设计时，只需要考虑在设计重现期下的峰值影响，进入管道的雨水量可以直接以暴雨强度公式计算所得到的暴雨强度及径流系数法确定。基于地区的暴雨强度公式可以很好的反应某一重现期下，所选地区的暴雨的强度。径流系数说明在降水量中变为地表径流并流入管道的水的量，综合反映了，区域内的土壤要素等对地表径流形成的影响。

管段所进入的雨水量计算：

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{上游}} + Q_{\text{产生}} \quad (2.1)$$

雨水量^[8]：

$$Q_{\text{雨产生}} = q\Psi F \quad (2.2)$$

暴雨强度公式^[8]：

$$q = \frac{167A_1(1+clgP)}{(t+b)^n} \quad (2.3)$$

式中

q——设计暴雨强度（L/s · ha）

P——为设计重现期

t——降雨历时（min）

A_1 、c, b, n 为地方参数

Ψ ——径流系数

F——汇水面积（ha）

径流系数是描述降雨和径流关系的重要参数，在传统雨水管渠设计中，我国一直采用推理公式计算雨水的设计流量。雨量径流系数是指降雨时，在子汇水面上产生的径流量（厚度）和降雨量（厚度）的比值，一般采用平均径流厚度。^[13]

表 1 雨水设计径流系数取值^[8]

地面种类	径流系数
各种屋面、混凝土和沥青路面	0.85~0.95
大块石铺砌路面或沥青表面处理的碎石路面	0.55~0.65
级配碎石路面	0.40~0.50
干砖及碎石路面	0.35~0.40
非铺砌路面	0.25~0.35
公园绿地	0.10~0.20

汇水面积（集雨面积）指雨水管渠汇集雨水的面积。暴雨在区域内是具有时空不均的特性，但一般城市中的雨水管道汇水面积较小，小于 $100km^2$ ，距离管道的最远点的集水时间不会超过 60~120min，因此在区域内的不均匀分布的影响较小，因此可以假定降雨在整个汇水面积是均匀分布的。

降雨历时确定^[8]：

$$t = t_1 + t_2 \quad (2.4)$$

式中

t_1 ——地面集水时间（min）

当建筑物密度较大、地形较陡、雨水口布置较密的地区， t_1 宜采用较小值，取 5~8min；

当建筑密度较小、地形平坦、雨水口布置较疏， t_1 宜采用较大值，取 10~15min。

t_2 ——管渠内雨水流行时间（min）

$$t_2 = \sum \frac{L}{60v} \quad (2.5)$$

式中

L ——各设计管段长度 (m)

V ——各设计管段满流流速 (m/s)

60——单位换算系数

区域具体情况对进入管道的雨水量存在较大的影响，不同的自然地理特征会改变进入管道的雨水量。而径流系数的经验取值更多的研究的是区域内的地面（土壤）要素对进入雨水管渠的影响，为了更好的模拟实际进入管道的雨水量，

对其进行了优化，同时为了不增加整体计算量，添加优化系数的方法，对原有公式进行了优化，确定了优化系数 α ，经过优化后的进入管道的流量公式：

$$Q = q\alpha\Psi F \quad (2.6)$$

影响优化系数取值的主要因素为区域内是否有河流流经。如果一个区域内部有河流流经，则可以通过在地面设置明渠等方式直接将区域内部的雨水排入河流之中，因此假定，若有河流流经则 $\alpha = 0$ ，若区域内没有河流流经，则 $\alpha = 1$ 。

2.2 进入管道的污水量

进入管道的污水量将会影响合流制管道与分流制管道的污水量，也会对污水处理厂造成影响，由于实际污水量需要进行大量的统计，所需的成本较高，无法在短时间内做到，因此要利用用水量对产生污水量进行估算。

一般利用污水排放系数估算，公式为：

$$Q_{\text{污}} = \sum Q_{\text{用水}} \beta \quad (2.7)$$

不同城市、不同的用地类型，污水排放系数的取值不同。而用水量可以通过地区规划或在供水机构提取数据的方式获得。通过计算可以得到城市内不同地区的平均日用水量，同时根据城市用水平均日变化系数，可以计算出最高日用水量。城市日变化系数是指大污水量与平时污水量的比值。^[11]

2.3 管道参数

2.3.1 管道水力计算

进行管道的水力计算，可以帮助在合理的经济的选择管道断面的尺寸、坡度和埋深。

排水管道多为圆形管道，内部不承受压力，靠重力流动。即使是污水，其中水分含量也一般高于 99%，因此污水的流动也可按照一般液体流动的规律。由于在直线管段上，当流量没有很大变化又无沉淀物时，管内液体的流动状态可接近均匀流。又由于变速流公式的复杂性和管道内液体流动的多样性，即使采用变速流公式也难以保证精确度。因此在排水管道的水力计算中仍采用均匀流公式。其中污水管道很少设计为满流，雨水管道按满流设计。尽管谢才公式、曼宁公式中的粗糙系数 n 需要经验数据，但相较于达西—魏兹巴赫等公式，其粗糙系数对任何管渠都是唯一值，且与深度无关，这极大的简化了计算。

流量公式：

$$Q = Sv \tag{2.8}$$

谢才公式、曼宁公式^[9]：

$$v = C\sqrt{RJ} = K_n \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \tag{2.9}$$

式中

- Q——流量 (m^3/s)
- S——过水断面面积 (m^2)
- V——流速 (m/s)
- R——水力半径 (过水断面面积与湿周之比) (m)
- I——水力坡度
- K_n ——单位换算系数，SI 制中为 1，英制中为 1.486
- n ——粗糙系数

表 2 管道糙率表^[8]

管道	糙率 n
UPVC 管、PE 管、玻璃钢管	0.009-0.011
陶土管、铸铁管	0.013
石棉水泥管、钢管	0.012
混凝土管、钢筋混凝土管、水泥砂浆抹面渠道	0.013-0.014

在进行雨水管道、合流管道水力计算时，按照满流设计，即 $\frac{h}{D} = 1$ ， $R = \frac{S}{\pi D} = \frac{\pi D^2}{4\pi D}$

在进行污水管道水力计算时，按照非满流设计，最大设计充满度见下表。

表 3 管径与最大设计充满度^[8]

管径 D (mm)	最大设计充满度 $\frac{h}{D}$
200-300	0.55
350-450	0.65
500-900	0.70
≥ 1000	0.75

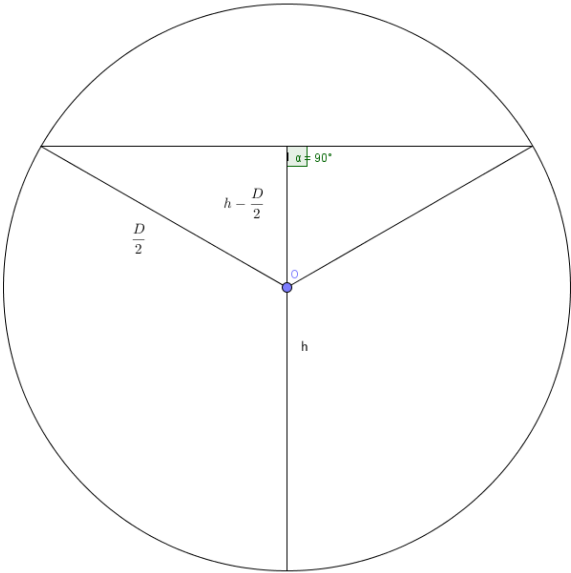


图 1 管道充满度

水力半径:

$$R = \frac{S}{(\pi - \cos^{-1}(\frac{2h-D}{D}))D} = \frac{1}{(\pi - \cos^{-1}(\frac{2h-D}{D}))D} \left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\cos^{-1}(\frac{2h-D}{D})D^2}{4} + \frac{h}{2}\sqrt{D^2 - (2h-D)^2} \right) \quad (2.10)$$

过水断面面积:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\cos^{-1}(\frac{2h-D}{D})D^2}{4} + \frac{h}{2}\sqrt{D^2 - (2h-D)^2} \quad (2.11)$$

下图为不同管径下的水力半径计算，一般情况下水力半径与管径成一次函数关系，其系数由充满度决定，在设计最大充满度下，不同管径与水力半径之间的关系。

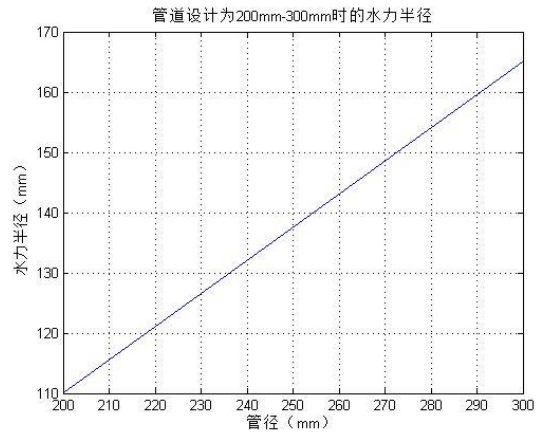


图 2 200-300mm 水力半径

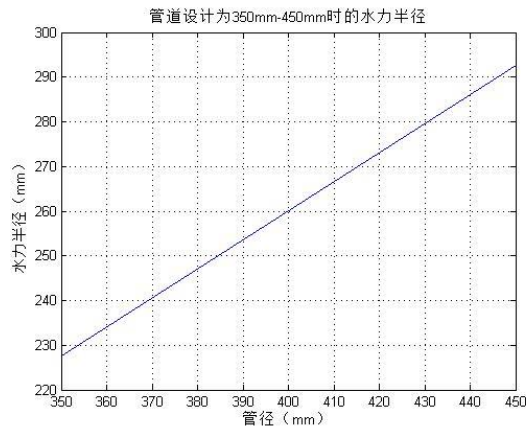


图 3 350-450mm 水力半径

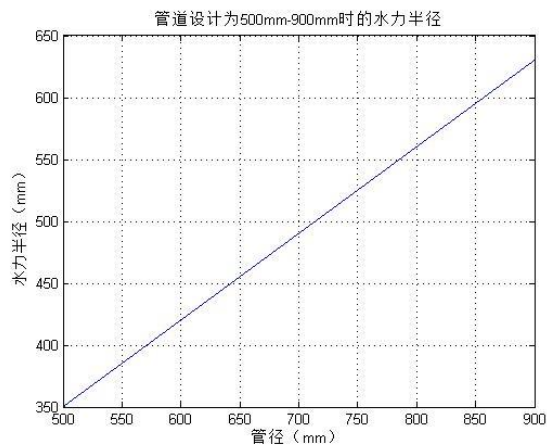


图 4 500-900mm 水力半径

根据水力公式计算，可以利用 **MATLAB** 画出关于水力坡度、管径和流量之间的关系图表（图 5）

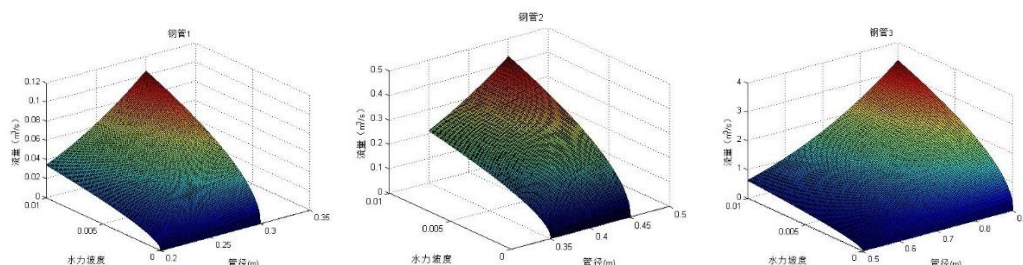


图 5 水力坡度、管径、流量关系图

2.3.2 管道存在的约束

限于管道材质，为了保证管道在实际运行中的稳定性，管道的各项参数之间存在着许多约束。

由于管道的材质限制，管道所能承受的冲击力有限，所以管道在设计之时就存在一个最大流速，以防止在运行过程中对管道造成损坏。同时为了保证管网的有效利用，不产生内涝、污水无法及时排走等问题，避免杂质在管道中形成较大沉积，管道在设计时需要一个运行最小流速，保证其在不同流量要求下的正常运行。

排水管道大多是依靠重力进行运输，所以在提出了流速的约束之后，对于管道所需的坡度也要有相应的约束。由于区域施工等原因，不同节点的最小与最大埋深将会被约束。

同时由于工程中存在的管径，所以在计算管道水力的影响时需要考虑管径的取法。一般提到的管径都是指公称通径，又称为平均外径，公称通径既不是外径也不是内经，而是近似普通管内径的一个名义尺寸。^[12]

流速约束条件：

$$V_{min} \leq V \leq V_{max}$$

埋深约束条件：

$$H_{min} \leq H \leq H_{max}$$

管径约束条件：

$$D \in \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$$

2.3.3 分混流对管道的影响

我们以一块进入管道雨水量为 $Q_{\text{雨}}$ 、进入管道污水量为 $Q_{\text{污}}$ 的理想区域为例。分流制排水方案下，污水管道的流量产生波动较小，流量基本稳定在 $Q_{\text{污}}$ ，雨水管道的设计则以 $Q_{\text{雨}}$ 为主，合流制排水方案下，合流管道的流量设计应以 $Q_{\text{雨}} + Q_{\text{污}}$ 为主。

因此可以由管道水力模型及管道约束条件枚举计算出分流制及合流制所需的管道参数。如图 6

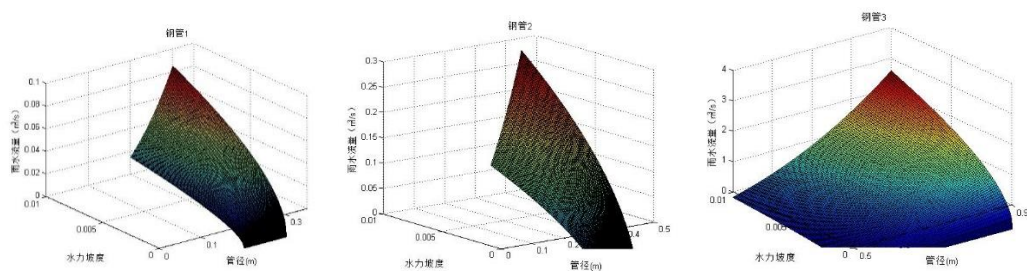


图 6 设计雨水流量下的管道参数

由图 6 可知当雨水流量确定时，管径与水力坡度成反比关系，在约束条件下，不同雨水流量存在不同的管径下限。

2.4 污水处理厂的影响

2.4.1 污水处理厂费用

污水处理系统中，污水处理厂也是一个重要的组成部分，根据需要处理的污水的不同，污水处理厂在设计与实际运行中会受到比较大的影响。因此需要研究污水处理厂在分混流下运行时所产生的不同的费用。

污水处理厂是将污水进行生化处理，去除污水中的 COD、SS、氨氮和磷等，最后达到符合污水排放标准的水，进行就近排放。^[14]我国的污水处理正在蓬勃发展。因为部分地区采用合流制排水方式，在雨量大的地区，雨季和旱季污水处理厂的处理量差别巨大，所以在雨季，污水处理厂在分混流排水方式下运行费用存在较大差别。

计算污水处理厂的运行费用的方法有许多，选择不同种污水处理方法的运行成本计算方式也不同，比如传统活性污泥法的运行成本计算^[15]、建立运行费用函数进行回归分析^[9]等。但不同方法的适用性不同，有些只适用于采用固定处理方法的污水处理厂，有些分析

所需要的前期数据过多，不适合进行简单分析。

在《我国城市污水处理厂能耗规律的统计分析与定量识别》一文中，作者对 560 座污水处理厂数据，采用回归分析来量化实际污水处理量和电耗之间的关系，得到幂形式的回归方程如下：

$$Y = 0.34X_A^{-0.168} \quad (2.12)$$

式中

Y -----单位污水处理量的电耗($kW \cdot h/m^3$)

X_A -----污水实际处理量($万m^2/d$)

污水处理厂的运行成本由净水成本和管理成本两部分组成，管理成本包括人员薪酬、固定资产折旧和管理费用等部分，它们的数值一般情况下都是固定数值，不会随着处理量的变化而变化，决定这些数值的主要因素是投资额和设计规模。而对于净水成本包括药剂费、维修费、污泥清运费和动力电费等而言，会随着处理量的变化而发生变化，所以说净水成本在探究分混流对污水处理系统的影响中是我们更加关心的。所幸动力电费在整个净水成本中比例是相对固定的，这为我们得到净水成本提供了方法。污水处理厂的实际净水成本如下：

$$G_{wtp} = F(Y \cdot X_A)/\alpha \quad (2.13)$$

式中

G_{wtp} -----污水处理厂实际净水成本, $yuan$;

α -----电费在净水成本中的比例。

$F(\cdot)$ 是当地电费计算方式

α 和污水处理厂的结构、污水处理方式有关，实际运用中可以参照相近规模相同工艺的现有污水处理厂。

2.4.2 污水处理厂的影响

因为在非雨天，两种排水方式下，污水处理厂的处理量相差不大，所以只考虑在下雨时，污水处理厂的费用。假设污水处理厂所需要处理的区域的总雨水量为 $Q_{雨}$ 、总污水量为 $Q_{污}$ 、合流制截流倍数为 n_0 。在合流制排水方式中污水处理厂所需处理的流量为 $\max\{Q_{雨} +$

$Q_{污}, n_0Q_{污}$ }, 在分流制排水方式中污水处理厂的所需处理的总流量为 $Q_{污}$ 。由此，可以通过污水处理厂的运行费用模型计算出不同排水方式污水处理厂的运行费用。

以深圳市燕川污水处理厂为例，该污水处理厂污水处理能力为 15 万立方米/天，取旱季污水进水量为 5 立方米/天，深圳市工厂电费为 0.98 元/kwh

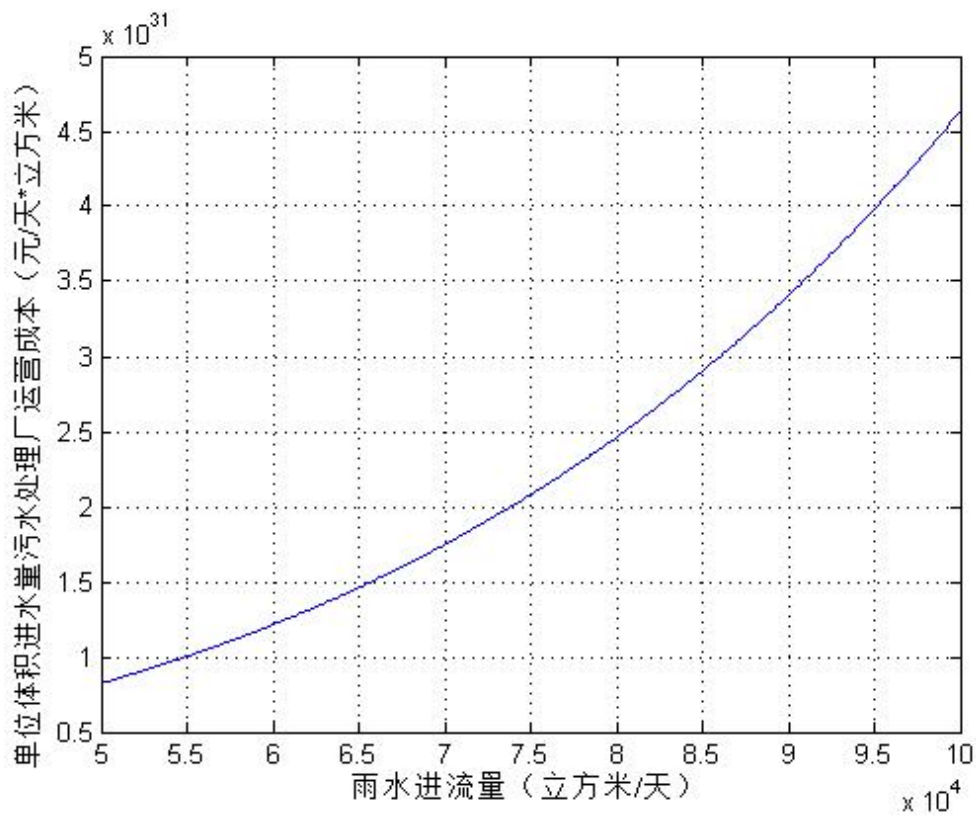


图 7 污水处理厂运营成本与雨水进流量

第三章 分混流对海绵城市的影响

3.1 “海绵城市” 相关概念理解

海绵城市的思想是我国现今解决城市雨洪管理的新思想，顾名思义海绵城市是借用海绵的物理能效来比喻城市在吸收与释放雨水的强大能力，指城市在适应环境变化和应对雨水带来的自然灾害等方面具有良好的“弹性“，通过相关城市建设中的措施来实现下雨时吸水、蓄水、渗水、净水，需要时将蓄存的水释放并加以利用^[17]。我们将海绵城市建设工程细分如图 8 所示。

一般认为，对于整个城市中的排水系统的建设来说，海绵城市的建设突破了以往以排

为主要的理念，将城市基础设施（包括建筑、绿地以及道路等）进行综合利用，对雨水进行收集、存储净化，实现雨水的回收利用^[18]。在这个过程中，充分利用到了生态化的技术，使城市恢复到建设之前的水文环境调节能力，解决雨后大面积积水问题，提升雨水资源利用率，实现“绿色生态城市的建设目标”。^{[17][18]}海绵城市概念图绘制图如图 8 所示。



图 8 海绵城市概念图

针对空前严峻的内涝形势以及对传统城市排水系统建设思路的反思，中央出台了相关文件，业内在进行多个规范标准的新编和修编，住建部发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》，^[17]与此同时，各城市也正按要求积极开展《排水防涝综合规划》的编制工作，这一系列举措将排水防涝以及海绵城市建设提升到相当的高度。针对这类情景，我们研究了雨污排水系统的分混流机制对于海绵城市建设的影响。

3.2 海绵城市建设在排水建设工程上的要求^[19]

3.2.1 减轻城市防洪排涝的压力

海绵城市的建设需要我们对城市的雨水进行有效地预防，将渗、蓄、滞、用、排等措施合理地结合起来。现阶段，以深圳市发展为代表的城镇化进程不断推进，城市建设中不

透水的面积不断扩张，因此，就加快了城市径流的汇集速度，洪峰流量变大，并且其出现的时间会提前，这就会增强其雨水来临的危害，从而导致城市内涝现象的产生。海绵城市的建设需要我们建设良好的防洪排涝系统。^[19]

3.2.2 缓解城市水资源短缺的现状

城市人口的增加，城镇化水平的不断提高，城市水资源的利用问题不断突出。在进行大规模现代化城市建设中，其城市地面的土壤很少出现，雨水能很快进行下渗，城市雨水会直接流入河道内，对于城市植物的生长非常不利。海绵城市的提出，对于城市水资源的供给提出了一项新的意见。^[19]这需要我们保证雨水进行下渗，努力为城市地下水的有效补给提供便利，这是顺应生态建设的一项重要举措，也可以在一定程度上对地下水的利用起到一定缓解作用。

3.2.3 致力于改善城市的生态环境

海绵城市建设对于城市生态环境具有良好的改善作用。海绵城市要求我们湖泊河流以及湿地等自然生态较为脆弱的区域进行重点保护。海绵城市也要求我们建设低影响开发的公共设施，努力控制径流污染，把初雨污染降到最低，同时海绵城市削减洪峰，补充地下水，有效地实现自然水循环，这样才可以对城市生态具有良好的保护作用。也就是说，海绵城市的建设要求我们利用排水管道，既要控制污染，也要对雨水进行良好的收集与利用，同时低影响开发系统也要求我们尽量减少能耗。

3.3 分、混流排水机制的水污染模型

海绵城市致力于为城市建设良好的生态环境，这要求我们将水污染降到最低，实现良好的生态循环，才可以打造健康的城市水环境。对城市排水机制来讲，分流与混流与水污染息息相关，因此很有必要城市分流制与混流制（截留式混流制）的水质信息及两者对城市水环境的污染方面进行比较，为排水体制的选择和水污染控制战略决策提供参考。

3.3.1 基于 SWMM 的雨水径流污染模型

3.3.1.1 雨水径流污染概念^[20]

高速的城市化,使得天然流域被开发,植被受到破坏,土地利用状况改变,自然景观改变。混凝土建筑、道路、商业区、住宅区、停车场等不透水地面大量增加,使得降水渗入地下、蒸发的部分减少,因而地表径流大量增加。

由于地表径流冲刷下垫面会携带大量的污染物进入受纳水体,导致水体的物理、化学性质和微生物特性发生变化,甚至成为影响水质的主导因素,一些有毒有机物及重金属会对水生生态系统产生严重的影响,并可能产生潜在的二次污染,是典型的城市非点源污染。

3.3.1.2 地表产流与汇流

地表的产流是本模型的基础。产流是指降雨量扣除损失形成净雨的过程。降雨损失包括植物截留、下渗、填洼与蒸发,其中以下渗为主。产流量是指降雨形成径流的那部分水量。^[20]初损的植物的截留量、填洼量、雨期蒸发量较小,而后损的下渗量较大且变化明显。因此在研究地表产流时,扣损主要研究的是下渗量对产流的影响。而海绵城市便是增强植物截留量与下渗量等方面。由于各流域所处的地理位置不同和各次降雨特性的差异,产流情况相当复杂。

在基于 SWMM 模型的理论模型中^[21],通常结合汇水区的地形情况、用地类型、规划的市政道路综合考虑,从而将一个较大的汇水区划分成若干个子汇水分区,这样实质上是一种拆而后合的思想,将子汇水区域的出流流量进行叠加,得到了进入雨污管网的入流流量。

本模型中,根据子流域的地表渗透性,将子流域分为了透水面积 S_1 、有洼蓄量的不透水面积 S_2 和无洼蓄量的不透水面积 S_3 。概化如图 1 所示。

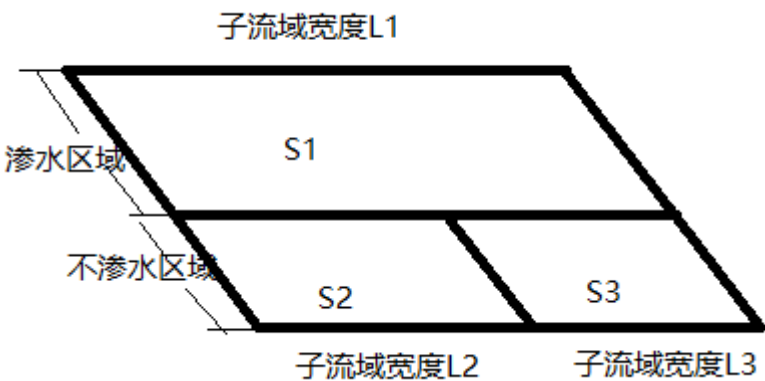


图 9 子流域概化图

在理论模型中,这样的为了简化设置,我们将所研究的区域简化为透水区域,通过调整入渗量来区分区域的地表渗透性的不同。在这样的假设条件下,复杂的回水区域的产流可通过计算 S_1 来完成。对于有透水能力的区域,该区域的降雨先进入地表,当区域内的地

面入渗量小于降雨量的时刻 t ，地表积水开始出现，当超过地块区域的蓄水能力，地表形成地面径流，产流计算如公式（3.1）所示：

$$Q_{产} = (i - f)\Delta t \quad (3.1)$$

式中

$Q_{产}$ ——透水地表的产水量（mm）

i ——降雨强度（mm/s）

f ——入渗强度（mm/s）

而对于地表汇流来说，在 SWMM 模型中，地表汇流主要采用的是非线性水库的方法。非线性水库的模型示意图如图 10 所示，非线性水库的模型概化图如图 11 所示。在地表汇流的计算过程中，首先把子流域概化成近似地非线性水库，通过每个子流域的净雨过程转化成流体力学中的出流程。^[25]

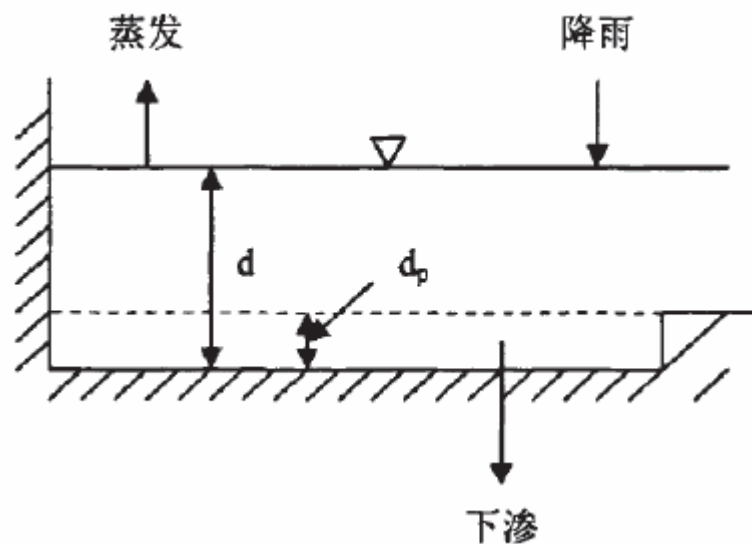


图 10 非线性水库的模型示意图

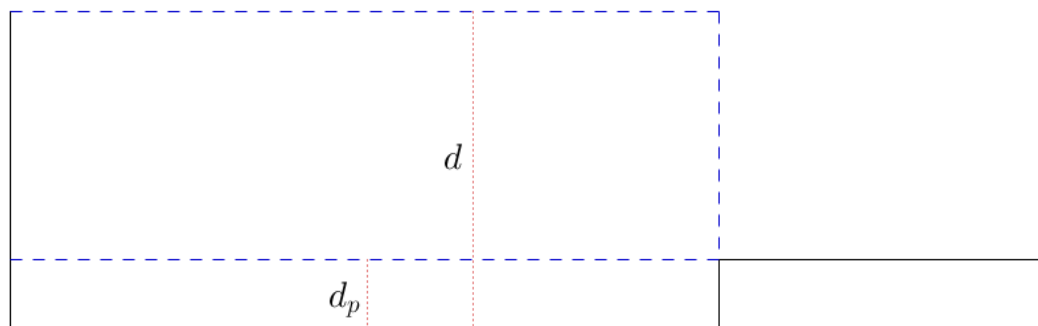


图 11 非线性水库模型概化图

计算公式为:

连续性方程:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - f - \frac{Q_{\text{出}}}{S} \quad (3.2)$$

曼宁公式:

$$Q_{\text{出}} = \frac{1.49}{n} W (d - d_p)^{\frac{5}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

式中

d ——水深 (m)

t ——时间 (s)

S ——子汇水面积 (m^2)

i ——降雨强度 (mm/s)

f ——入渗强度 (mm/s)

n ——曼宁糙率系数

d_p ——滞蓄深度 (m)

I ——子汇水区坡度

W ——子汇水区宽度 (m)

通过有限差分法可以将 (3.2) (3.3) 联立求解, 以 d_1 和 d_2 分别表示某一个时段内水深的初始值的最终值, 联立后的结果为

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i + \frac{1.49I}{Wn} [d_1 - \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p]^{\frac{5}{3}} \quad (3.4)$$

式中:

d_p ——地表蓄水深度 (m);

Δt ——时间段 (s);

I ——子汇水区坡度 (m);

W ——子汇水区宽度 (m);

n ——曼宁糙率系数;

i ——降雨强度 (mm/s);

d_1 ——时段内水深的初始值 (m);

d_2 ——时段内水深的初始值 (m);

采用 Newton-Raphson 迭代法对方程 (4) 进行求解.从而求出任意时间段内的 d_1 和 d_2 , 从而可以求解任意时间段内的产流量 Q_t 。

综上, 在深圳市雨污模型中的雨水流量分析中, 得到至关重要的物理量 Q_t 。

3.3.1.3 污染物累积与冲刷

雨水形成径流后, 早期以灰尘颗粒物的形式附着于地表的污染源被雨水冲刷这就造成了面源污染, 因为面源污染是由于地表的颗粒状污染源造成, 研究表明^[23], 这与地表的清洁程度关系最为密切。对于地表污染物的累积效应来说, 可将同一排水区域划分成不同的功能类型, 如工业区、商业区、居民区等, 也可划分为不同的土地利用类型, 如交通道路、屋面、绿地等, 根据不同的功能区或者不同的土地利用类型定义关于污染物的累积模型的各种参数和冲刷模型的各种参数。

其中, 在污染物累积模型中, 我们选取指数函数累计方程, 如公式 (3.5)。

$$B = C_1 (1 - e^{-C_2 t}) \quad (3.5)$$

式中,

C_1 ——最大累积量, 即质量/单位面积或质量/单位路面长度;

C_2 ——累计率, 即 day^{-1} ;

t ——时间, (s);

B ——污染累积量 (kg)。

对于冲刷过程, 是指在冲刷过程中地表被侵蚀和污染物质溶解的过程。SWMM 可以模拟以不同单位为计量的被冲刷污染物质, 如浊度 (单位 JTU), 细菌总数等。

类似的, 我们依然采用指数函数模型进行量化计算, 如公式 (3.6)。

$$P_{off} = R_c Q^n \quad (3.6)$$

式中

R_c ——冲刷系数;

n ——冲刷指数;

Q ——径流速率(m^3/s);

P_{off} ——冲刷负荷 (kg/s)。

式中, R_c 和 n 是该模型和污染物对应的数值, 不同污染物该参数不同, 此冲刷公式完全独立于污染物的累计模型。

3.3.2 分流制与合流制污染负荷计算^[24]

3.3.2.1 计算方法综述

通过计算径流量与污染物的累积量和冲刷负荷, 可计算出不同区域内进入管道的雨水量与面源污染物总量, 从而可以进一步计算出管道内雨水的水质, 在分流制排水机制中, 这自然就是雨水管道内的进入量水质。在混流制排水机制中, 除了雨水部分, 还要加上污水部分的水质与水量综合计算。

以下从理论方法计算分流制雨水和混流制溢流的污染物浓度、次降雨浓度、次降雨污染负荷量和年降雨污染负荷量, 进一步量化两种排水系统的水质, 从而得到不同排水机制对海绵城市建设的影响。

需要指出, 本文给出的分流制污染负荷是指某一汇水面积上汇集到雨水管道中的雨水全部排入水体带来的污染量; 合流制污染负荷量值某一汇水面积上汇集到排水管中的雨污水的溢流部分带来的污染量。干旱情况和降雨量较少时时, 合流制管道基本不发生溢流, 此时溢流带来的污染量较小, 甚至近似为零。

3.3.2.2 浓度计算

根据之前的产流汇流模型和污染物累计冲刷模型, 以及相关雨水干管的污水传送规律的研究^[23], 可计算出任何时刻分流制雨水干管某一断面的雨水浓度 $C_1(t)$ 和流量 $Q_1(t)$ 。

混流制排水干管中, 雨水和污水相结合, 某一断面的总流量和混合浓度计算见式

(3.7) (3.8) 所示。

$$Q_t = Q_1(t) + Q_2 = Q_1(t) + q_o F \quad (3.7)$$

$$C(t) = \frac{C_1(t)Q_1(t)}{Q(t)} + \frac{C_2Q_2}{Q(t)} \quad (3.8)$$

式中

$Q_1(t)$ ——分流制时为雨水干管某一断面的雨水流量, 混流制时为干管某一断面的雨污混流制水中的雨水的流量, L/s;

$C_1(t)$ ——分流制时为雨水干管某一断面的雨水浓度, 合流制时为干管某一断面

的雨污合流中雨水的浓度, mg/L;

Q_2 ——生活污水流量, L/s;

C_2 ——生活污水浓度, mg/L;

$Q(t)$ —— t 时刻合流制干管某一断面的雨污混合流量, L/s;

$C(t)$ —— t 时刻合流制干管某一断面的雨污混合浓度, mg/L;

3.3.2.3 次降雨污染负荷量计算

次降雨污染负荷量的计算是在计算污染物通量的基础上进行的, 以分流制为例, 计算方程如下:

$$a_1(t) = 0.001C_1(t)Q_1(t) \quad (3.9)$$

$$A_1(T_0) = 60 * 0.001 * \sum_{j=1}^{T_0} \frac{1}{2} [a_1(t_j) + a_1(t_{j-1})] (t_j - t_{j-1}) \quad (3.10)$$

式中

$a_1(t)$ —— t 时刻雨水干管某一断面的污染物通量, g/s;

T_0 ——次降雨的总历时, min;

j —— 把降雨历时 t 分为 j 份;

$A_1(T_0)$ ——总降雨历时为 T_0 的次降雨污染负荷量, kg。

采用混流制时次降雨污染负荷量计算方法与上述分流制污染负荷量计算方法类似, 只把式 (8) 中的 $C_1(t)$ 和 $Q_1(t)$ 用溢流浓度 $C_4(t)$ 和溢流流量 $Q_4(t)$ 代替。溢流浓度和溢流流量计算方程如式 (3.11) (3.12) 所示。

当 $Q(t) - Q_3 > 0$ 时, 发生溢流, 此时, 有式 (3.11) 和式 (3.12) 成立:

$$Q_4(t) = Q(t) - Q_3 = Q(t) - n_0 Q_2 \quad (3.11)$$

$$C_4(t) = C(t) \quad (3.12)$$

式中

Q_3 ——传输流量, L/s;

n_0 ——截留倍数;

$Q_4(t)$ ——合流制干管溢流流量, L/s;

$C_4(t)$ ——合流制干管溢流污染物浓度, mg/L。

3.3.2.4 年降雨污染负荷量计算

年降雨污染负荷量是指区域内在一年中的总降雨量造成的污染负荷, 这是在次降雨量计算的基础上完成的。通过计算次降雨污染负荷量, 再调查深圳市在一年中的总降雨情况, 将所有次降雨污染负荷量累加, 得到年降雨污染负荷量。如式 (3.13) 所示:

$$A_{1\text{ 年}} = \sum_{i=1}^n A_1(T_n) \quad (3.13)$$

式中

n ——总降雨次数;

T_n ——第 n 次降雨的耗时时间, min;

A_1 ——次降雨污染负荷量, kg。

3.3.3 分、混流污染物计算比较

用上述理论模型进行试验分析, 分别计算分流、混流的污染物浓度、次降雨污染负荷量、年降雨污染负荷量, 并对计算结果进行比较。

3.3.3.1 污染物浓度比较

理论计算的实验参数设置如下: 研究区域的汇水面积设置为 10 hm^2 , 降雨量为 10 mm/h , 污水浓度 350 mg/L , 冲刷系数 0.008 , 冲刷指数 1.8 , 生活污水比流量为 $0.6\text{ L/(s} \cdot \text{hm}^2)$, 降雨时间足够长。

根据深圳市国内地面卫生状况调查, 地表的最大累积量分别取 50 kg/ha , 100 kg/ha , 和 300 kg/ha 进行计算。

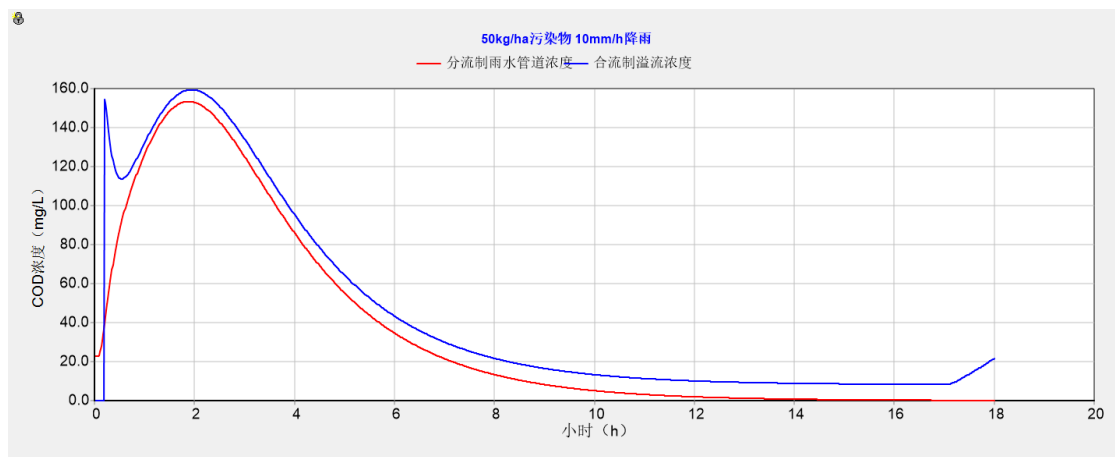


图 12 50kg/ha 污染物

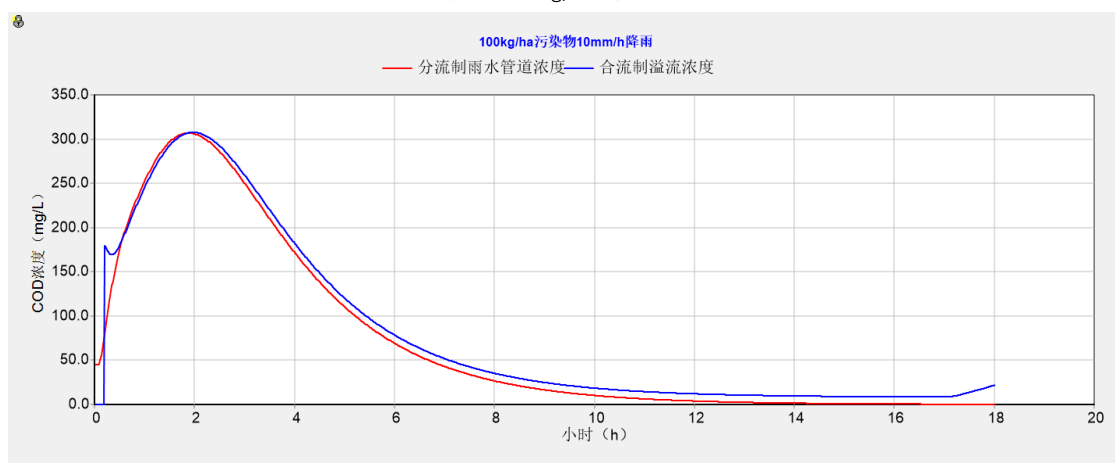


图 13 100kg/ha 污染物

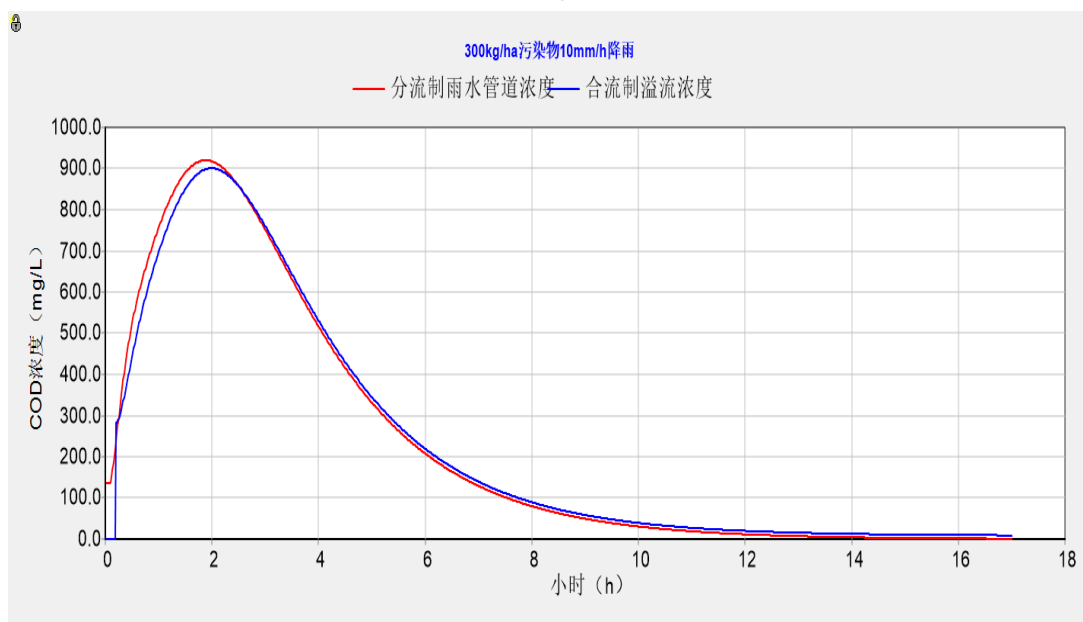


图 14 300kg/ha 污染物

观察前三幅图，当路面清洁状况比较差的时候，降雨初期，面源污染较为重，这时雨水的污染物浓度与污水管道接近，甚至会超过污水，随着降雨的持续进行，雨水浓度下降的更快。类似这种情况，高城市化且污染严重的城市的地面卫生状况不佳，出现了分流

制雨水管道的浓度高于合流制管道中的污水浓度的情况。而且，合流制的溢流一般不是发生在降雨的初期，因此污染物浓度最高的初期河流水不会发生溢流。

当地面卫生较好的时候，以图一为例，初期雨水的水质优于污水，这时分流制雨水管道中的污染物浓度会一直低于合流制管道的溢流浓度。这也是被业界普遍接受的一种情况。

3.3.4.2 次降雨污染负荷量

理论计算的参数如下：区域面积 10ha，区域汇水宽度 300m，1m 管径管道，6.34L/s 污水流入，污水 COD 浓度 350mg/L，降雨历时 1h，污染物冲刷模型为指数模型，冲刷系数为 0.008，冲刷指数为 1.8，清洁效率为 90%，截流倍数为 2。

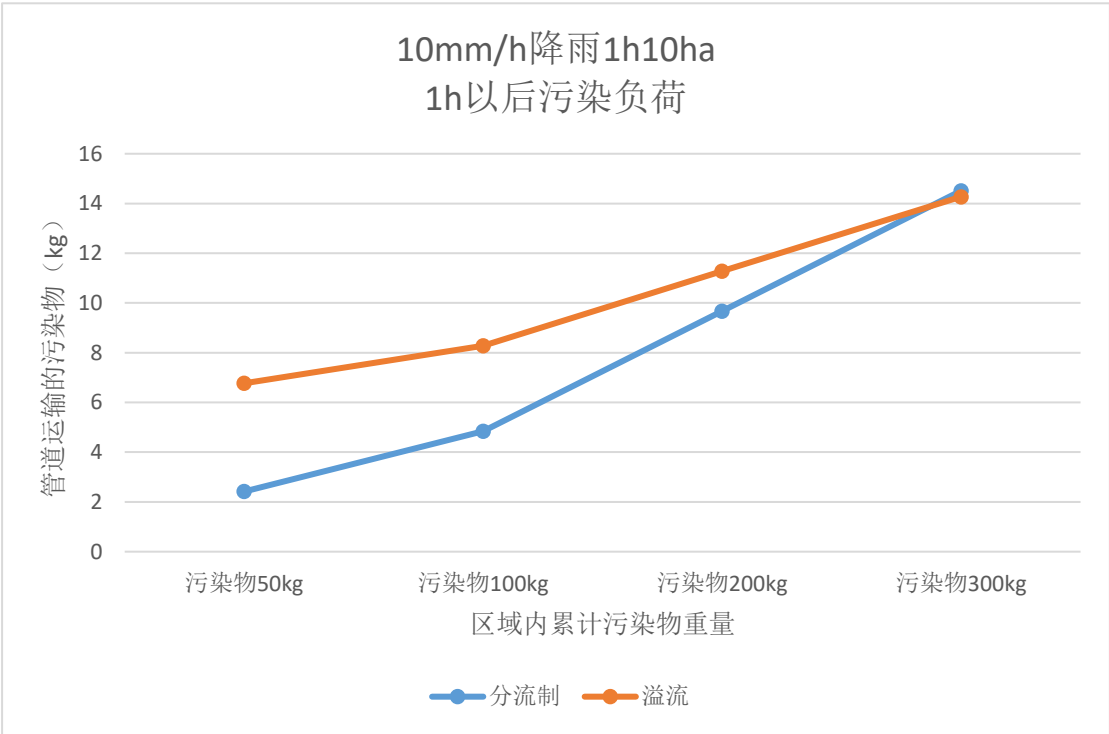


图 15 污染负荷

由图 15 可知，当雨水量恒定，降雨 1h，区域内部清洁程度越低，雨前最大污染物累计越大，分流制的污染负荷越严重，当污染物累计到一定情况时，分流制在降雨发生时的污染将会超过溢流。

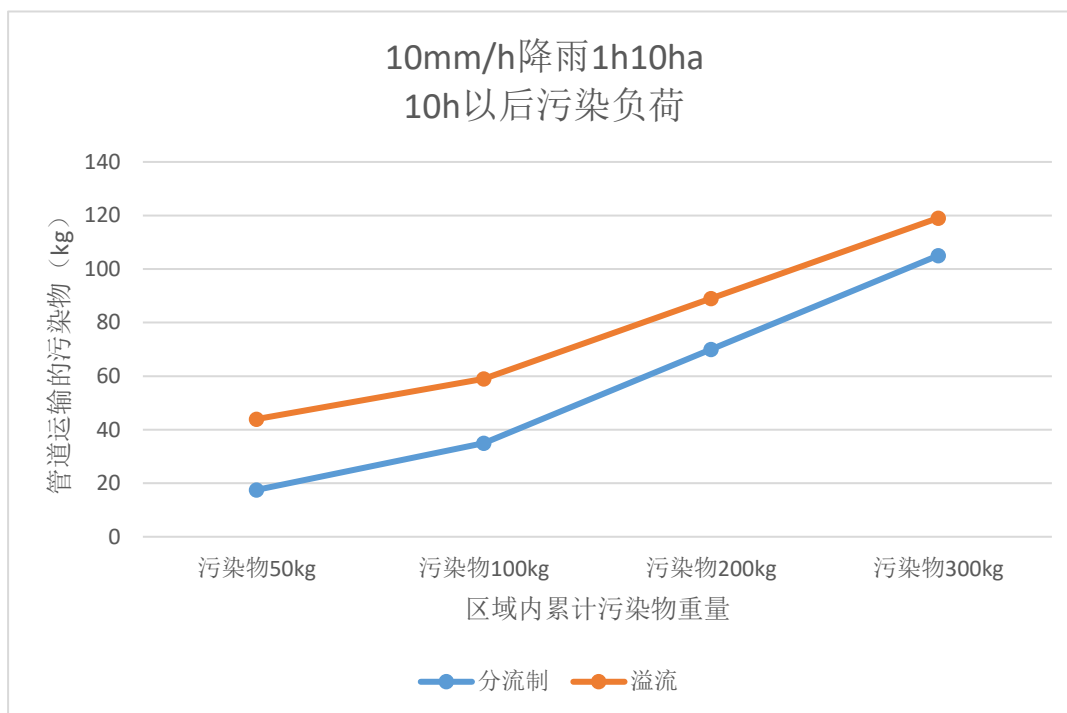


图 16 污染负荷

由图 16 可知，当降雨量恒定，降雨 1h，直至地表径流消失，分流制产生的污染负荷始终小于溢流产生的污染负荷。

3.4 河道补给流动模型

3.4.1 生态流量和生态需水量概念

河道内生态流量是指维持河流或湖泊的健康生态系统，保证人类从中获得物质和服务所需的流量。其概念不仅仅值最小生态需水量而且包括了枯水、平水以及红枫流量在内的整个流量的消长节律。结合海绵城市的概念，河道补水是海绵城市建设中极为重要的一环，其不仅起到蓄水产水的作用，更靠着河流生态系统的自身调节给城市的水环境建设带来重要支持。^[26]

在城市的河道水量建设规划中，需要考虑生态需水量的概念。河道生态需水量是生态环境需水的组成部分，是指维系河道生态系统所必须的水量。从结构功能上来看，河道生态系统需水是由多元变量组成的有机整体，包含蒸发蓄水，渗透蓄水、河流输沙需水、维持稀释自净能力需水、维持河流下游生态地下水水位需水、维持水生生物栖息地需水及景观用水等各个结构功能需水量。^[27]

3.4.2 最小生态需水量计算^[27]

基于生态流量和生态需水量的概念，本文建立了河道补给流动模型。

河道生态用水量是河道生态系统达到某种生态水平或者维持某种生态系统平衡所需要的水量，或者是发挥期望的生态功能所需要的水量，即达到一定水质要求下的合理水量。河道生态用水量满足最基本生态用水要求，及要满足基本生态水深。

首先，对水量来说，满足式

$$W_Z = \max(W_s, W_d, W_h, W_j) + \max(W_1, W_g) + W_e \quad (3.14)$$

式中：

W_Z ——河道最小生态需水量；

W_s ——输沙用水量；

W_d ——维持稀释自净能力所需水量；

W_h ——水生生物栖息地所需水量；

W_j ——河道景观需水量；

W_1 ——渗漏需水量；

W_g ——维持河流下游生态地下水位所需水量；

W_e ——水面净蒸发需水量。

对水质来说，需要结合河流现有水质进行具体分析。对水质达标，河流自净效果在正常能力下运转的额河流来说，需要满足

$$C_{\text{排放}} < (C_{\text{河道}} + K_i) \times \lambda \quad (3.15)$$

式中：

$C_{\text{排放}}$ ——排放物浓度，(mg/L)；

$C_{\text{河道}}$ ——河道化学物质浓度，(mg/L)

K_i ——河道浓度波动上限；

λ ——河道自净能力系数

而对于以深圳市茅洲河为代表的需要改善河道水质的河流来讲，需要做的是在短期内削减污染负荷、扭转水环境质量恶化的现象。在水资源丰沛地区进行合理调度，既可以增

加引清水量，稀释河水，降低污染物的浓度，又可以调活水体，加快河网水体流动，所以这时需要补充水质较好的水。

以深圳市茅洲河为例，按照区域规划和建设生态定位需要，需要保证河网水质达到到Ⅲ类水质控制目标，需要经过一系列水质监测、模型试验、参数分析、系统评价、确定污染物种类及其排放浓度。实地检测和实验是必不可少的环节。

3.4.3 雨污排放机制对河道补给模型的影响

在确立最小生态排水量及其要求的基础上，分析雨污分流制排水系统与雨污合流制排水系统对河道补给模型的影响。

对合流制排水系统来说，城市汇水流入污水处理厂，这样排入污水处理厂的水质和水量得到人为调控。

$$Q_{水} = (1 + n_0)Q_{污} \quad (3.16)$$

$$C_{水} = \frac{C_{污}Q_{污} + C_{雨}Q_{雨}}{Q_{污} + Q_{雨}} \quad (3.17)$$

式中

$Q_{水}$ ——进入污水处理厂的水量

$C_{水}$ ——进入污水处理厂的浓度

n_0 ——截流倍数

经过 t 时之后，污水处理厂的水处理后才能排放入河流。因此排入河流的水只有溢流产生的水，即

$$Q_{排} = Q_{雨} - n_0Q_{污} \quad (3.18)$$

$$C_{排} = \frac{C_{污}Q_{污} + C_{雨}Q_{雨}}{Q_{污} + Q_{雨}} \quad (3.19)$$

对分流制排水系统来说，城市降雨汇水流入河流，污水流入污水处理厂

$$Q_{排} = Q_{雨} \quad (3.20)$$

$$C_{排} = C_{雨} \quad (3.21)$$

第四章 分混流选择方式的判定模型

4.1 征地谈判模型

假设环境相似的每户家庭谈判同意的时间概率分布相互独立且同分布，区别于指数分布，该概率分布有记忆性，即

$$P(T \geq t_1 + t_2 | T \geq t_1) = g(t_1, t_2) \cdot P(T \geq t_2) \quad (4.1)$$

其中 $0 < g(t_1, t_2) \leq 1$ 且 $g(t_1, t_2)$ 随 t_1, t_2 的增加而减少

对比类似的久经检验的零件寿命模型（考虑老化），令 $g(t_1, t_2) = e^{-\frac{t_1 \cdot t_2}{\lambda^2}}$ 可得

$$P(T \geq t) = e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}}, P(T \leq t) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}}, f(t) = \frac{t}{\lambda^2} e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}} \quad (4.2)$$

$$P(\max(T_1, T_2, \dots, T_n) \leq t) = (1 - e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}})^n \quad (4.3)$$

$$f^*(t) = \frac{nt}{\lambda^2} e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}} (1 - e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}})^{n-1} \quad (4.4)$$

n 户家庭谈判所需要的时间的期望为

$$ET_{Max} = \int_0^{+\infty} f^*(t) \cdot t dt = \int_0^{+\infty} \frac{nt^2}{\lambda^2} e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}} (1 - e^{-\frac{t^2}{2\lambda^2}})^{n-1} dt \quad (4.5)$$

经过化简，当 n 趋于无穷时，部分参数被约减

$$ET_{Max} \approx \frac{\sqrt{2\pi m}}{2\lambda} n = an \quad (4.6)$$

式中

a 与具体环境有关。

4.2 区域内部管网价格模型

对于小区域内的管网造价，我们用一组随机但均匀分布的入水口以及一套固定的管道连接策略，辅以管道优化的方法得到价格，并作为没有做好施工图之前的概算。

4.2.1 入水口的选取

采样在计算机图形学中扮演着非常重要的角色。即使是简单的调整图像大小也要用到采样。因此如何进行采样就显得十分重要，一方面要保证采样点要均匀分布，另一方面要避免采样点重复或产生规律（否则会产生混叠）。人的视网膜在采样上做的非常出色，看下面这张视网膜在显微镜下的图，图中的较大的视锥细胞探测颜色，较小的视杆细胞对弱光较为敏感。

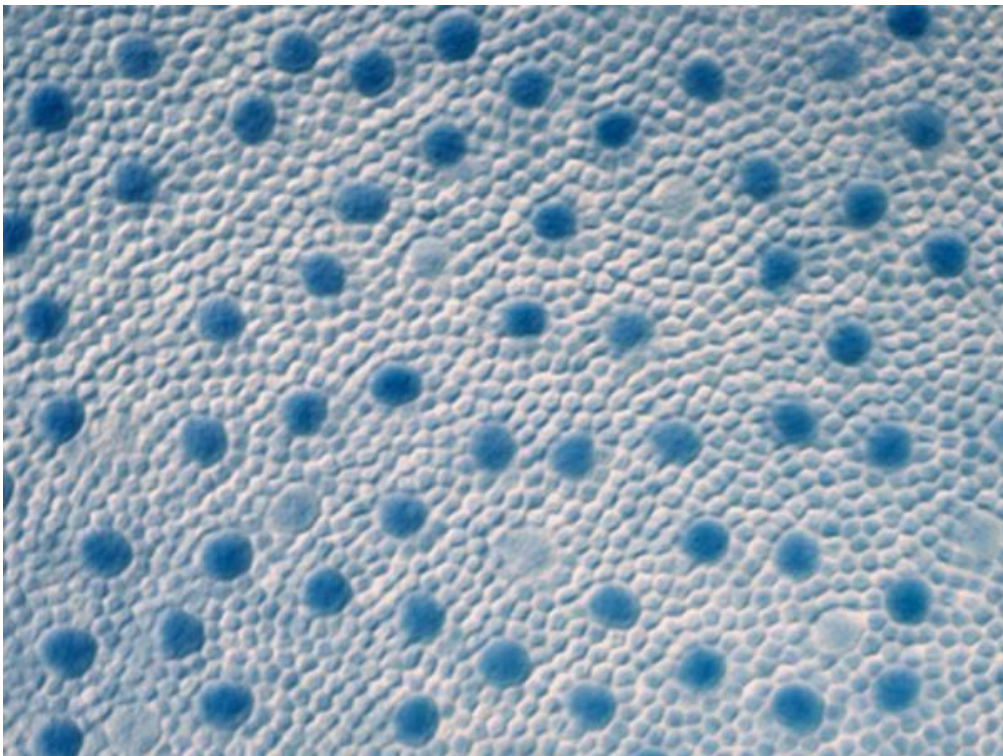


图 17 细胞图

细胞间的最小距离总是一定的，这种最小距离固定的采样方法叫做 **Possion-Disk Sampling**。这种采样的特性和入水口的选取要求极其相似，所以我们用泊松圆盘采样的方式选取假设中的入水口。

4.2.2 管道连接策略

取完网之后，我们还需要连接管网，连接管网也有一定要求，首先管网长短不要太不均匀，其次也要尽量不能产生交叉，最后，因为方法运用范围是小区域，我们要求该策略可以算法化，以满足计算机求解的需要。下面是该算法的流程图

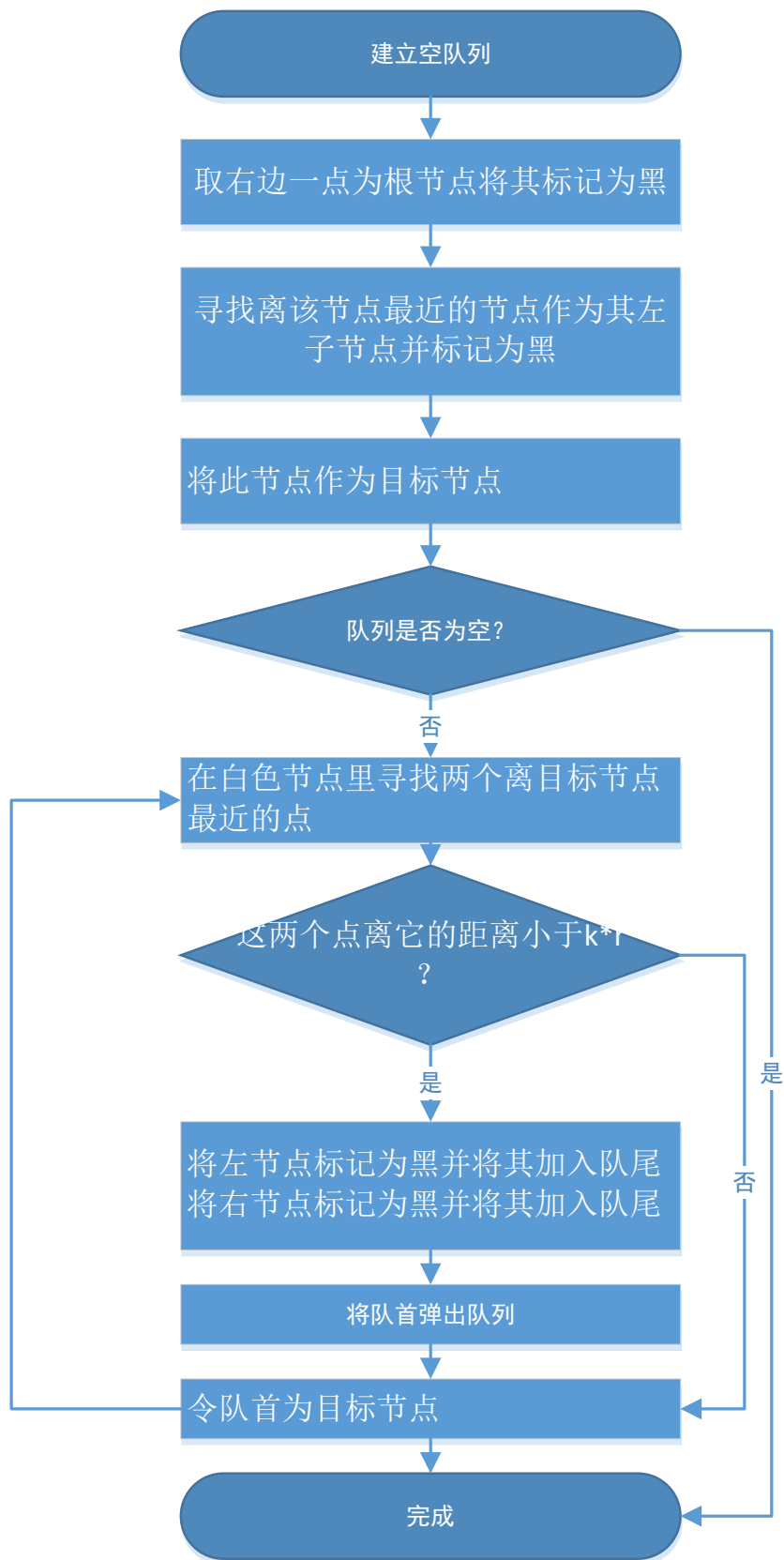


图 18 管道流程图

以下，是通过 MATLAB 得到的效果图：

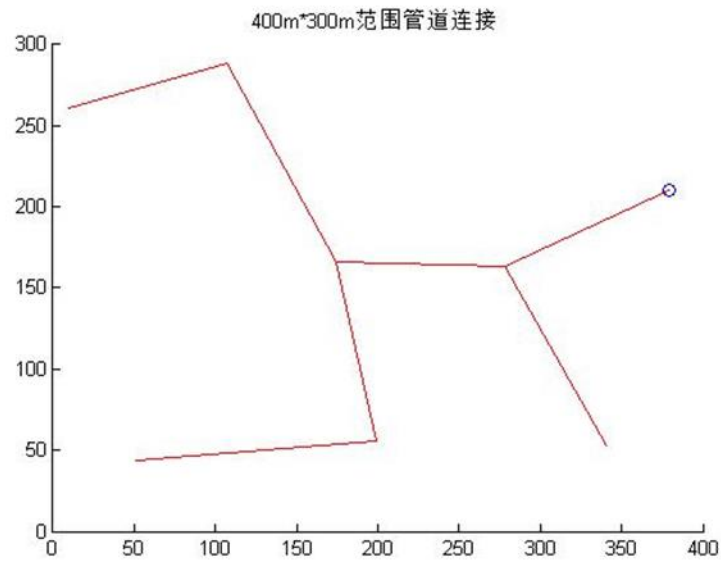


图 19 400*300 管道连接

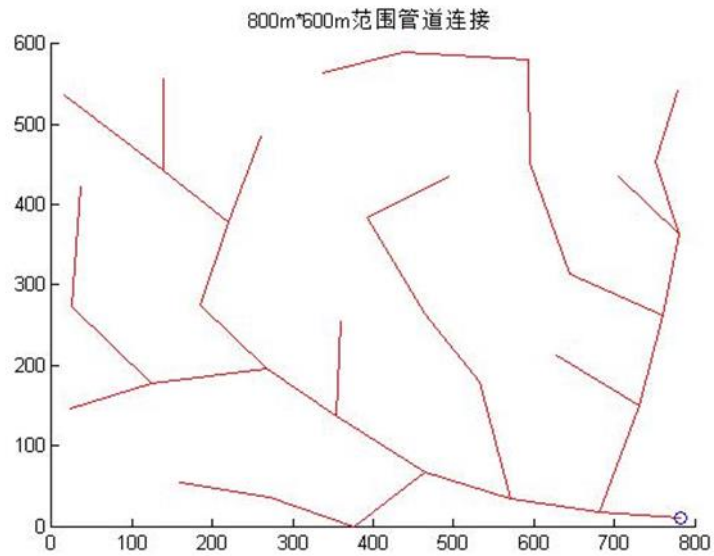


图 20 800*600 管道连接

4.2.3 入水口流量计算

泰森多边形又叫冯洛诺伊图（Voronoi diagram），是由一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形组成。

泰森多边形的点的特性：

- 1、每个泰森多边形内仅含有一个离散点数据；

- 2、泰森多边形内的点到相应离散点的距离最近；
- 3、位于泰森多边形边上的点到其两边的离散点的距离相等。

泰森多边形多用于水文分析中平坦区域汇水面积子面积的划分，此处我们将各个入水口对应的泰森多边形面积在总面积中所占的比例乘以整个范围的流量作为该入水口的流量。

下面是泰森多边形区域划分和管道自动连接共同作用时产生的效果图

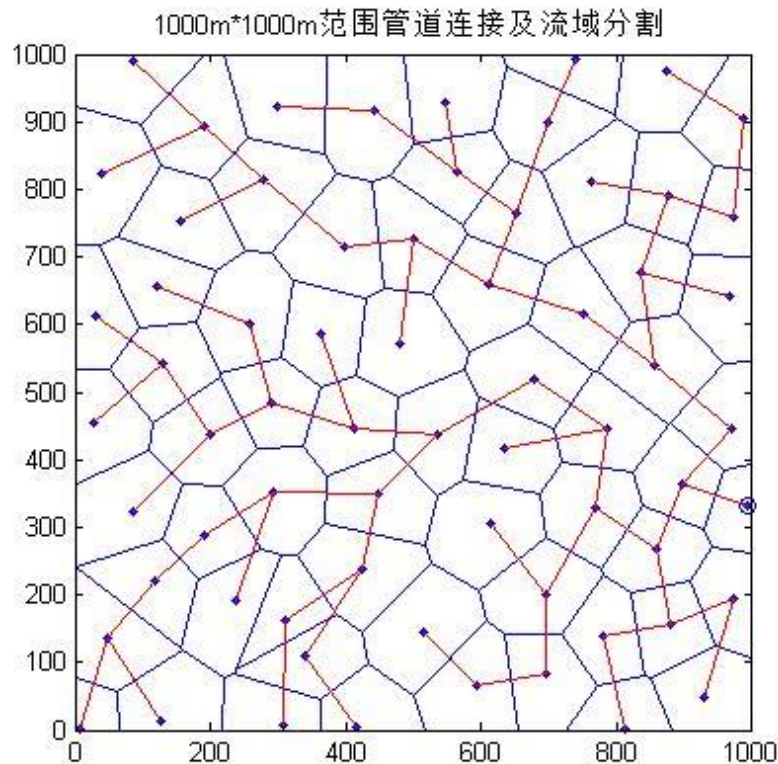


图 21 1000*1000 泰森多边形分割

4.2.4 价格计算

分流制和混流制两种排水方式对排水管道的要求和设置都有区别。分流制要求排水管网同时拥有雨水管网与污水管网，但污水管网的污水量较为稳定，雨水管网的管径一般与当地的降雨程度相关，其中直接排入河流的雨水管道存在初雨污染问题。混流制对排水管网的建设要求较低，管径一般与污水量的倍数相关，但会产生溢流污染问题。

在管网的设计中，有两种基本单位：节点、管段。为了解决排水管网的网络结构对管径的要求，我们决定采用图论的树形结构描述排水管网的有向图。主要利用动态规划算法，来解决排水管网的优化问题（价格最优问题），并在许多细节方面做出新的优化。其中混流制管网节点的输入流量包括污水量与雨水量，分流制雨水管网节点输入流量为雨水量，污水管网节点输入流量为污水量。

依托于上面建立的排水管道网络，通过设置节点的污水参数，来研究分混流排水方式产生的点源污染与面源污染。分流制中污染主要来自于初雨对地面进行冲刷，将地面的污染物

直接带入雨水管道之中,排入河流后对河流产生污染。混流制中污染主要来自于暴雨天气下,因雨水过量而产生的溢流问题。

满足排水设计要求的管网系统是一组范围解,在实际运用中工程师往往凭经验选择其中一组合适的解。在计算机技术高度发展的今天,已经出现许多针对节约工程投资的管道优化算法,如枚举法、节点递归法、两相优化法、遗传算法和三叉树法^{[38][39]}等,这些方法或者时间复杂度太高以至于运行时间随着节点个数的增加攀升到不可接受的程度,或者只能概率达到最优解如遗传算法等。本文在不要求得到管网具体拓扑结构的情况下,采用了一种树型动态规划的方法来取得经济最优解。

$$G[h][i] = \min(G[h_1][leftson(i)] + \Delta G(h_1, h, leftson(i)), G[h_2][rightson(i)] + \Delta G(h_2, h, rightson(i))) \quad (4.7)$$

因为不同管径连接是顶部对齐的,所以这里的 h, h_1, h_2 是顶部标高。

由 $h - h_1, h - h_2$ 可以得到此时的坡度 I ,联立以下两式

$$v = C\sqrt{RJ} = K_n \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

$$Q = Sv \quad (4.9)$$

式中

Q ——流量 (m^3/s)

S ——过水断面面积 (m^2)

v ——流速 (m/s)

R ——水力半径 (过水断面面积与湿周之比) (m)

I ——水力坡度

K_n ——单位换算系数, SI 制中为 1, 英制中为 1.486

n ——粗糙系数

可以得到管径 D ,注意到管径是离散的,那么真实管径要大于计算管径的标准管径中最小的那个。

在《排水管网理论与计算》一书中给出了如下的总投资费用函数 (元/米)

$$F = \sum_{i=1}^m C_i(D_i, H_i)L_i \quad (4.10)$$

$$C_i = (52.07 + 76.491D_i^{2.3489}) + (0.3358 + 36.87D_i)H_i^{3.0157} \quad (4.11)$$

式中

F ——管道总费用

L_i ——各管段的长度

D_i ——管径

H_i ——管道埋深

C_i ——管道单位造价。

4.3 总判定模型

首先，以向量 \vec{p}_k 表示第 k 次方案，用 α_i^k 表示第 i 个区域所选择的排水方案。令

$$\alpha_i^k = \begin{cases} 0 & \text{when water is combined} \\ 1 & \text{when water is shunted} \end{cases} \quad (4.12)$$

对于任意满足如下约束条件的向量 $\vec{p}_k = (\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_n^k)$ 称之为经济与截流合理方案向量，所有经济与截流合理方案向量 \vec{p}_k 组成的集合记为 P。

$$\begin{cases} G_{min} \leq G(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_n^k) \leq \lambda G_{min} & \alpha_i^k \in \{0,1\} \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i^k Q_{inr_i} \geq \sum_{i=1}^n (Q_{inr_i} + Q_{ind_i}) - n_0 Q_s \end{cases} \quad (4.13)$$

式中

$G(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_n^k)$ ——此方案下的经济指标

G_{min} ——所有方案中经济指标的最小值

λ ——误差平衡系数

Q_{inr_i} ——进入第 i 块地的雨水流量

Q_{ind_i} ——进入第 i 块地的污水流量

Q_s ——污水处理厂设计流量

n_0 ——设计截流倍数

对于任意 $\vec{p}_k \in P$ ，都能保证在设计暴雨强度下不产生明显的截流式溢流，且其经济指标 G 在所有方案中最小者的 λ 倍内。选取合适的 λ 值，既能非常接近理论上的经济最优解，又能够很大程度地平衡计算经济指标 G 时产生的误差。对于这些方案，不能仅仅从经济和截流两方面判断孰优孰劣，因此需要分别计算别的指标，如谈判时间，错接引起的污水流量等。

$G(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_n^k)$ 的值与当前的管线布置相关。令 G_{ki} 表示方案 P_k 下第 i 块地块改造为分流的经济指标，下面将该地块当前管线布置分成下面 5 种情况考虑。

- a.已修建完善的雨污分流管道
- b.已修建完善的合流管道
- c.已修建分流管道而不完善
- d.已修建合流管道而不完善
- e.未修建完善管道

情况 a 最为理想可以不做改动；对于情况 b，工程上倾向于在该地区新建雨水管网并将合流管网改造成污水管网，经济上雨水管网修建成本占绝大多数；对于情况 c，需要完善雨污毛细管网的连接，原则上要求不能错接；对于情况 d，需要同时新建雨水管网和污水管网；对于情况 e，应优先考虑对该地区进行社区改造。对于情况 a、c，没有理由从分流改成合流，于是在做分流混流判定时，只需要考虑情况 b、d、e。

$$G_{ki} = \begin{cases} Gr_i^* + \sum Gr_j + \Delta & \text{condition } b \\ Gr_i^* + Gd_i^* + \sum Gr_j + \sum Gd_j & \text{condition } d \\ Gr_i^* + Gd_i^* + \sum Gr_j + \sum Gd_j + Gu_i & \text{condition } e \end{cases} \quad (4.14)$$

Gr_i^* ——第 i 块地块雨水管网连入外部管网的管道造价（包括管道的买入费用和埋设费用）

Gd_i^* ——第 i 块地块污水管网连入外部管网的管道造价（包括管道的买入费用和埋设费用）

$\sum Gr_j$ ——第 i 块地块内部雨水管网造价（包括管道的买入费用和埋设费用）

$\sum Gd_j$ ——第 i 块地块内部污水管网造价（包括管道的买入费用和埋设费用）

Δ ——情况 b 所需要的额外的费用，一个相对小量

Gu_i ——第 i 块地块征地及改造需要的费用

于是， $G(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_n^k) = Gp_k + \sum_{i=1}^n G_{ki}$ ，其中 Gp_k 是方案 p_k 中铺设外部管网所需要的费用，在外部管网已经铺设完成的情况下 $Gp_k = 0$ 。

Gr_i^* 、 Gd_i^* 可以通过埋深长度-造价公式给出， $\sum Gr_j$ 、 $\sum Gd_j$ 可以通过取代原理给出。

Gu_i 的计算和当地政府政策相关，没有统一的表达式，但是只要有相关法案就能够简单计算。

根据之前谈判模型得到的结论，类型相似的用地上住户数量足够多时，进行征地谈判需要的期望时间正比于住户数量。同时，不妨认为类型相似的用地上住户数量正比于用地面积，所以用当地类型相似时，进行征地谈判需要的时间正比于用地面积。

记第 i 块土地第 j 种用地类型的面积是 S_{ij} ，第 j 种用地类型的谈判系数是 c_j ，所有区域谈判需要的时间为

$$T_c^k = \max\{\sum_i^n \text{in condition } e \alpha_i^k S_{ij} c_j\} \quad (4.15)$$

只考虑比较难以纠正和管理的入户错接，暂不考虑容易处理的其他错接，并给不同用

地类型设置不同的错接率 m_j ，则第 i 块土地的综合错接率为

$$mc_i = \frac{\sum_{All\ j} S_{ij} m_j}{\sum_{All\ j} S_{ij}} \quad (4.16)$$

由错接引起的污水流量为

$$Q_{dmc} = \sum_{i=1}^n mc_i Q_{ind_i} \quad (4.17)$$

对于这些指标，不做也没必要做模糊综合评价，否则会带来很大主观性。将这些指标制成表格，运用时，根据不同指标在领导心目中的权重，筛选出最终方案向量 $\overrightarrow{p_{last}}$ ，由 $\overrightarrow{p_{last}}$ 的各个分量确定第 i 块土地是采用清源还是截流。

第五章 针对茅洲河光明片区的研究

5.1 背景介绍

5.1.1 光明片区介绍

光明新区隶属于广东省深圳市宝安区，成立于 2007 年 8 月 19 日。下辖公明、光明两个街道。属于低山丘陵滨海区，背山面海，岗峦起伏。地势是东北高西南低，地形较为复杂，主要地貌类型为低山、丘陵、台地和平原，东北部主要为低山，中部及北部主要为丘陵台地，西部主要是冲积平原，并残存一些低丘，而西南海岸多为泥岸。光明新区属亚热带海洋性气候，平均气温 22°C ，雨量充沛，年降水量 1926 毫米。茅洲河及其支流在光明新区内纵横交错。^[28]

光明新区现状城市建设用地面积 4903.68hm^2 ，占辖区总面积的 31.57%，其中大多为工业用地和居住用地，占总用地的 56.78% 和 15.96%。剩余部分则为道路广场用地、绿地及园林、政府用地、商业服务业用地等。^[30]

5.1.2 茅洲河介绍

茅洲河是深圳第一大河，发源于深圳境内的羊台山北麓，干流全长 41.61km。茅洲河上游地形多属丘陵台地，植被受破坏，水土流失较严重，造成中下游河床逐年淤积，河道弯曲浅窄，加上受海潮顶托，行洪不畅，江海堤围单薄、低矮，每遇台风暴雨，泛滥成

灾。^[29]近年来茅洲河的污染问题日益严重，其中深圳市光明片区对茅洲河的整体污染物贡献率为 27.3%。^[31]因此解决深圳市茅洲河光明片区的污水排放问题对茅洲河的治污影响非常大。



图 22 深圳市污水照片^[32]

5.2 模型应用流程图

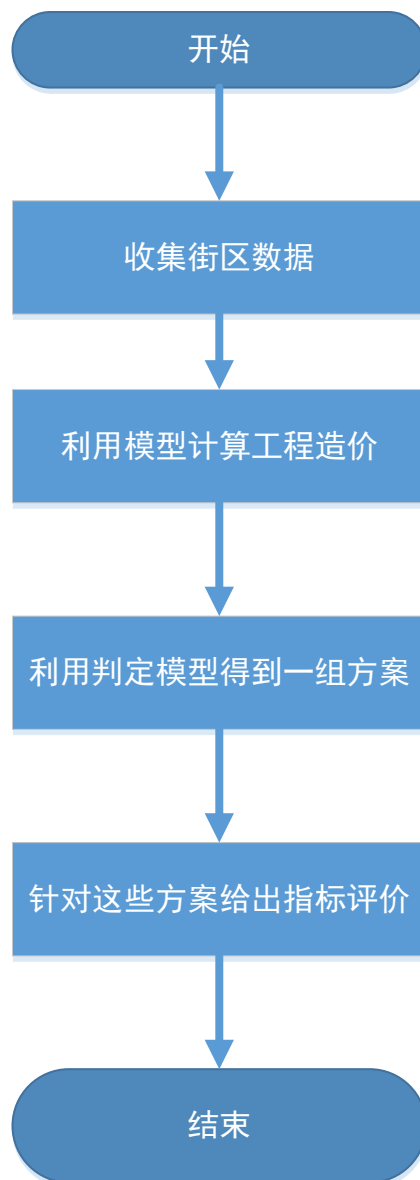


图 23 模型应用流程图

5.3 数据收集与整理

5.3.1 收集思路

通过在深圳市规划和国土资源委员会的查找的法定图则，利用 PhotoShop 将光明新区的法定图则进行拼接，得到图。

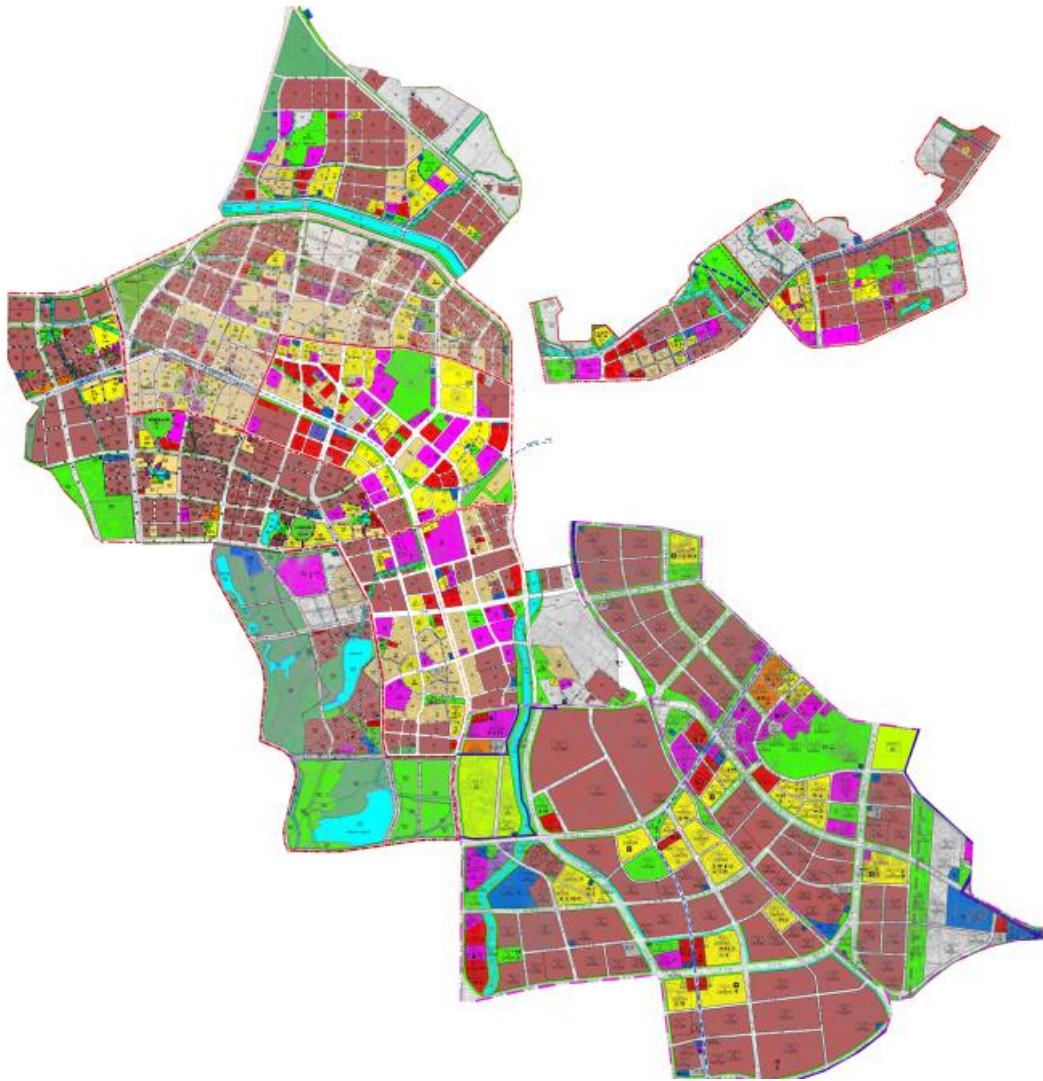


图 24 光明新区法定图则

在城市降水-径流模型中，要选择合适的划分将整个区域分成许多汇水子区域，然后根据所划分的汇水子区域计算其汇流，并进行后续研究。在《室外排水设计规范》中并没有对雨水设计流量公式中的汇水面积中给出计算方法。而现在在汇水子区域的划分及面积的研究上，已经存在了许多方法：存在适当的地形坡度时，依照径流的水流方向划分；地形平坦，以就近排除的原则，按管渠布置用等分角线划分，扩大重力流排除雨水的范围；Thiessen 多边形法、面积管长比法；GIS 环境下基于 DEM（数字高程模型）的汇水面积划分方法**错误!未找到引用源。**；利用原有市政道路进行划分等。

由于降水-径流模型中，针对环境不同的区域，有不同的经验公式与方法，所以在进行模型构建前，对所研究区域的自然、人文环境的研究是必要的。针对所研究区域，选择合适的方法，可以减少区域划分所带来的误差，为后续污水排放方式的研究带来高质量、有价值的数

据。

对于地形等方面的数据收集，大多依托于对该区域的 DEM 的研究，由于无法进行实地

绘制 DEM,所以 DEM 数据只能选择 SRTMDEM 90M 分辨率原始高程数据或 GDEMDEM 30M 分辨率数字高程数据。不同的 DEM 数据与现实的模拟的匹配程度不同, 不仅与数据本身的分辨率和精度有关, 还与 DEM 数据的分析方法有关, 而 GDEM 的数据噪声相对较大但水平分辨率较高^[34]。同时, 在原始 DEM 数据中, 通常都有洼地与尖峰, 有解释认为洼地与尖峰是真实的地表形态, 有解释认为是由于采样误差及内插等原因造成的假地形, 因此应该修正^[35]。所以, 在研究过程中对 DEM 数据进行适当的处理是必要的。

所研究区域的开发程度、绿化面积、用地类型等要素的不同, 对降水-径流模型及后续其他研究都会产生一定的影响。所以也应对区域的人文环境数据进行收集、处理、分类。

综合考虑多方面因素影响, 同时考虑后续研究所需数据的精度与可靠性, 通过 ARCGIS 将所需要的区域属性进行收集。

研究步骤见下图:

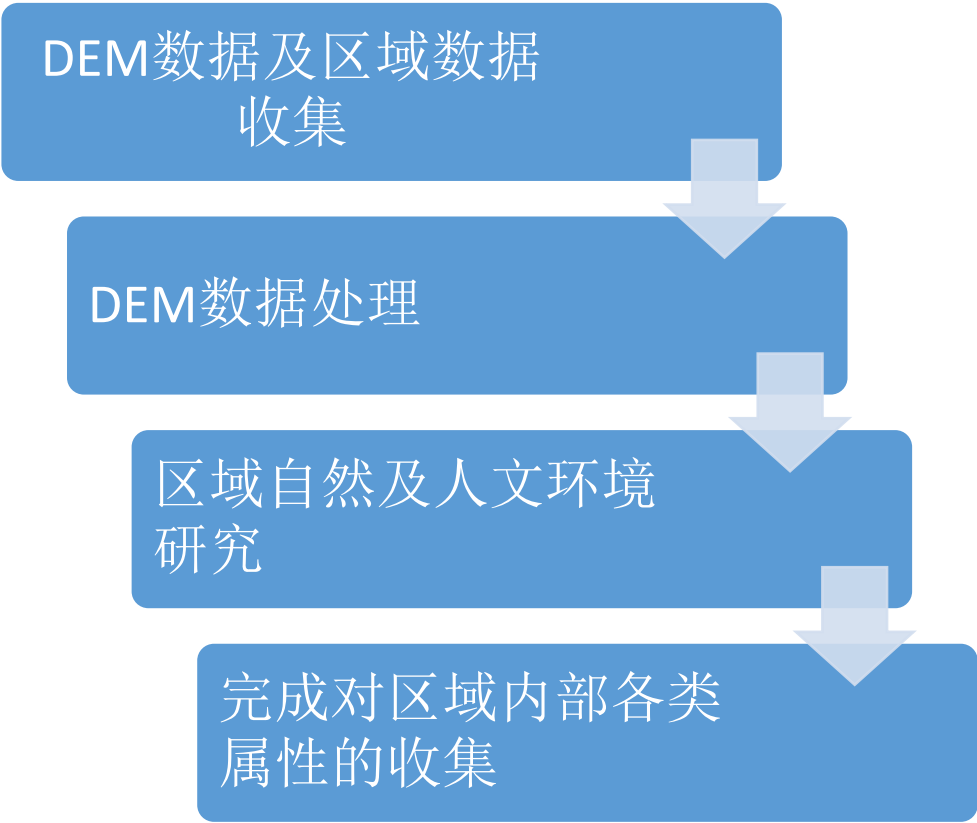


图 25 数据收集研究步骤

5.3.2 区域划分与数据收集处理具体方法

针对所研究的区域进行讨论, 从光明片区的地形地貌入手, 找出适合光明片区的汇水子面积研究方法。通过从中科院地理空间数据云中获取的 GDEMDEM 30M 分辨率数字高程

数据 对光明片区进行分析。

首先，利用深圳市行政区规划图绘制 shp 文件对 GDEM 数据进行裁剪，提取出光明新区的 GDEM 数据。利用 ARCGIS 读取光明新区 GDEM 数据，获得光明新区的高程信息（如下图）

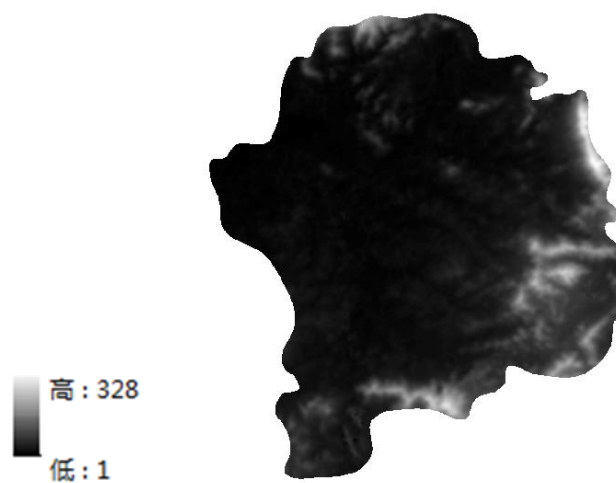


图 26 光明新区高程图

由图及资料可知，光明新区大部分地区较为平坦，东南高、西北低。由于所获得的 DEM 信息存在误差，因此要进行洼地分析与填洼处理。利用 ARCGIS 绘制光明新区 DEM 的水流方向（如下图）

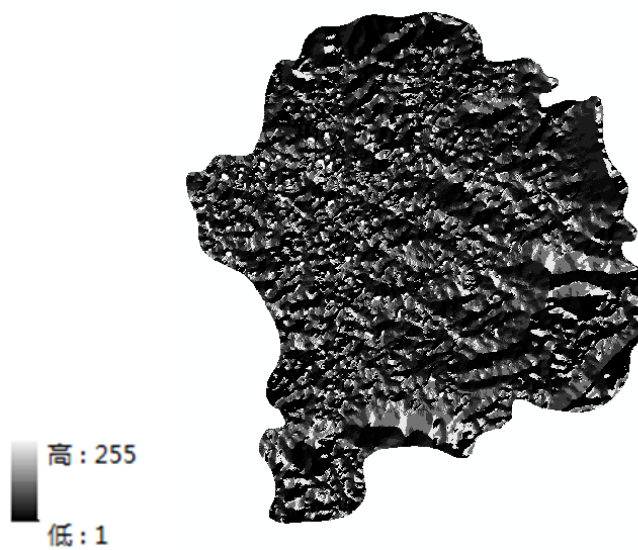


图 257 光明新区流向图

然后利用 sink 工具获得研究区域洼地（如下图）

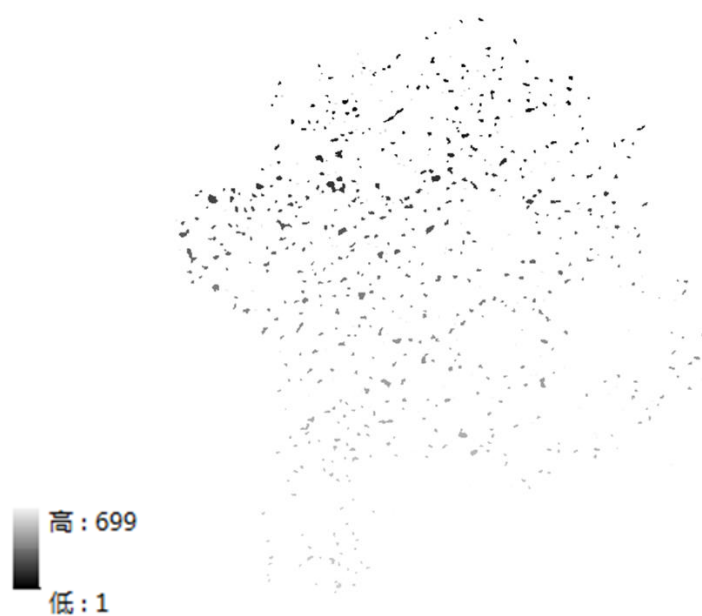


图 28 光明新区区域洼地图

利用 Watershed 计算每个洼地贡献的区域（如下图）

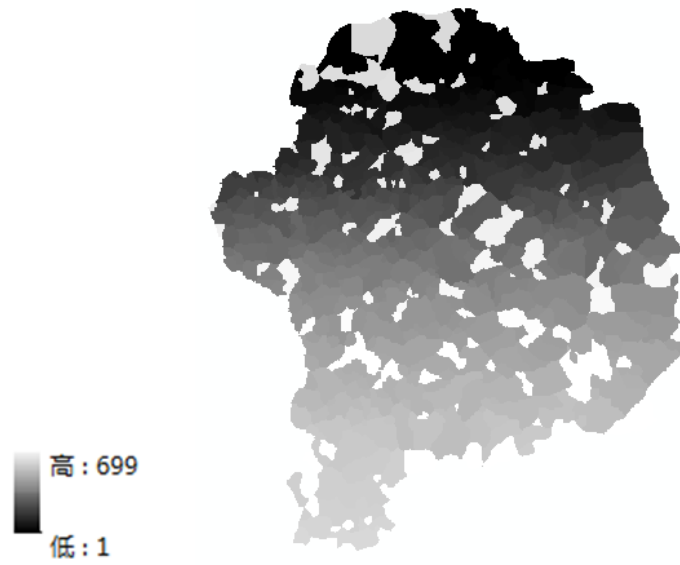


图 29 光明新区洼地贡献图

利用 Zonal Statistic 工具对区域进行分区统计每个区域的最低高程（如下图）

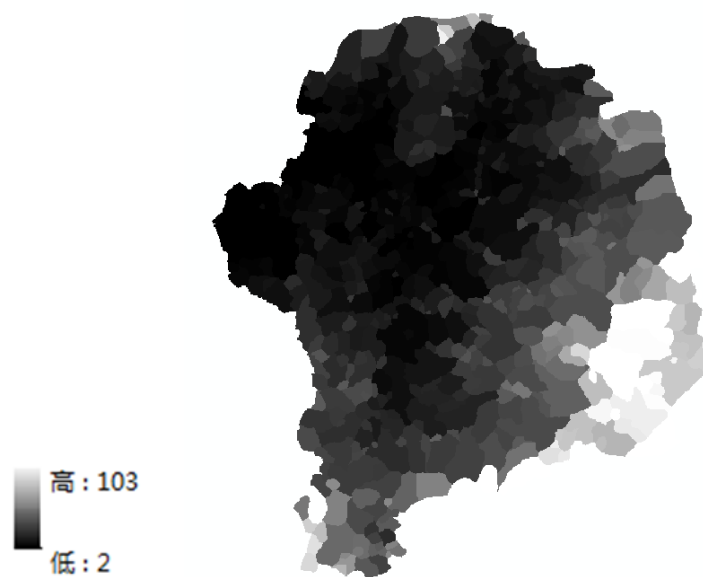


图 30 光明新区区域最低高程图

利用 Zonal Fill 工具对洼地贡献区域出口处的最低高程进行计算（如下图）

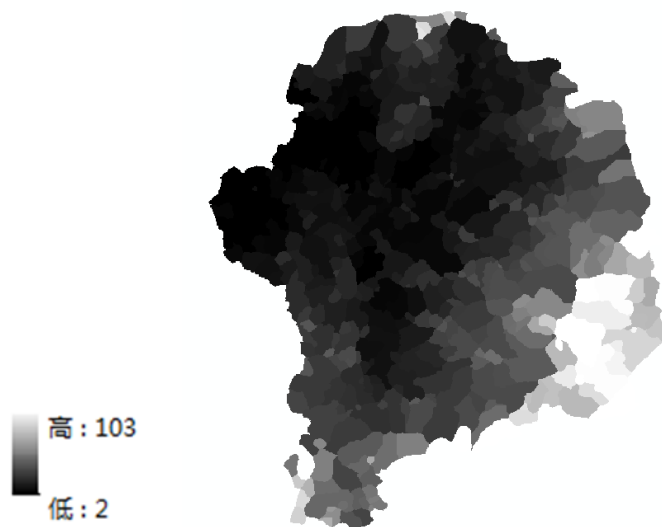


图 31 光明新区区域出口最低高程

利用栅格计算器进行洼地深度计算（如下图）

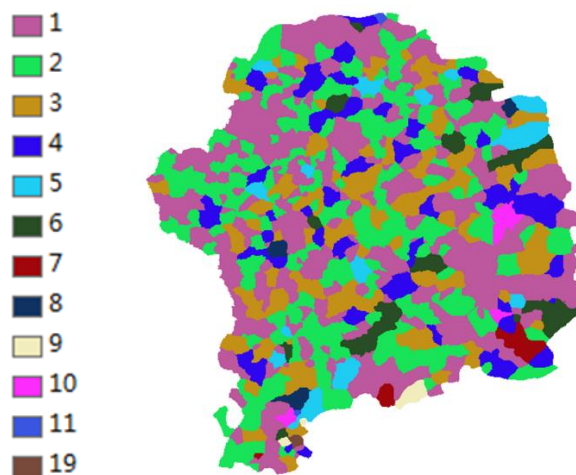


图 32 光明新区洼地深度图

通过与自然地形的对比，确定填洼时的填洼阈值为 4.5，利用填洼工具进行填洼，得到无虚假洼地 DEM（如下图）。

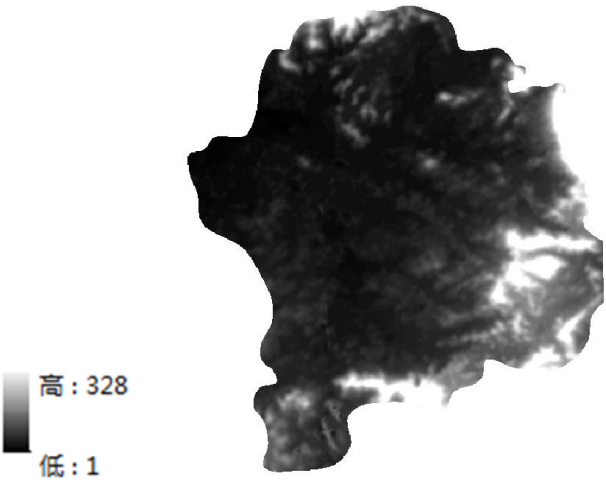


图 33 光明新区无洼地高程图

为了获得更合适的计算坡度的 DEM 数据，避免因为 DEM 数据的分辨率过低导致误差过大，采用双线性内插法（Bilinear Interpolation）对 DEM 进行重采样。双线性内插选取距离它最近的 4 个数据点（栅格）直接拟合曲面，高程属性与坐标 x 或坐标 y 呈线性关系。所以称为“双线性”。^[36]双线性内插获得的结果比较平滑，且精度比较高，比较适合 DEM、气温、坡度等的连续数据。

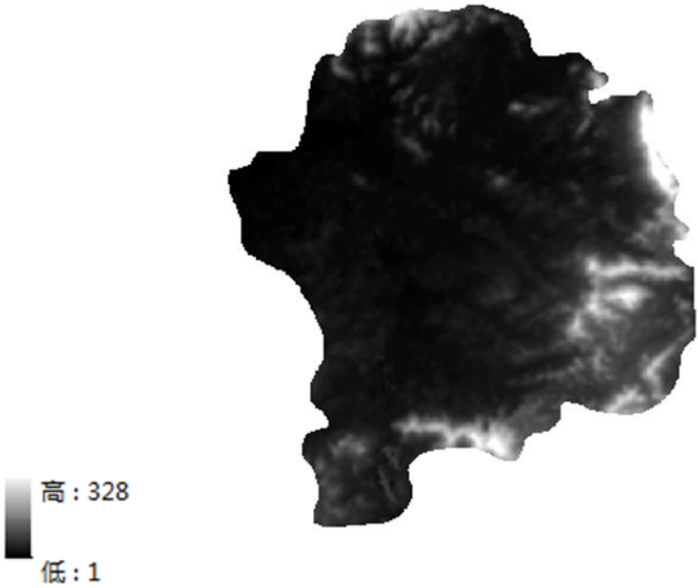


图 34 光明新区重采样 DEM

利用 ARCGIS 中的 slope 工具可以计算重采样之后的 DEM 数据的坡度

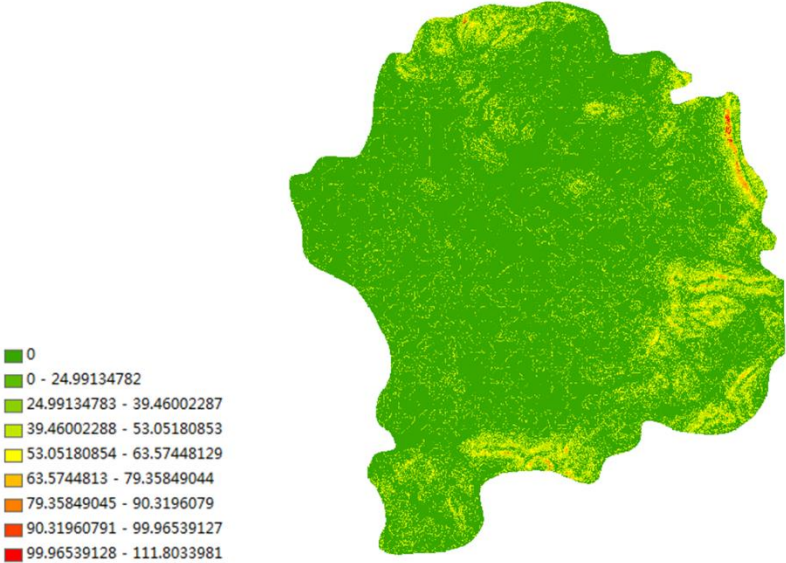


图 35 光明新区坡度图

通过光明新区的 Shp，可以将光明新区中污水进入污水处理厂和燕川污水处理厂的的区域通过道路自然的划分开来，并利用分区统计功能，可以得到每一个街区的平均坡度

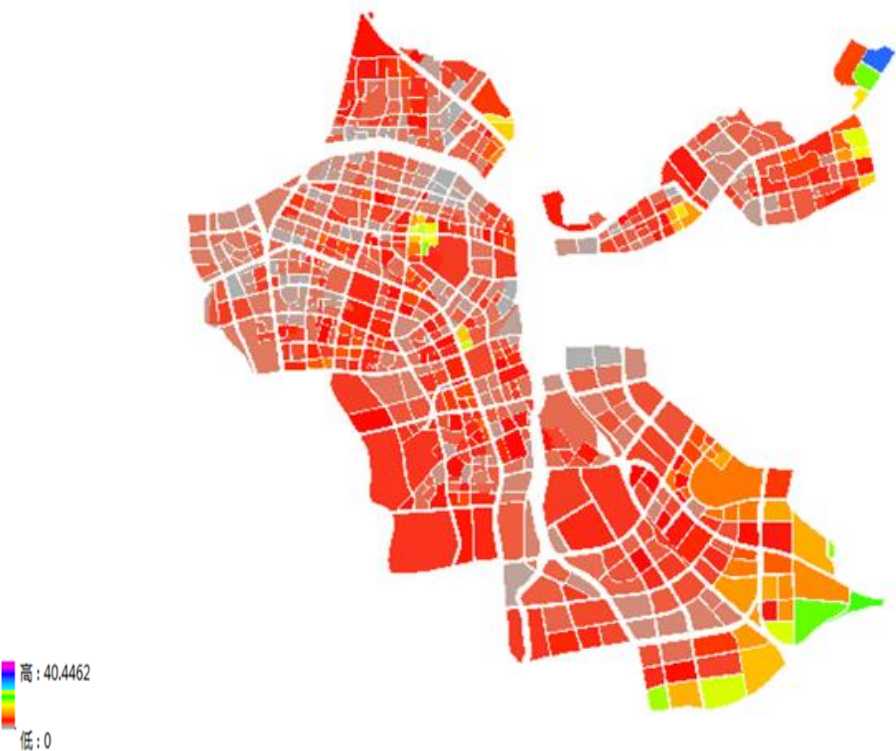


图 36 光明新区分区平均坡度

5.4 模型应用

5.4.1 光明新区施工费用

根据上文所提的雨水量计算与光明新区街区划分属性，可以计算出光明新区不同街区产生的雨水径流，并使用 ARCGIS 绘出雨水图（图 38），根据污水量计算模型，光明新区不同用地类型污水量不同（见表 4），可以计算出光明新区的街区污水量，并利用 ARCGIS 绘出污水图（图 38）。

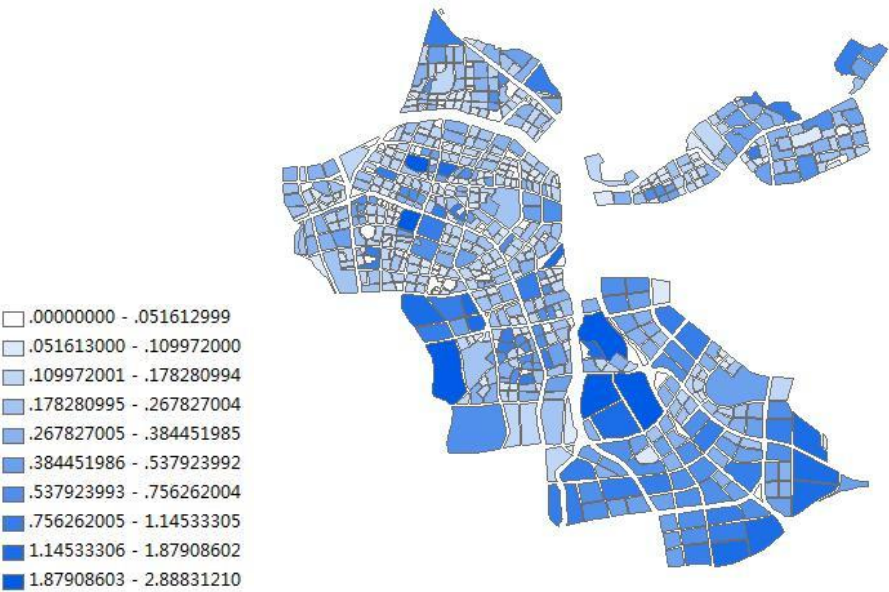


图 37 光明新区雨水图

表 4 光明新区污水量[1]

项目	数量	用水标准	用水量	指标	污水量
			万立方米/日		万立方米/日
居住	100 万人	150 升/人·日	15.00	100%	15.00
行政办公	477 公顷	120 立方米/公顷·日	5.72	100%	5.72
商业	344 公顷	150 立方米/公顷·日	5.16	100%	5.16
工业	1802 公 顷	80 立方米/公顷·日	14.42	95%	13.70
仓储	15 公顷	40 立方米/公顷·日	0.06	95%	0.06
绿地及道路广 场	2478 公 顷	25 立方米/公顷·日	6.20	0%	0.00
市政公用设施	234 公顷	50 立方米/公顷·日	1.17	70%	0.82

对外交通	13 公顷	25 立方米/公顷·日	0.03	70%	0.02
特殊用地	55 公顷	50 立方米/公顷·日	0.28	70%	0.20
其他用水量		上述用水量之和的 15%	7.20	70%	5.04
总计			55.24	/	45.72

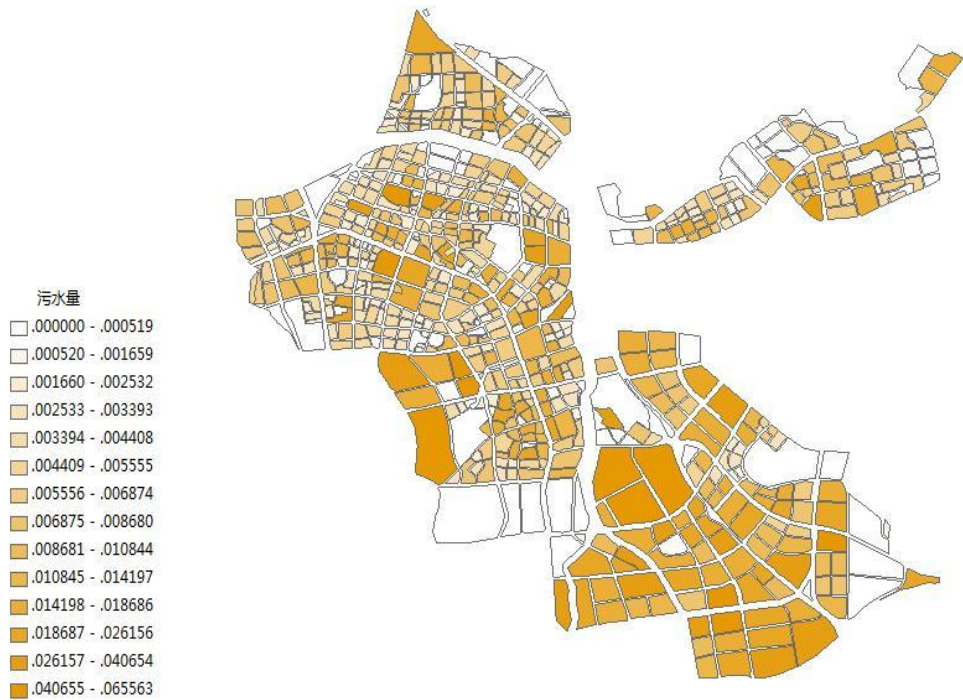


图 38 光明新区污水图

由于无法收集到光明片区已有管道及属性，通过第四章中提的施工费用与土地费用模型，可以计算出假设下的光明新区每个街区的施工费用，由于所用数据基于假设与随机，所以可能与实际费用产生较大误差。但在获得数据之后，可以利用数据重新进行计算，可以得到较为精确的施工费用。并利用所得费用数据与 ARCGIS 绘出工程费用图（图 39）。

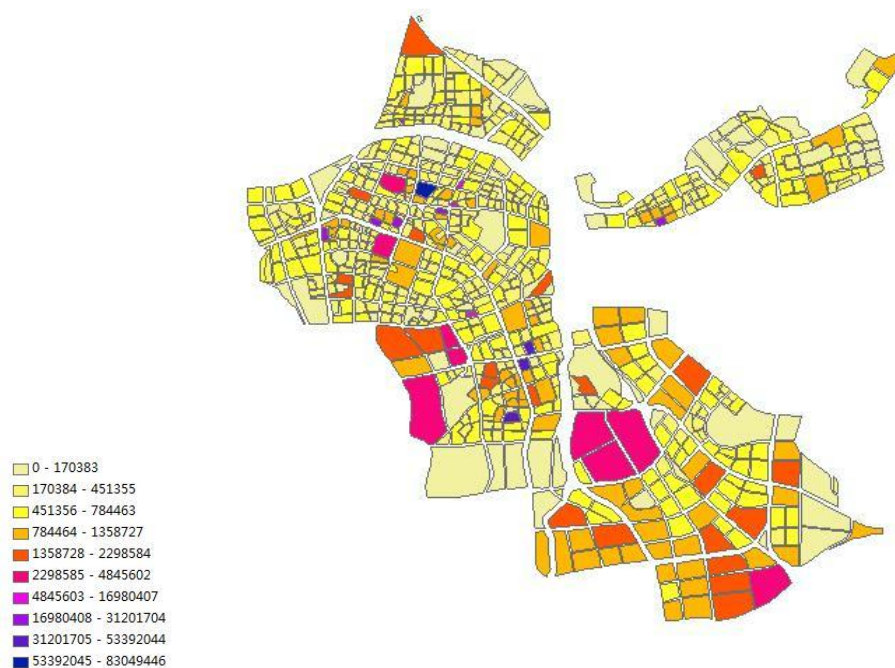


图 39 街区施工费用

5.4.2 排水方式规划方案

为了使方案存在差别，消除现实情况对最优方案的影响误差，选择与贪心算法计算得到的最优解相差 10%以内、且在环境约束条件下的解集。由于计算量较大，我们选择与已存在在解集中的解相差超过 20 个街区不同的方案作为新解加入解集，并不断寻找，直至找不到新解。



图 40 管网规划

以图 40 为例，图 40 为解集中的一种方案，其中 0 为合流制排水方式，1 为其他排水方式。为满足环境约束条件，大部分地区需选择分流制排水方式。

通过对解集中的方案进行评判模型中的指标分析，可以在多个方面讨论方案的优劣性，使对方案的评价更为全面、具体、准确。

表 5 方案指标对比

	plan1	plan25	plan56
谈判时间	3.37 年	3.17 年	3.09 年
错接导致污水流量	1.0003 立方米/s	0.9798 立方米/s	0.9784 立方米/s
花费	3.10 亿	3.24 亿	3.13 亿

可以有表 5 看到，不同的方案在不同的指标上表现良好，决策者可以根据自己的判断，决定偏重于哪一项指标，并找出最适合自己的方案。

5.5 SWMM 对方案进行仿真与可视化展示：

基于得到的最优方案其中的一种，利用 SWMM 进行仿真与可视化展示。首先需要进行区域划分与管网概化，选取深圳市光明新区，划分子汇水区域 713 个，2 节点 227 个，干管 241 条，子汇水区域内的管网排布不过多考虑，方案中雨污管道的策略采用节点是否补污水的方法进行模拟与仿真。模型概化如图 41.



图 41 光明区管网概化图

例如，选取 15min 为时间步长，展示效果如图 42,43,44.所示。至此，模型展示完成。
方案的评价通过可视化效果得到解释。

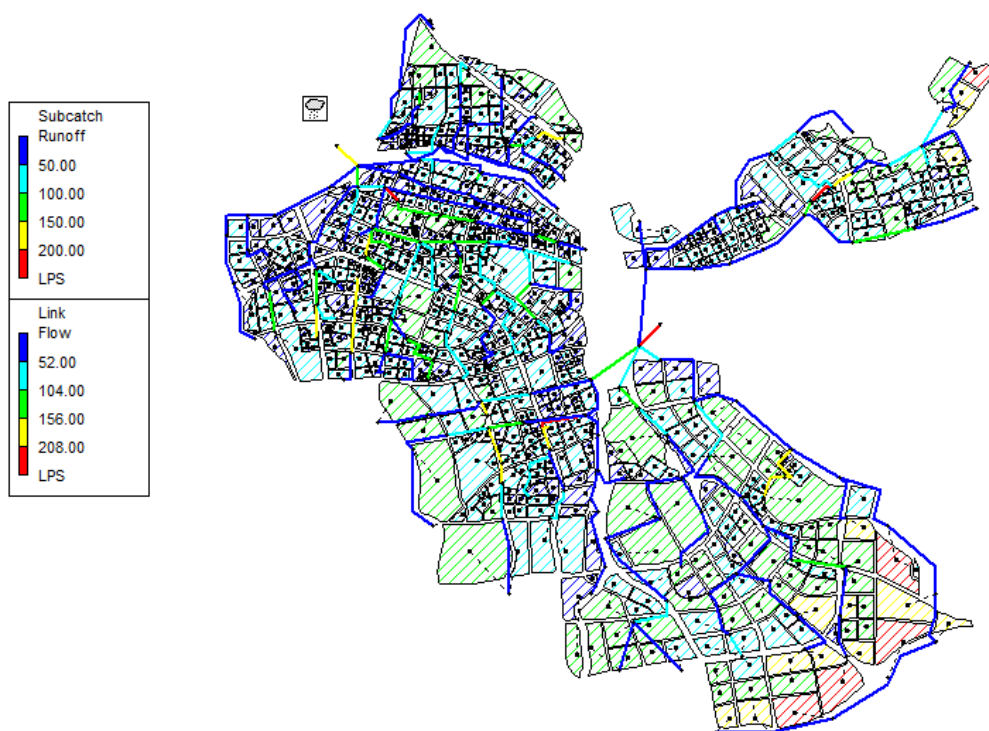


图 42 降雨初期

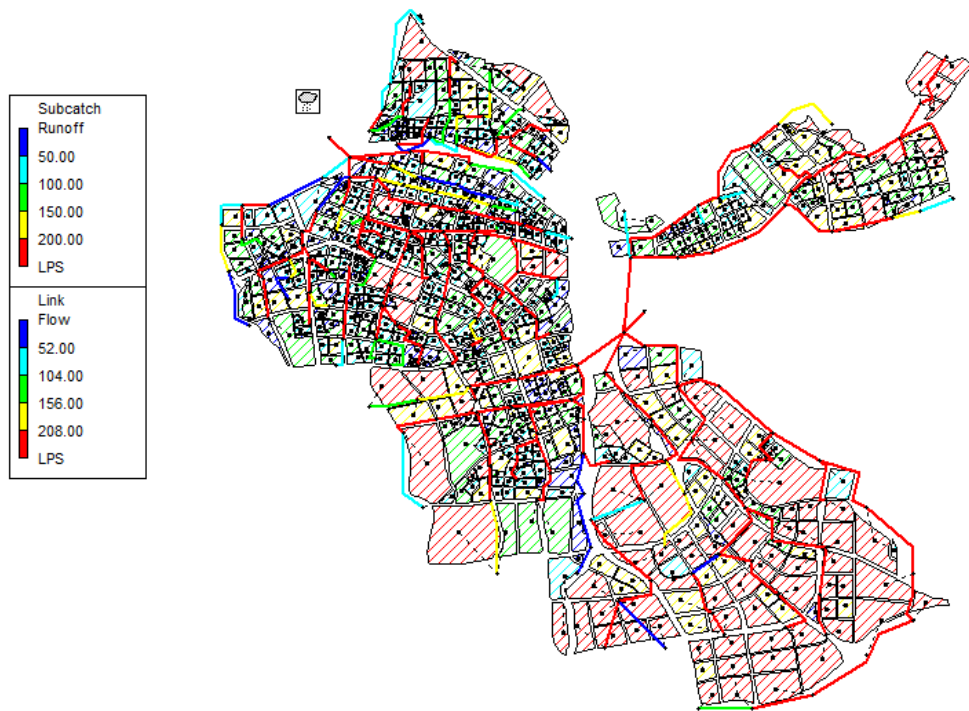


图 43 降雨中期

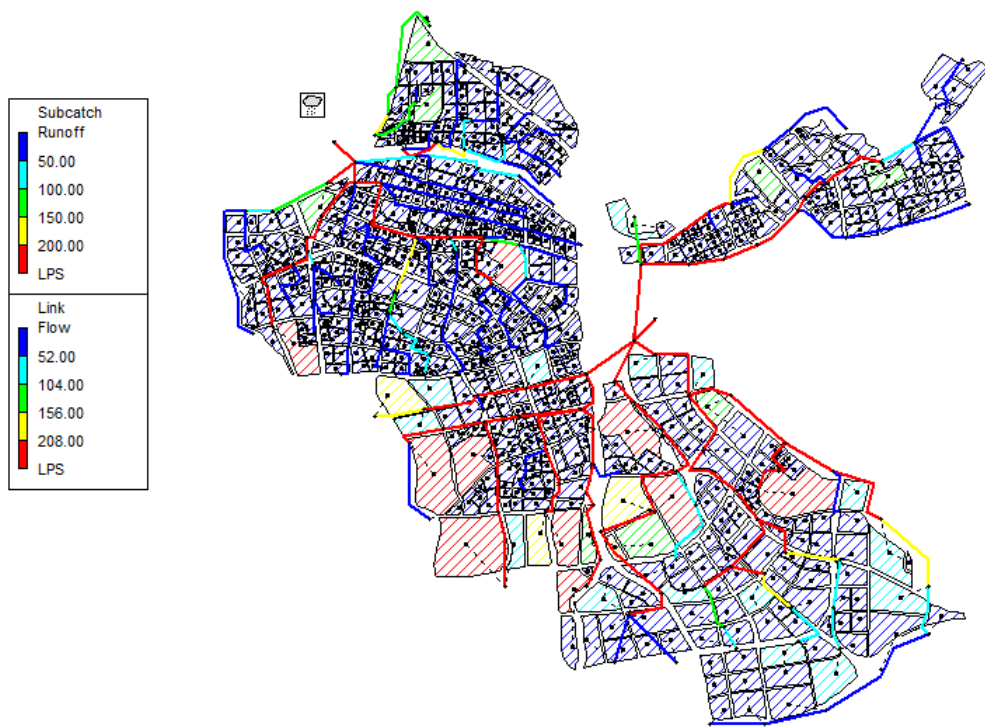


图 44 降雨后期

根据深圳市法定图则文件可以划分子汇水区域，绘制深圳市光明片区的干管管网概化图，概化 713 个子汇水区域，

第六章 模型的优缺点及展望

6.1 优点

1、较为全面的考虑了分混流对污水处理系统与海绵城市的影响，将影响进行分类讨论，并在不同影响之间的研究具有比较好的连贯性。利用控制变量法对分类后的影响因素进行了试验与模拟，准确具有说服力。

2、评判标准考虑了多方面影响“截排”与“清源”的因素，建立合理的数学模型，既避免了模糊分析导致的方案不明确，又防止方案主观性过强，更符合深圳地区现有排水管网实际情况。

3、在实际应用时，利用深圳市 DEM 信息获得深圳市光明新区高程地理信息，并利用 ARCGIS 对高程地理信息进行分析处理，得到较为准确的街区地理属性信息。将地理信息与道路、用地等信息相结合，对光明新区的汇水区域进行较为精确的划分。

4、在毛细支管管网排布不清楚时，实际地理、人文环境较为复杂，依然可以依靠模型进行经济概算，得到既能满足治污要求，又能达到经济最优的理想方案集。

5、规划模型在光明片区的应用上，得到的解集一方面可以降低由实际信息掌握不全面造成的稳定性误差，另一方面可以较快速的得到理想的方案。

6、利用 SWMM 对方案进行仿真，生动直观地得到实时水文、水力、水质分析。

6.2 缺点

1、由于数据收集困难，无法获得公开的深圳市清晰度较高的 DEM 数据与 SHP 文件，无法得到深圳市光明片区排水管网的具体信息，所以对光明片区的方案规划存在误差。无法进行实地实验获得水质信息，所以无法得到精确的光明片区环境约束条件。

2、用地类型的划分不够详细，导致同一用地类型同一阈值存在差异。

3、水力模型较为简单，在管道水力计算时，为简便计算，使用较为简单的均匀流公式，而没有采用复杂的运动波法。

4、未考虑蒸发、具体详细下渗等的影响。

6.3 展望

通过结合深圳市光明新区的具体情况，对深圳市光明片区茅洲河流域进行雨污排水方式的研究，并给出了一个最优的策略集，克服现有管道信息用地信息都不尽完善的现实条件下的困难，较好的解决了深圳市困扰已久的排水工程与水环境治理问题。算法方面，在传统树形动态规划、最优化的算法的基础上，开拓性的提出了少量变量强约束，大量变量指标化的规划思想，将结果做成可视化形式，实现完美模拟，利用数学领域窥探社会问题，具有高屋建瓴的姿态。

在研究的过程中由于技术和篇幅有限，也由于项目中搜集的实地属性比较匮乏，我们还有大量的未完成的探索工作没有体现在论文中，对于本课题的探索和研究依然没有终止。主要体现在以下的方面：

在确定汇水面积时，也就是模型的小区域的确定的时候，尽管用到了多种地理、交通、用地规划信息，可划分依然缺少量化指标，含有主观因素。在接下来的工作中，我们希望探索出合理的汇水区域划分标准，这将为我们的模型消除更少的误差。

区域内的汇水在计算的时候，努力避免汇水系数参数的使用，这样的经验模型存在较大误差，要以实地监测与理论分析相结合，区域内的汇水量计算更加科学，虽然现有 SWMM 模型可以利用设置地形的各种参数，但过于繁琐，尚没有简洁且有效的计算方法。

努力进行工程学研究，建设工程完成进度关于时间的函数关系，这样可以在一定时间内进行优化，防止特定时间内制订优化方案的主观性影响。

此外，我们给出的是基于 SWMM 模型的雨污管道模型的可视化效果，我们可以详细阅读源代码，基于源码二次开发出更加智能的城市规划处理系统。

“管道是一个城市的良心”，我们坚信，在科学的规划之下，深圳市的管道、河流以及整个城市排水系统都将有新的飞跃与发展，立于世界国际大都市的一流水平。

参考文献

- [1] 车伍等.中国城市合流制改造及溢流污染控制策略研究[J].给水排水,Vol.38,No.3,2012
- [2] 杨艳.美国排水系统污水溢流问题[J].中国环保产业.2004(11)
- [3] 杨雪等.国内外对合流制管道溢流污染的控制与管理[J].给水排水,Vol.24,No.16,Aug.2008
- [4] 汉京超.城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D].上海: 复旦大学环境科学与工程系.2013
- [5] 深圳市水务网: <http://www.szwrb.gov.cn/>
- [6] 曾贤桂等.深圳市分流制排水系统研究[J].工业安全与环保,Vol.30,No.10,2004
- [7] 曾思远等.深圳市排水管网系统管理现状、存在问题与对策研究[J].Vol.32,No.3,2010
- [8] GB50014-2006,室外排水设计规范(2014年版)[S]
- [9] 孙慧修.排水工程(上册)[M].第四版,中国建筑工业出版社,2000
- [10] 百度百科:
http://baike.baidu.com/link?url=MGdGXABusypW_l6D1FY2XbjX0Li0bU4zeqyk_4lVV5LQkWNGoKRB93SomH3ZB0VffHF_AhdQ1SFCVEB4-HlfiK
- [11] 百度百科:
http://baike.baidu.com/link?url=OpXM8PAWc3rVvwdnoOfcoLF1MjNgC_voYLzqlYHP0LA2igdlIIlBoKZPa_clBDugThOTZMaXEvSrXZzap8VxfK
- [12] 百度百科: http://baike.baidu.com/link?url=0X9djbISTEcGg8f2NyELUT3QVhveFkNUf-3i34dxLK7gN4aUJlc1ImDgmrsmhN9rLqf7oGtCnW5PRDTP2rBi_
- [13] 唐宁远等.城市雨洪控制利用的雨水径流系数分析[J].中国给水排水.Vol.25,No.22,Nov.2009
- [14] 原培胜.城镇污水处理厂运行成本分析[J].环境科学与管理.Vol.33,No.1,Jan.2008
- [15] 刘杰.城镇污水处理厂用地、运行及建设费用研究[J].环境工程学报.Vol.4,No.11,Nov.2010
- [16] 於方等.基于成本核算的城镇污水处理收费标准设计研究[J].中国环境科学.2011,31(9)
- [17] 车伍等.我国排水防涝及海面城市建设中若干问题分析[J]. 建设科技.2015(1):22-25

- [18] 杨阳, 林广思. 海绵城市概念与思想[J].南方建筑.2015(03):59-64
- [19]张乐.海绵城市理念在城市给排水建设中的应用[J].建筑工程技术与设计.2016(3)
- [20] 百度百科:
http://baike.baidu.com/link?url=hwAkNFpmzBCsEIS_-GvvCuUJhAtgft71GOP4wwDu4y_hz68soUCpXOJB69Gfu4K3hVn4LXugh7KHxe9eKRIRwa
- [21]陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 贺兵.雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J].中国给水排水.2013,29(04):4-7
- [22] 徐一茗.基于 SWMM 的巢湖市老城区合流制管道溢流污染的模拟研究[D].安徽建筑工业学院
- [23] 陈桥, 胡维平, 章建宁.城市地标污染物累积和降雨径流冲刷过程研究进展[J].长江流域资源与环境.2009,18(10):992-996
- [24] 刘翠云, 车伍, 董朝阳.分流制雨水与合流制雨水水质的比较[J].给水排水.2007,33(04):51-55
- [25] 贺锡泉.城市径流非点源污染运动波模型初探[J].上海环境科学.1990(8):12-15
- [26]张雅卓.城市河道综合整治研究及思考[J].水利发展研究.2009,9(6):32-37
- [27] 花金祥, 史文美, 周冉, 郑言峰.济宁城区河道生态补水分析[J].治淮.2013(12):30-31
- [28] 百度百科: http://baike.baidu.com/link?url=xf-yas2bMfDI0i4G2SwH_fi2fV94Euak2Bs1v4ITSpAxWk16B4CX1i3NTVoCKpOeLSXYTMRdwiSDBBaJDwZyPK
- [29] 百度百科:
[http://baike.baidu.com/link?url=BZnnVS7q3lD01fNXh_Av8U8OED2nnnGFYPmLmGEiOXu0Q1jPABd--e1mciWqB8CMY6fchl6TQi8PxP8rBOESqq#reference-\[1\]-1366239-wrap](http://baike.baidu.com/link?url=BZnnVS7q3lD01fNXh_Av8U8OED2nnnGFYPmLmGEiOXu0Q1jPABd--e1mciWqB8CMY6fchl6TQi8PxP8rBOESqq#reference-[1]-1366239-wrap)
- [30] 俞邵武等.深圳市光明新区雨洪利用目标及实施方法探讨[J].城市规划学刊,2010(7)
- [31] 彭溢等.茅洲河污染源分析及治理对策研究[J].广东化工,Vol.41,No.15,2014
- [32] 新浪: <http://news.sina.com.cn/o/2016-01-08/doc-ifxnkeru4766673.shtml>
- [33] 马立山等.利用 DEM 划分雨水汇水面积的方法研究[J].中国给水排水,Vol.27,No.15,Aug.2011
- [34] 黄平等.常用免费 DEM 数据质量分析[J].南水北调与水利科技,Vol.14,No.2,Apr.2016
- [35] 赵博华.基于 DEM 的流域特征提取方法研究进展[J].人民珠江,Vol.37,No.2,Feb.2016

- [36] 张靖.GIS 空间内插方法与应用研究[D].呼和浩特市：内蒙古师范大学地图学与地理信息系统.2008
- [37] 周玉文等.排水管网理论与计算[M].北京：中国建筑工业出版社,2000.
- [38] 周荣敏等.基于遗传算法的雨水管道系统优化设计[J].郑州大学学报：工业版,2003,24(4).
- [39] 张新波等.基于二叉树的雨水管网优化设计[J].天津大学学报,2007,Vol.40,No.9.

附录

1.颜色识别程序

```
clc;
clear;
Y=imread('photo/1.bmp');
imshow(Y);
R=Y(:,:,1);
G=Y(:,:,2);
B=Y(:,:,3);
[m,n]=size(R);
for i=1:m
    for j=1:n
        if (R(i,j)>180&&R(i,j)<240)&&(G(i,j)>150&&G(i,j)<200)&&(B(i,j)>110&&B(i,j)<165)
            A8(i,j)=1;
        else
            A8(i,j)=0;
        end
    end
end
A=medfilt2(A8);
se=strel('disk',5,4);
A8=imdilate(A,se);
A8=imfill(A8,'holes');
A8=bwareaopen(A8,500);
figure;imshow(A8);
R(~A8)=0;
G(~A8)=0;
B(~A8)=0;
A8=cat(3,R,G,B);
figure,imshow(A8);
```

2.求解流量与钢管的管径和坡度的关系

```
D1=linspace(0.50,0.90,100);
I1=linspace(0,0.01,100);
[D,I]=meshgrid(D1,I1);
R=0.67*D;
n=0.012;
v=(1/n)*R.^(2/3).*I.^(1/2);
h=0.7*D;
x1=(pi*D.^(2/4);
x2=D.^2/4.*acos((2*h-D)/D);
x3=h/2.*h.*sqrt(D.^2-(2*h-D).^2);
```



```

S=x1-x2+x3;
Q=S.*v-0.8;
surf(D,I,Q);

3.求解雨量对钢管参数的影响
D1=linspace(0.50,0.90,100);
I1=linspace(0,0.01,100);
[D,I]=meshgrid(D1,I1);
R=0.67*D;
n=0.012;
v=(1/n)*R.^(2/3).*I.^(1/2);
h=0.7*D;
x1=(pi*D.^2/4);
x2=D.^2/4.*acos((2*h-D)./D);
x3=h/2.*h.*sqrt(D.^2-(2.*h-D).^2);
S=x1-x2+x3;
Q=S.*v-0.8;
surf(D,I,Q);

```

4.污水处理厂成本计算

```

clc,clear;
r=50000:100:100000;
h=100000;
X=r+h;
Y=0.34.*X.^(6);
W=Y.*X;
G=W*0.98/0.46;
plot(r,G);
xlabel('ÓÊË@½øÁ÷Áç·ÍðÁç·½Ã×/Ï£©')
ylabel('ÛÜË@¹À³§ÔËÓ³Ë±¼£·Ô³/Ï£©')
grid ;

```

5. %得到方案解集

```

aimq= 182.9056;
N=713;
lamda=1.1;
bizhi=zeros(1,2*N);
use=zeros(1,2*N);
plan=zeros(500,2*N);
totalq=0;
totalj=0;
for i=1:1:N
    use(i)=i;
end
for i=1:1:N
    bizhi(i)=jiaqilai(i)/yushuiliang(i);

```

```

end
for i=2:1:N
    for j=1:1:i-1
        if bizhi(j)>bizhi(i)
            swap=use(j);
            use(j)=use(i);
            use(i)=swap;
            swap=bizhi(j);
            bizhi(j)=bizhi(i);
            bizhi(i)=swap;
        end
    end
end
end
for i=1:1:N
    totalq=totalq+yushuiliang(use(i));
    totalj=totalj+jiaqilai(use(i));
    plan(1,use(i))=1;
    if totalq>aimq
        break;
    end
end
end
Nk=i;
long=i;
chushilong=long;
leastmoney=totalj;
testmoney=leastmoney*lamda;
chushib=bizhi;
chushiu=use;
chutotalq=totalq;
chutotalj=totalj;
pl=2;
for tin=Nk-20:-20:mod(Nk,20)
    bizhi=chushib;
    use=chushiu;
    totalq=chutotalq;
    totalj=chutotalj;
    long=chushilong;
    for i=1:1:20
        totalq=totalq-yushuiliang(tin+i);
        totalj=totalj-jiaqilai(tin+i);
    end
end
for i=1:1:20
    bizhi(N+i)=bizhi(tin+i);
    use(N+i)=use(tin+i);
end

```

```

end
for i=1:1:20
    bizhi(tin+i)=[];
    use(tin+i)=[];
end
for i=1:1:long-20
    plan(pl,use(i))=1;
end
for i=long-19:1:N
    totalq=totalq+yushuiliang(use(i));
    totalj=totalj+jiaqilai(use(i));
    plan(pl,use(i))=1;
    if totalq>aimq
        break;
    end
end
pl=pl+1;
long=i;
if totalj>testmoney
    panduan(pl-1)=1;
    break;
end
while true
    for j=1:1:20
        totalq=totalq-yushuiliang(long-20+j);
        totalj=totalj-jiaqilai(long-20+j);
    end
    for j=1:1:20
        bizhi(N+j)=bizhi(long-20+j);
        use(N+j)=use(long-20+j);
    end
    for j=1:1:20
        bizhi(long-20+j)=[];
        use(long-20+j)=[];
    end
    for j=1:1:long-20
        plan(pl,use(j))=1;
    end
    for j=long-19:1:N
        totalq=totalq+yushuiliang(use(j));
        totalj=totalj+jiaqilai(use(j));
        plan(pl,use(j))=1;

        if totalq>aimq

```

```

        break;
    end
end
    pl=pl+1;
    if j<=20
        break;
    end
    if totalj>testmoney
        panduan(pl-1)=1;
        break;
    end
    long=j;
end
end
for i=714:1:1426
    if sum(plan(i,:))<500
        plan(i,:)=[];
    end
end
end

```

6. **function** smag=small(X,Y,Q)

% 小区域雨水管道造价

```

n=400;
d=((min(X,Y))/3)^2;
i=1;
bo=0;
FAILS=120;
fail=zeros(1,n);
x=zeros(1,n);
y=zeros(1,n);
while(i<n)
    a(i)=floor(rand()*X);
    b(i)=floor(rand()*Y);
    x(i)=a(i);
    y(i)=b(i);
    for s=1:i-1
        if ((a(i)-a(s))^2+(b(i)-b(s))^2<d)
            fail(i)=fail(i)+1;
            i=i-1;
            break;
        end
    end
    end
for p=1:1:n
    if(fail(p)>FAILS)

```

```

        bo=p;
        break;
    end;
end
if(bo>0)
    break;
end
i=i+1;
end
maxx=0;
minn=100000000000;
orii=0;
tag=0;
r=2^2*d;
flag=zeros(1,bo);
leftson=zeros(1,bo);
rightson=zeros(1,bo);
lstdis=zeros(1,bo);
rstdis=zeros(1,bo);
father=zeros(1,bo);
heap=zeros(1,bo+1);
for j=1:1:bo
    if x(j)>maxx
        tag=j;
        maxx=x(j);
    end
end
flag(tag)=1;
for k=1:1:bo
    if (flag(k)==0)
        lo=(x(tag)-x(k))^2+(y(tag)-y(k))^2;
        if lo<minn
            minn=lo;
            orii=k;
        end
    end
end
flag(orii)=1;
leftson(tag)=orii;
lstdis(tag)=sqrt(minn);
father(orii)=tag;
nod=orii;
head=2;
tail=3;

```

```

heap(1)=tag;
heap(head)=nod;
while true
    if head==tail
        break
    end
    mina=10000000000;minb=10000000000;oria=0;orib=0;
    for k=1:1:bo
        if (flag(k)==0)
            lo=(x(nod)-x(k))^2+(y(nod)-y(k))^2;
            if lo<minb
                if lo<mina
                    minb=mina;
                    orib=oria;
                    mina=lo;
                    oria=k;
                else
                    minb=lo;
                    orib=k;
                end
            end
        end
    end
    if mina<=r
        leftson(nod)=oria;
        flag(oria)=1;
        lsdis(nod)=sqrt(mina);
        father(oria)=nod;
        heap(tail)=oria;
        tail=tail+1;
    end
    if minb<=r
        flag(orib)=1;
        rightson(nod)=orib;
        rsdis(nod)=sqrt(minb);
        father(orib)=nod;
        heap(tail)=orib;
        tail=tail+1;
    end
    head=head+1;
    nod=heap(head);
end

minh=10;

```

```

maxh=50;
nk=0.012;
for i=1:1:bo
    q(i)=Q/bo;
    for h=1:1:maxh
        G(h,i)=1000000000000;
    end
end
for i=1:1:bo
    G(minh-1,i)=0;
end
le=0;ri=0;lji=0;rii=0;ld=0;rd=0;lld=0;rrd=0;gl=0;gr=0;
for i=1:1:bo
    if (rightson(heap(i))==0)&&(leftson(heap(i))==0)
        for h=minh:1:maxh
            G(h,heap(i))=0;
        end
    end
end
for i=bo:-1:1
    wher=heap(i);
    if (rightson(wher)~=0)||leftson(wher)~=0
        for h=minh+1:1:maxh
            for h1=minh:1:(h-1)
                for h2=minh:1:(h-1)
                    le=leftson(wher);
                    ri=rightson(wher);
                    if le~=0
                        lji=(h-h1)/(10*ldis(wher));
                        ld=(q(le)*nk*4^(5/3)/pi/lji^(1/2))^(3/7);
                        lld=floor(ld*10)/10+1;
                    end
                    gl=((52.07+76.491*lld^2.3489)+(0.3358+36.87*lld)*((h1+h)/20+lld)^3.0157)*ldis(wher);
                    if ri~=0
                        rii=(h-h2)/(100*rdis(wher));
                        rd=(q(ri)*nk*4^(5/3)/pi/rii^(1/2))^(3/7);
                        rrd=floor(rd*10)/10+1;
                    end
                    gr=((52.07+76.491*rrd^2.3489)+(0.3358+36.87*rrd)*((h2+h)/20+rrd)^3.0157)*rdis(wher);
                    if le==0
                        if (G(h,wher)>G(h2,ri)+gr)&&(G(h2,ri)+gr>0)&&(gr>0)
                            G(h,wher)=G(h2,ri)+gr;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    elseif ri==0
        if (G(h,wher)>G(h1,le)+gl)&&(G(h1,le)+gl>0)&&(gl>0)
            G(h,wher)=G(h1,le)+gl;
        end
    else
        if
            (G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr>0)&&(G(h,wher)>G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr)&&(gl>0)&&(gr>0)
                G(h,wher)=G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr;
            end
        end
    end
end
end
end
end
end
ming=10000000;
orih=0;
for h=1:1:maxh
    if G(h,heap(1))~=0
        if G(h,heap(1))<ming
            ming=G(h,heap(1));
            orih=h;
        end
    end
end
end
smag=ming;

```

7. **function** mulate(X,Y)

%管道连接无voronoi

```

n=400;
d=10000;
i=1;
FAILS=100;
fail=zeros(1,n);
bo=zeros(1,n);
x=zeros(1,n);
y=zeros(1,n);
while(i<n)
    a(i)=floor(rand()*X);
    b(i)=floor(rand()*Y);
    x(i)=a(i);
    y(i)=b(i);
    for s=1:i-1

```



```

        if ((a(i)-a(s))^2+(b(i)-b(s))^2<d)
            fail(i)=fail(i)+1;
            i=i-1;
            break;
        end
    end
end
for p=1:1:n
    if(fail(p)>FAILS)
        bo=p;
        break;
    end;
end
if(bo>0)
    break;
end
i=i+1;
end
%voronoi(x(1:1:bo),y(1:1:bo));
axis equal;
axis([0 X 0 Y]);
hold on;
maxx=0;
minn=100000000000;
orii=0;
tag=0;
r=160^2;
flag=zeros(1,bo);
leftson=zeros(1,bo);
rightson=zeros(1,bo);
lstdis=zeros(1,bo);
rstdis=zeros(1,bo);
father=zeros(1,bo);
heap=zeros(1,bo+1);
for j=1:1:bo
    if x(j)>maxx
        tag=j;
        maxx=x(j);
    end
end
end
flag(tag)=1;
for k=1:1:bo
    if (flag(k)==0)
        lo=(x(tag)-x(k))^2+(y(tag)-y(k))^2;
        if lo<minn

```

```

                minn=lo;
                orii=k;
            end
        end
    end
    flag(orii)=1;
    leftson(tag)=orii;
    lsdís(tag)=sqrt(minn);
    father(orii)=tag;
    nod=orii;
    head=2;
    tail=3;
    heap(1)=tag;
    heap(head)=nod;
    while true
        if head==tail
            break
        end
        mina=10000000000;minb=100000000000;oria=0;orib=0;
        for k=1:1:bo
            if (flag(k)==0)
                lo=(x(nod)-x(k))^2+(y(nod)-y(k))^2;
                if lo<minb
                    if lo<mina
                        minb=mina;
                        orib=oria;
                        mina=lo;
                        oria=k;
                    else
                        minb=lo;
                        orib=k;
                    end
                end
            end
        end
        if mina<=r
            leftson(nod)=oria;
            flag(oria)=1;
            lsdís(nod)=sqrt(mina);
            father(oria)=nod;
            heap(tail)=oria;
            tail=tail+1;
        end
        if minb<=r

```

```

        flag(orib)=1;
        rightson(nod)=orib;
        rsdis(nod)=sqrt(minb);
        father(orib)=nod;
        heap(tail)=orib;
        tail=tail+1;
    end
    head=head+1;
    nod=heap(head);
end
for ij=1:1:tail-1
    if leftson(ij)~=0
        plot([x(ij),x(leftson(ij))],[y(ij),y(leftson(ij))],'-r');
        hold on;
    end
    if rightson(ij)~=0
        plot([x(ij),x(rightson(ij))],[y(ij),y(rightson(ij))],'-r');
        hold on;
    end
end
end
plot(x(heap(1)),y(heap(1)),'o');

```

8. function simulate(X,Y)

% voronoi图和管道连接

```

n=400;
d=10000;
i=1;
FAILS=100;
fail=zeros(1,n);
bo=zeros(1,n);
x=zeros(1,n);
y=zeros(1,n);
while(i<n)
    a(i)=floor(rand()*X);
    b(i)=floor(rand()*Y);
    x(i)=a(i);
    y(i)=b(i);
    for s=1:1:i-1
        if ((a(i)-a(s))^2+(b(i)-b(s))^2<d)
            fail(i)=fail(i)+1;
            i=i-1;
            break;
        end
    end
end
end

```

```

for p=1:1:n
    if(fail(p)>FAILS)
        bo=p;
        break;
    end;
end
if(bo>0)
    break;
end
i=i+1;
end
voronoi(x(1:1:bo),y(1:1:bo));
axis equal;
axis([0 X 0 Y]);
hold on;
maxx=0;
minn=100000000000;
orii=0;
tag=0;
r=170^2;
flag=zeros(1,bo);
leftson=zeros(1,bo);
rightson=zeros(1,bo);
lstdis=zeros(1,bo);
rstdis=zeros(1,bo);
father=zeros(1,bo);
heap=zeros(1,bo+1);
for j=1:1:bo
    if x(j)>maxx
        tag=j;
        maxx=x(j);
    end
end
flag(tag)=1;
for k=1:1:bo
    if (flag(k)==0)
        lo=(x(tag)-x(k))^2+(y(tag)-y(k))^2;
        if lo<minn
            minn=lo;
            orii=k;
        end
    end
end
flag(orii)=1;

```

```

leftson(tag)=orii;
lsdis(tag)=sqrt(minn);
father(orii)=tag;
nod=orii;
head=2;
tail=3;
heap(1)=tag;
heap(head)=nod;
while true
    if head==tail
        break
    end
    mina=10000000000;minb=10000000000;oria=0;orib=0;
    for k=1:1:bo
        if (flag(k)==0)
            lo=(x(nod)-x(k))^2+(y(nod)-y(k))^2;
            if lo<minb
                if lo<mina
                    minb=mina;
                    orib=oria;
                    mina=lo;
                    oria=k;
                else
                    minb=lo;
                    orib=k;
                end
            end
        end
    end
    if mina<=r
        leftson(nod)=oria;
        flag(oria)=1;
        lsdis(nod)=sqrt(mina);
        father(oria)=nod;
        heap(tail)=oria;
        tail=tail+1;
    end
    if minb<=r
        flag(orib)=1;
        rightson(nod)=orib;
        rsdis(nod)=sqrt(minb);
        father(orib)=nod;
        heap(tail)=orib;
        tail=tail+1;
    end
end

```

```

end
head=head+1;
nod=heap(head);
end
for ij=1:1:tail-1
    if leftson(ij)~=0
        plot([x(ij),x(leftson(ij))],[y(ij),y(leftson(ij))], '-r');
        hold on;
    end
    if rightson(ij)~=0
        plot([x(ij),x(rightson(ij))],[y(ij),y(rightson(ij))], '-r');
        hold on;
    end
end
end
plot(x(heap(1)),y(heap(1)),'o');

```

9. %批量得出造价

```

wujia=zeros(1,713);
yujia=zeros(1,713);
jiaqilai=zeros(1,713);
for numb=1:1:713
    xx=(area(numb)/0.618)^0.5*100;
    yy=(area(numb)*0.618)^0.5*100;
    if wushuiliang(numb)~=0
        if min(xx,yy)<200
            wujia(numb)=small2(xx,yy,wushuiliang(numb));
        else
            wujia(numb)=dirtony(xx,yy,wushuiliang(numb));
        end
    end
    if (yongdi(numb)==7)
        if min(xx,yy)<200
            yujia(numb)=small(xx,yy,yushuiliang(numb));
        else
            yujia(numb)=money(xx,yy,yushuiliang(numb));
        end
    end
    jiaqilai(numb)=wujia(numb)+yujia(numb);
end

```

10.%买地费用求解计算

```

maidi=zeros(1,713);
for numb=1:1:713
    if yongdi(numb)==10
        maidi(numb)=area(numb)*10000*1000*0.9;
    end
end

```

```

        jiaqilai(numb)=jiaqilai(numb)+maidi(numb);
    end
end
11. function allg=money(X,Y,Q)
%较大区域管道造价计算
n=400;
d=10000;
i=1;
bo=0;
FAILS=120;
fail=zeros(1,n);
x=zeros(1,n);
y=zeros(1,n);
while(i<n)
    a(i)=floor(rand()*X);
    b(i)=floor(rand()*Y);
    x(i)=a(i);
    y(i)=b(i);
    for s=1:i-1
        if ((a(i)-a(s))^2+(b(i)-b(s))^2<d)
            fail(i)=fail(i)+1;
            i=i-1;
            break;
        end
    end
end
for p=1:1:n
    if(fail(p)>FAILS)
        bo=p;
        break;
    end;
end
if(bo>0)
    break;
end
i=i+1;
end
maxx=0;
minn=1000000000000;
orii=0;
tag=0;
r=200^2;
flag=zeros(1,bo);
leftson=zeros(1,bo);
rightson=zeros(1,bo);

```

```

lsdis=zeros(1,bo);
rsdis=zeros(1,bo);
father=zeros(1,bo);
heap=zeros(1,bo+1);
for j=1:1:bo
    if x(j)>maxx
        tag=j;
        maxx=x(j);
    end
end
flag(tag)=1;
for k=1:1:bo
    if (flag(k)==0)
        lo=(x(tag)-x(k))^2+(y(tag)-y(k))^2;
        if lo<minn
            minn=lo;
            orii=k;
        end
    end
end
flag(orii)=1;
leftson(tag)=orii;
lsdis(tag)=sqrt(minn);
father(orii)=tag;
nod=orii;
head=2;
tail=3;
heap(1)=tag;
heap(head)=nod;
while true
    if head==tail
        break
    end
    mina=10000000000;minb=100000000000;oria=0;orib=0;
    for k=1:1:bo
        if (flag(k)==0)
            lo=(x(nod)-x(k))^2+(y(nod)-y(k))^2;
            if lo<minb
                if lo<mina
                    minb=mina;
                    orib=oria;
                    mina=lo;
                    oria=k;
                else

```



```

        minb=lo;
        orib=k;
    end
end
end
end
    if mina<=r
        leftson(nod)=oria;
        flag(oria)=1;
        lsdis(nod)=sqrt(mina);
        father(oria)=nod;
        heap(tail)=oria;
        tail=tail+1;
    end
    if minb<=r
        flag(orib)=1;
        rightson(nod)=orib;
        rsdis(nod)=sqrt(minb);
        father(orib)=nod;
        heap(tail)=orib;
        tail=tail+1;
    end
    head=head+1;
    nod=heap(head);
end

minh=10;
maxh=50;
nk=0.012;
for i=1:1:bo
    q(i)=Q/bo;
    for h=1:1:maxh
        G(h,i)=1000000000000;
    end
end
for i=1:1:bo
    G(minh-1,i)=0;
end
le=0;ri=0;lri=0;rii=0;ld=0;rd=0;lld=0;rrd=0;gl=0;gr=0;
for i=1:1:bo
    if (rightson(heap(i))==0)&&(leftson(heap(i))==0)
        for h=minh:1:maxh
            G(h,heap(i))=0;
        end
    end
end

```

```

end
end
for i=bo:-1:1
    wher=heap(i);
    if (rightson(wher)~=0)||leftson(wher)~=0
        for h=minh+1:1:maxh
            for h1=minh:1:(h-1)
                for h2=minh:1:(h-1)
                    le=leftson(wher);
                    ri=rightson(wher);
                    if le~=0
                        lii=(h-h1)/(10*lsdis(wher));
                        ld=(q(le)*nk*4^(5/3)/pi/lii^(1/2))^(3/7);
                        lld=floor(ld*10)/10+1;

gl=((52.07+76.491*lld^2.3489)+(0.3358+36.87*lld)*((h1+h)/20+lld)^3.0157)*lsdis(wher);

                    end
                    if ri~=0
                        rii=(h-h2)/(100*rsdis(wher));
                        rd=(q(ri)*nk*4^(5/3)/pi/rii^(1/2))^(3/7);
                        rrd=floor(rd*10)/10+1;

gr=((52.07+76.491*rrd^2.3489)+(0.3358+36.87*rrd)*((h2+h)/20+rrd)^3.0157)*rsdis(wher);

                    end
                    if le==0
                        if (G(h,wher)>G(h2,ri)+gr)&&(G(h2,ri)+gr>0)&&(gr>0)
                            G(h,wher)=G(h2,ri)+gr;
                        end
                    elseif ri==0
                        if (G(h,wher)>G(h1,le)+gl)&&(G(h1,le)+gl>0)&&(gl>0)
                            G(h,wher)=G(h1,le)+gl;
                        end
                    else
                        if
(G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr>0)&&(G(h,wher)>G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr)&&(gl>0)&&(gr>0)
                            G(h,wher)=G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
ming=10000000;

```

```

orih=0;
for h=1:1:maxh
    if G(h,heap(1))~=0
        if G(h,heap(1))<ming
            ming=G(h,heap(1));
            orih=h;
        end
    end
end
allg=ming;

```

```

12. function allg=dirtony(X,Y,Q)
%大区域管道计算
n=400;
d=10000;
i=1;
bo=0;
FAILS=120;
fail=zeros(1,n);
x=zeros(1,n);
y=zeros(1,n);
while(i<n)
    a(i)=floor(rand()*X);
    b(i)=floor(rand()*Y);
    x(i)=a(i);
    y(i)=b(i);
    for s=1:1:i-1
        if ((a(i)-a(s))^2+(b(i)-b(s))^2<d)
            fail(i)=fail(i)+1;
            i=i-1;
            break;
        end
    end
end
for p=1:1:n
    if(fail(p)>FAILS)
        bo=p;
        break;
    end;
end
if(bo>0)
    break;
end
i=i+1;
end

```

```

maxx=0;
minn=100000000000;
orii=0;
tag=0;
r=220^2;
flag=zeros(1,bo);
leftson=zeros(1,bo);
rightson=zeros(1,bo);
lstdis=zeros(1,bo);
rstdis=zeros(1,bo);
father=zeros(1,bo);
heap=zeros(1,bo+1);
for j=1:1:bo
    if x(j)>maxx
        tag=j;
        maxx=x(j);
    end
end
flag(tag)=1;
for k=1:1:bo
    if (flag(k)==0)
        lo=(x(tag)-x(k))^2+(y(tag)-y(k))^2;
        if lo<minn
            minn=lo;
            orii=k;
        end
    end
end
flag(orii)=1;
leftson(tag)=orii;
lstdis(tag)=sqrt(minn);
father(orii)=tag;
nod=orii;
head=2;
tail=3;
heap(1)=tag;
heap(head)=nod;
while true
    if head==tail
        break
    end
    mina=100000000000;minb=100000000000;oria=0;orib=0;
    for k=1:1:bo
        if (flag(k)==0)

```

```

        lo=(x(nod)-x(k))^2+(y(nod)-y(k))^2;
        if lo<minb
            if lo<mina
                minb=mina;
                orib=oria;
                mina=lo;
                oria=k;
            else
                minb=lo;
                orib=k;
            end
        end
    end
end
end
if mina<=r
    leftson(nod)=oria;
    flag(oria)=1;
    lsdisk(nod)=sqrt(mina);
    father(oria)=nod;
    heap(tail)=oria;
    tail=tail+1;
end
if minb<=r
    flag(orib)=1;
    rightson(nod)=orib;
    rsdisk(nod)=sqrt(minb);
    father(orib)=nod;
    heap(tail)=orib;
    tail=tail+1;
end
head=head+1;
nod=heap(head);
end

minh=10;
maxh=50;
nk=0.012;
for i=1:1:bo
    q(i)=Q/(bo*0.6881);
    for h=1:1:maxh
        G(h,i)=1000000000000;
    end
end
end
for i=1:1:bo

```

```

        G(minh-1,i)=0;
    end
    le=0;ri=0;lil=0;rii=0;ld=0;rd=0;lld=0;rrd=0;gl=0;gr=0;
    for i=1:1:bo
        if (rightson(heap(i))==0)&&(leftson(heap(i))==0)
            for h=minh:1:maxh
                G(h,heap(i))=0;
            end
        end
    end
    for i=bo:-1:1
        wher=heap(i);
        if (rightson(wher)~=0)||leftson(wher)~=0
            for h=minh+1:1:maxh
                for h1=minh:1:(h-1)
                    for h2=minh:1:(h-1)
                        le=leftson(wher);
                        ri=rightson(wher);
                        if le~=0
                            lil=(h-h1)/(10*ldis(wher));
                            ld=(q(le)*nk*4^(5/3)/pi/lil^(1/2))^(3/7);
                            lld=floor(ld*10)/10+1;

gl=((52.07+76.491*lld^2.3489)+(0.3358+36.87*lld)*((h1+h)/20+lld)^3.0157)*ldis(wher);
                        end
                        if ri~=0
                            rii=(h-h2)/(100*rdis(wher));
                            rd=(q(ri)*nk*4^(5/3)/pi/rii^(1/2))^(3/7);
                            rrd=floor(rd*10)/10+1;

gr=((52.07+76.491*rrd^2.3489)+(0.3358+36.87*rrd)*((h2+h)/20+rrd)^3.0157)*rdis(wher);
                        end
                        if le==0
                            if (G(h,wher)>G(h2,ri)+gr)&&(G(h2,ri)+gr>0)&&(gr>0)
                                G(h,wher)=G(h2,ri)+gr;
                            end
                        elseif ri==0
                            if (G(h,wher)>G(h1,le)+gl)&&(G(h1,le)+gl>0)&&(gl>0)
                                G(h,wher)=G(h1,le)+gl;
                            end
                        else
                            if
                                (G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr>0)&&(G(h,wher)>G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr)&&(gl>0)&&(gr>0)
                                    G(h,wher)=G(h1,le)+G(h2,ri)+gl+gr;
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
    ming=10000000;
    orih=0;
    for h=1:1:maxh
        if G(h,heap(1))~=0
            if G(h,heap(1))<ming
                ming=G(h,heap(1));
                orih=h;
            end
        end
    end
    end
    allg=ming;

```