

“截排” “清源” 下深圳污水治理方案的构建

摘 要

本文主要研究如何治理深圳市的污水状况。首先收集治污指标，通过非线性加权综合评价的方法，构建深圳治水提质工程数学模型，量化分析出了雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响。然后通过线性规划模型给出了在达到治污要求、开支最低的情况下，实施“截排”“清源”的判定条件。最后提出了光明片区治污方案，并进行了可达性分析。

针对问题一：为了量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统，首先选取污水处理投入、水质达标率和污水截污率为关键指标，通过非线性加权综合评价构建模型进行量化，得到了三种污水收集机制对污水处理系统的促进影响度，从大到小分别是分流、合流、混流。在量化分析“分流”与“混流”收集机制对海绵城市建设的影响时，以水质达标率、管道溢流量和年径流总量控制率为关键指标，通过模型得到了分流影响度更大，更适合海绵城市的建设。

针对问题二：为了能够能达到治污要求的情况下，又能尽量节省开支的原则下，给出区域治污时实施“清源”、“截排”措施的判定条件。考虑了河流的自净能力，以污水能够达到的治污要求为约束条件，实施“清源”、“截排”措施的费用为目标函数建立治污规划模型，最后以光明新区污水治理为例，求解出了当前光明新区实施“清源”污水处理机制较为合理。

针对问题三：为了提出深圳市污水治理方案，选定光明新区进行研究，给出了污水治理和海绵城市建设方案。对于茅洲河的污水治理，考虑了河流的自净化能力，给出每年的茅洲河污水治理量如表 10 所示。对于通过海绵城市建设来整治城市内涝问题，提出了光明新区内涝问题建议方案如表 14 所示。最后利用一维水质方程和小区海绵城市建设进行合理性分析，验证了提出的治污方案的可行性。

关键词： 污水治理 综合评价 线性规划 清源截排

一、问题重述

1.1 背景分析

近年来,我国连续多日强降雨天气频繁出现,很多城市都遭受过强降雨袭击。受江河湖库水位暴涨影响,有些地区积水严重,出现百余处被淹,交通瘫痪,给人们的生活和出行带来了极大的不便。如何对水环境进行处理逐渐引起了人们的思考。

水环境问题对于快速发展的深圳市的环境影响也是日益严峻的。城区河流不同程度的污染、管道的乱接以及雨量过大时会使污水处理厂超负荷运行而造成污水溢出等等问题,不仅仅直接影响到了深圳市的生态环境,而且会影响到人们的日常生活。因此对污水处理系统进行研究分析尤为重要。

1.2 有关问题的提出与重述

导致深圳建成区水体黑臭的原因是污水直排入河、海。具体表现是,原本按“雨污分流”设计的城市污水收集、处理系统,由于建设及管理上的问题,相当面积的建成区排水管网实际处于“雨污混流”状态,致使相当数量的污水进入雨水管网后未经处理就直接排入了河流、海洋。深圳市采取的治理措施主要有“截排”和“清源”两种。

所谓“截排”措施,是于治理区域的排水管网末端建设拦截管道或箱涵,将雨、污混合水收集起来送至污水厂处理。

所谓“清源”措施,则是力图从源头起建立“雨污分流”排污机制,在治理区域内以两套管网分别收集污水和雨水,让污水经污水管进入污水厂处理,让雨水经排洪口直接进入河道,使城市处于一种理想的污水治理状态。

深圳面对相当一段时间内排水管网将处于雨污“分流”与“混流”共存的状态,在实际治污工作中往往需根据具体情况同时实施“截排”和“清源”两种治理方案。

为了更好的处理以上问题需要搜集相关数据,尝试构建深圳治水提质工程数学模型。

本文提出以下问题:

(1) 量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响。

(2) 在既能达到治污要求,又能尽量节省开支的原则下,试给出区域治污时实施“清源”、“截排”措施的判定条件。

(3) 请选定深圳一区域给出你的污水治理建议方案,并基于政府治污的“一、三、五、八年目标”,进行合理性(包括可操作性方面)评估。

二、问题分析

随着经济的快速发展，人们的生活水平不断提高，环境问题越来越受到社会的关注，如何治理污水和解决城市内涝问题成为了社会棘手的问题。本文主要以深圳为例，对问题进行了详细的分析。

2.1 问题 1 的分析

问题一要求构建深圳治水提质工程数学模型，量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响。考虑通过搜集相关性指标，再结合深圳市的实际情况，考虑从经济角度、治污效果角度进行选取指标。然后通过非线性加权综合评价模型进行整合，以此量化分析‘分流’‘混流’两种收集机制对不同指标的影响程度。

2.2 问题 2 的分析

问题二要求在治污要求符合标准的情况下使得所花费用最少，因此可以考虑从线性规划问题进行分析，以治污要求为约束条件，以实施清源、截排措施所需要的费用为目标，建立线性规划模型进行分析。最后根据清源、截排两种治污措施所花费的费用进行比较，以此给出区域治污时实施清源、截排措施的判定条件。

2.3 问题 3 的分析

问题三要求选定深圳一区域给出污水治理建议方案，并基于政府治污的“一、三、五、八年目标”，进行合理性（包括可操作性方面）评估。政府治污的“一、三、五、八年目标”以流域为治理范围，由于光明新区属于茅洲河流域，考虑先给出茅洲河的污水治理方案，完成茅洲河水质达标的目标。然后考虑从海绵城市建设角度出发，去思考光明新区内涝问题的解决方案。最后考虑对茅洲河流域进行水质评测和选定光明新区某小区海绵城市建设进行分析，从而对所提方案进行可行性分析。

三、模型假设

- 1、假设各排污口排出的污水量和污水的污染浓度一定。
- 2、假设在修建管道时所用的管道材料相同。
- 3、假设污水处理的技术、设备及能耗投入可以以资金投入计算。
- 4、假设国家的污染控制标准可以取其主要的一项，以污染浓度来表示。
- 5、假设污水处理厂的人工费、办公费、培训费、保险费等费用相对于总费用可以忽略不计。

四、符号定义

F_i	表示污水处理投入的费用
d_a	表示水质达标率
S_c	表示污染源浓度
J	表示污水截污率
b_l	表示年径流总量控制率
T_{g1}	表示清源雨水管网铺设所需费用
T_{g2}	表示清源污水管网铺设所需费用
T_{g3}	表示清源整治管网建设所需费用
T_g	表示清源铺设管网总费用
T_j	表示截排管道或箱涵建设总费用
T_k	表示污水进入江水混合以后浓度
T'_k	表示生活污水量总变化系数
η	表示污染物负荷消减率
Z_1	表示实施清源措施下的总费用
Z_2	表示实施截排措施下的总费用
Γ	表示决策函数

五、模型的建立与求解

本文主要研究的是深圳污水治理和内涝问题，问题要求构建深圳治水提质工程数学模型，量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响，在达到治污要求的情况下，开支最低的原则下，给出区域治污时实施“清源”、“截排”措施的判定条件。并选定一区域给出污水治理建议方案，并基于政府治污的“一、三、五、八年目标”，进行合理性评估。

5.1 量化分析收集机制对污水处理系统和海绵城市建设的影响

为了更好的对问题进行求解，首先需要先建立合理的指标之后，再量化分析收集机制对污水处理系统和海绵城市建设的影响。

5.1.1 合理指标的选择

根据我国污水处理、给出排水等等一系列资料，进行综合考虑，结合深圳市水环境实际情况深度分析，特选定三个关键指标量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统的影响，它们分别是污水处理投入、水质达标率和污水截污率；选定水质达标率、管道溢流量和年径流总量控制率量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对海绵城市建设的影响。

(1) 污水处理投入

关于污水处理投入需根据污水处理量的多少和每吨污水处理的费用共同决定。由于污水的收集机制有三种形式，分别为分流、合流以及混流。下面给出三种收集机制的污水处理量公式。

分流收集机制是指将雨水和污水分开，各用一条管道输送，进行排放或后续处理的排污方式，定义：

$$Y_1 = x_1$$

其中 Y_1 表示分流收集机制所收集的污水量， x_1 表示日常污水进入污水管道的污水量。

合流收集机制是指雨水和污水同时用一条管道进行输送，进行后续处理后再进行排放的排污方式，定义：

$$Y_2 = x_1 + x_2$$

其中 Y_2 表示合流收集机制所收集的污水量, x_2 表示雨水进入污水管道的雨水量。

混流收集机制是指在完全分流制的基础上, 由于不规范的用水习惯, 而产生的一种收集机制。例如洗车的污水通过了雨水口排放, 放阳台的洗衣机脏水接入了雨水口, 所以导致雨水管道里含有生活污水。而实际操作中, 只收集了污水管道中的污水, 至于雨水管则排进了江海、湖泊。因此定义:

$$Y_3 = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2$$

其中 Y_3 表示混流收集机制所收集的污水量, α_1 表示日常污水进入污水管道的污水量的参数, α_2 表示雨水进入污水管道的污水量的参数。

所以:

$$F_i = fY_i \quad (i=1,2,3)$$

其中 F 表示污水处理投入的费用, f 表示每吨污水处理的费用, i 表示不同的收集机制。

(2) 水质达标率

关于水质达标率这一指标, 为了量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响, 首先建立动态水质方程, 来计算河流中的水质达标率。

对于一般的河流而言, 一般采用一维非恒定潮流和水质模型来描述污染物可迁移转化过程, 并用于水环境容量的计算。

模型的控制方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= Y_i \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(uQ)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \frac{\partial Q}{\partial x}) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{gn^2 Q |Q|}{AE^{4/3}} &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + KC &= S_c \\ d_a &= \frac{d_1}{d_2} \times 100\% \end{aligned}$$

其中, x 表示沿河道中泓线的坐标, u 表示河道断面平均流速, Q 表示河道流量, Y_i 表示区间入流量, A 表示过水断面面积, Z 表示河流水位, g 表示重力加速度, ε 表示水体有效粘滞系数, n 表示河道糙率。

R 表示河道水力半径, C 表示污染物 (如 COD_{cr} , BOD_5 , NH_3-H 等) 的断面平均浓度, D_x 表示纵向弥散系数, K 表示污染物降解系数, S_c 表示污染源强度, d_a 表示水质达标率, d_1 表示达标的指标数, d_2 表示设定的指标总数。

(3) 污水截污率

污水截污率为污水处理量与城市污水生产总量的比值, 本文通过参考给水排水设计手册, 从而综合考虑城市人口、城市生活污水量定额、工业废水等来确定城市污水生产总量。

A) 居民生活污水流量

居民生活污水主要来自居住区, 它通常按下式计算:

$$Q_1 = \frac{n_1 \cdot N \cdot K_2}{24 \times 3600}$$

式中: Q_1 表示居民生活污水设计流量, n_1 表示居民生活污水量定额, N 表示设计人口数, K_2 表示生活污水量总变化系数。

其中:

$$N = \rho \cdot F_1$$

式中: ρ 表示人口密度, F_1 表示居住区面积。

B) 工业企业工业废水流量

工业企业工业废水设计流量计算公式可表示为:

$$Q_2 = \frac{mMK_g}{3600T_1}$$

式中: m 表示生产过程中单位产品的废水量定额, M 表示每日的产品数量, K_g 表示总变化系数, T_1 表示工业企业每日工作小时数。

C) 工业企业生活污水流量

工业企业生活污水设计流量计算公式可表示为:

$$Q_3 = \frac{q_1 N_1 K_2 + q_2 N_2 K_2}{3600 T_2}$$

式中: Q_3 表示工业企业生活污水流量, q_1 一般车间每班每人污水量定额, q_2 表示热车间每班每人污水量定额, N_1 表示一般车间最大班工人数, N_2 表示热车间最大班工人数, T_2 表示每班工作小时数。

D) 工业企业淋浴用水量

工业企业淋浴用水设计流量计算公式可表示为:

$$Q_4 = \frac{q_3 N_3 + q_4 N_4}{3600}$$

式中: q_3 表示不太脏车间每班每人淋浴水量定额, q_4 表示较脏车间每班每人淋浴水量定额, N_3 表示不太脏车间最大班使用淋浴的人数, N_4 表示较脏车间最大班使用淋浴的人数。

因此有:

$$Q_z = \sum_{i=1}^4 Q_i$$

$$J = \frac{Q_j}{Q_z} \times 100\%$$

式中: Q_j 表示进入城市污水系统的污水量, Q_z 表示污水总量, J 表示污水截污率。

(4) 管道溢流量

暴雨条件下, 排水系统内的流量超过截污流量时, 超过部分的雨污混合污水将直接排入受纳水体, 被称为管道溢流。当今, 下雨时经常会发生管道溢流, 这不仅严重污染了受纳水体, 影响了水生生物的生长繁殖, 造成了水体富营养化, 还对人们的生活产生了不利影响, 制约了城市的可持续发展。随着人们对水污染和水环境认识的不断深入, 管道溢流污染控制引起了越来越多人的重视。

(5) 年径流总量控制率

年径流总量控制指标是指通过自然和人工强化的渗透、集蓄、利用、蒸发、蒸腾等方式, 场地内累计全年得到控制的雨量占全年总降雨量的比例。

$$b_1 = \frac{b_2}{b_3}$$

式中: b_1 表示年径流总量控制率, b_2 表示全年控制雨量体积, b_3 表示总降雨量体积。

5.1.2 深圳治水提质工程数学模型的构建

对于所选定的三个指标，存在着极大型指标和极小型指标。其中污水处理投入是极小型指标，水质达标率和污水截污率是极大值指标。所以必须对指标类型进行处理，然后进行无量纲化处理后建立综合评价模型。

全文中是以污水处理投入为载体进行处理的，通过变换：

$$x' = \frac{1}{x}$$

即可使指标 x 极大化。

由于这三个指标存在着各自不同的单位和数量级，使得这些指标之间存在不可公度性，这就为综合评价带来了困难，尤其是为综合评价指标的建立和依据这个指标的大小的排序产生不合理性。所以决定采用无量纲化处理，利用极值差方法，防止大数对小数的影响。

极值差方法：令， $(i=1,2,\dots,n)$ $(j=1,2,\dots,m)$ ，其中 $M_j = \max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}$ ，

$m_j = \min_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}$ 。则 $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{M_j - m_j}$ $x'_{ij} \in [0,1]$ 是无量纲的指标观测值。

为了全面的量化分析雨污收集机制对污水处理系统的影响，建立非线性加权综合评价模型。

$$y = \prod_{j=1}^m x_j^{w_j}$$

其中 w_j 为相应的权系数， x_j 为指标的状态系数，且 $x_j > 1$ 。

5.1.3 模型求解——量化分析不同收集机制对污水处理系统的影响

为了得出每年的污水处理投入，需要先查找每年的降雨量，首先根据深圳市统计年鉴查询结果可知，2000 年至 2014 年的降雨量如表 1 所示。

表 1 深圳降雨量

年份	平均气温 (摄氏度)	降雨量 (毫米)	雨水质量 (亿吨)
2000	23.4	2533.6	50.60
2001	23.6	2747.3	54.86
2002	23.9	1882.8	37.60
2003	23.7	1608.1	32.11

2004	23.6	1299.4	25.95
2005	23.2	2143.6	42.80
2006	23.4	1936.5	38.67
2007	23.5	1581.5	31.58
2008	22.8	2710.0	54.11
2009	23.2	1611.0	32.17
2010	23.0	1634.0	32.63
2011	22.6	1266.7	25.29
2012	23.1	1554.8	31.04
2013	23.1	2203.6	44.00
2014	23.2	1725.5	34.46

因为雨水降落到地面上绝大部分被蒸发了，也有一部分进入农田和河流，余下的一小部分则进入了雨水管道，进行了收集处理。根据公式：

$$x_2 = \varphi \cdot A_1 \cdot S$$

式中： A_1 表示每年的降雨量， S 表示深圳市的土地面积，取 $\varphi=0.3$ ，即可得到雨水进入雨水管道的量。

另外，要想得出处理污水投入费用，还需要深圳市每年的污水量，根据深圳市统计年鉴查询结果可知，2000年至2014年的污水量如表2所示。

表2 深圳年污水量

年份	年末常住人口 (万人)	城市供水总量 (亿吨)	城市年污水量 (亿吨)
2000	701.24	9.207	7.389
2001	724.57	9.733	7.474
2002	746.62	10.807	8.488
2003	778.27	12.280	9.811
2004	800.80	13.503	10.969
2005	827.75	13.949	11.398
2006	871.10	14.523	11.449
2007	912.37	15.423	11.717
2008	954.28	15.696	11.936
2009	995.01	15.009	11.527
2010	1037.20	15.647	12.656
2011	1046.74	16.148	12.398
2012	1054.74	16.036	12.941
2013	1062.89	15.914	12.207
2014	1077.89	16.413	13.377

根据深圳市多年降雨量和污水处理量的以往数据综合分析，考虑选取参数 α_1 ， α_2 分别选取 0.8 和 0.3。则即可得出三种不同收集机制收集的污水量如表 3 所示。

表 3 三种不同收集机制收集的污水量（单位：亿吨）

年份	分流	合流	混流
2000	7.365	22.545	10.446
2001	7.787	24.245	11.167
2002	8.646	19.926	10.300
2003	9.824	19.457	10.749
2004	10.802	18.587	10.977
2005	11.159	23.999	12.779
2006	11.618	23.219	12.775
2007	12.338	21.812	12.713
2008	12.556	28.789	14.915
2009	12.008	21.659	12.501
2010	12.518	22.307	12.951
2011	12.918	20.505	12.611
2012	12.829	22.141	13.057
2013	12.731	25.931	14.145
2014	13.131	23.469	13.606

为了更好的对表 3 中的数据进行分析，利用 *Matlab* 软件作出三种不同收集机制收集的污水量折线图如图 1 所示。

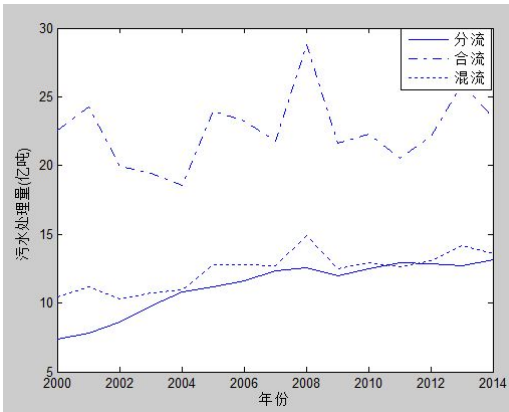


图 1 不同收集机制收集的污水量

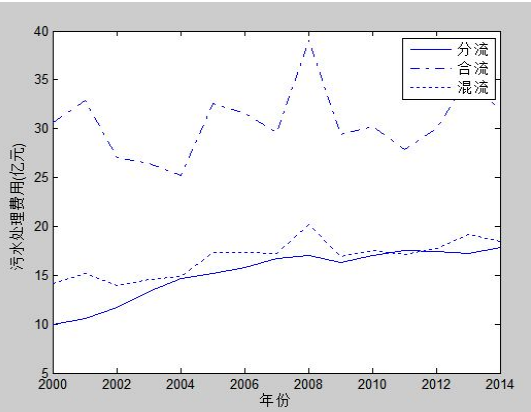


图 2 不同收集机制对应的污水处理费用

由图 1 可知合流收集机制每年所需要处理的污水量相比于另外两种收集机制所需要处理的污水量较多，混流收集机制相比于分流收集机制从整体上来看，混流收集机制每年所处理的污水量略高于分流机制。

根据深圳市水务网中深圳市多年处理污水的费用进行综合考虑，选取平均值，得出 β 的值为1.357 亿元较为合理，根据以上分析，利用公式进行计算：

$$y_i = \beta Y_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

式中： y_i 表示三种收集机制对应的污水处理费用。

根据深圳统计年鉴查询数据，通过水质达标率公式可计算出 2000 年到 2014 年三种收集机制对应的水质达标率；通过污水截污率公式可计算出 2000 年到 2014 年三种收集机制对应的污水截污率得出的数据如表 4 所示。

表 4 三种收集机制对应的污水处理费用（亿元）、水质达标、率截污率一览表

年份	分流			合流			混流		
年份	污水处理费用	水质达标率	截污率	污水处理费用	水质达标率	截污率	污水处理费用	水质达标率	截污率
2000	9.996	89.23	90.04	30.596	94.23	94.93	14.177	56.65	55.45
2001	10.567	89.14	89.95	32.902	94.14	94.84	15.154	56.23	55.03
2002	11.733	90.94	91.75	27.041	95.94	96.64	13.979	63.44	62.24
2003	13.331	92.08	92.89	26.404	97.08	97.78	14.587	66.88	65.68
2004	14.659	93.30	94.11	25.224	98.30	99.00	14.897	69.92	68.72
2005	15.144	91.44	92.25	32.569	96.44	97.14	17.342	65.03	63.83
2006	15.767	92.01	92.82	31.510	97.01	97.71	17.337	66.68	65.48
2007	16.744	93.05	93.86	29.601	98.05	98.75	17.253	69.35	68.15
2008	17.040	90.98	91.79	39.070	95.98	96.68	20.241	63.56	62.36
2009	16.295	92.87	93.68	29.393	97.87	98.57	16.965	68.92	67.72
2010	16.987	92.98	93.79	30.272	97.98	98.68	17.575	69.18	67.98
2011	17.531	94.08	94.89	27.828	99.08	99.78	17.114	71.59	70.39
2012	17.410	93.27	94.08	30.047	98.27	98.97	17.719	69.86	68.66
2013	17.277	91.86	92.67	35.191	96.86	97.56	19.196	66.26	65.06
2014	17.819	92.95	93.76	31.849	97.95	98.65	18.464	69.12	67.92

为了更好的对表 4 中的数据进行分析，利用 *Matlab* 软件作出三种不同收集机制收集的污水处理费用折线图如图 2 所示；三种不同收集机制收集的污水达标率折线图如图 3 所示。作出三种不同收集机制收集的污水截污率折线图如图 4 所示。

由图 2 可知合流收集机制每年所需要处理的污水量的费用相比于另外两种收集机制所需要处理的污水量的费用较高，混流收集机制相比于分流收集机制从整体上来看，混流收集机制每年所处理的污水量所花费用略高于分流机制。原因

在于三种收集机制每年所需处理的污水量的不同，合流所需要处理的污水量较多，混流收集机制相比之下次之，分流收集机制最低。

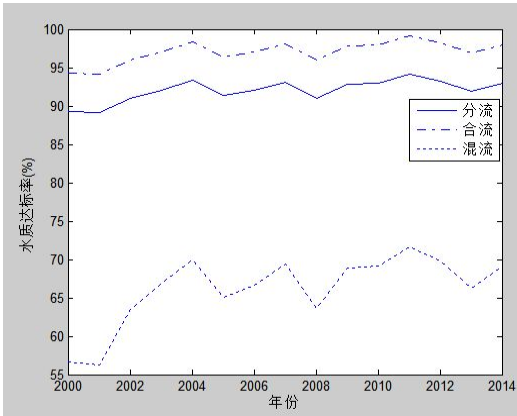


图 3 不同收集机制对应的污水达标率

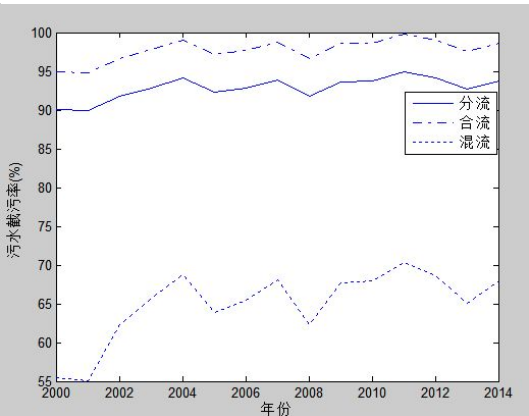


图 4 不同收集机制对应的截污率

由图 3 可知，合流的收集机制相对较好，首先是由于管道收集时，收集的污水中是含有部分雨水的，所以处理后水的质量相对分流要好一些。对于混流为何达标率如此之低，关键是由于管道的乱接，使得部分污水直接进入了河流和江海。

由图 4 可知，三种收集机制对应的截污率中合流的截污率相对较好，因为其特有的收集机制。对污水处理的效果相对之下，分流次之，混流的效果最差。

由于所选定的指标存在着极大型和极小型，进行一致化指标处理后所得污水处理量费用一致化处理数据如表 5 所示。

表 5 污水处理量费用一致化处理
(单位：百分比)

年份	分流	合流	混流
2000	0.100044576	0.032683874	0.070538722
2001	0.094631928	0.030393105	0.06598792
2002	0.085230906	0.036981186	0.071537668
2003	0.075010416	0.037872615	0.068554043
2004	0.068215781	0.039644329	0.06712775
2005	0.06603414	0.030704344	0.057661995
2006	0.063424184	0.031735529	0.057681585
2007	0.05972187	0.033782267	0.057962476
2008	0.058684625	0.025595194	0.049404504
2009	0.06136757	0.034022284	0.05894358
2010	0.058866901	0.033033825	0.056897911
2011	0.057040525	0.035935525	0.058431753
2012	0.057438913	0.033281197	0.056436596

2013	0.057879615	0.028416525	0.052094573
2014	0.05611888	0.031398276	0.0541585

利用极值差方法对三个指标进行无量纲化处理，下面只给出的是污水处理量费用无量纲化处理，另外两个指标的数据见附录六。

表 6 污水处理量费用无量纲化处理
(单位：百分比)

年份	分流	合流	混流
2000	1	0.079880136	0.506454662
2001	0.927297602	0.054066171	0.455173086
2002	0.801023602	0.12830521	0.517711475
2003	0.663742541	0.138350446	0.484089923
2004	0.572477377	0.158315345	0.468017477
2005	0.543173691	0.057573425	0.361350823
2006	0.508116917	0.069193528	0.361571571
2007	0.458387635	0.092257585	0.364736851
2008	0.444455418	0	0.268299717
2009	0.480492583	0.094962263	0.375792607
2010	0.44690374	0.083823624	0.352740592
2011	0.42237196	0.116521984	0.370024988
2012	0.427723076	0.08661118	0.347542186
2013	0.433642564	0.031792705	0.298613277
2014	0.409992472	0.065393129	0.321871028

通过非线性加权综合评价模型求解出 $y_1 = 39$ ， $y_2 = 34$ ， $y_3 = 29$ 。相比之下三种污水收集机制对污水处理系统的影响最大的是分流，合流次之，混流相对较差。

5.1.4 量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对海绵城市建设的影响

根据深圳市统计年鉴查询数据可知 2008 年到 2014 年的污水设计规模并计算出三种收集机制下对应的管道溢流量如表 7 所示。其余指标数据见附件六。

表 7 三种收集机制对应的管道溢流量

年份	污水厂设计规模 (万吨/天)	分流	合流	混流
2008	260.5	0.986	0.000	0.306
2009	262.5	0.466	0.112	0.434
2010	266.5	0.445	0.105	0.419
2011	390	0.769	0.362	0.795

2012	421	0.864	0.362	0.843
2013	445	0.942	0.295	0.815
2014	480	1.000	0.415	0.954

表 8 三种收集机制对应的年径流总量控制率
(单位: 百分比)

年份	分流	合流	混流
2008	70.60%	30.30%	44.44%
2009	72.81%	45.36%	57.14%
2010	64.18%	49.42%	52.34%
2011	67.60%	49.80%	45.47%
2012	75.67%	45.78%	56.05%
2013	73.62%	38.77%	49.37%
2014	69.22%	39.97%	41.30%

注: 数据来源深圳统计年鉴和计算所得

由于管道溢流量越小越好, 为了和其余指标保持一致, 所以需要进行一致化处理, 得到管道溢流量一致化处理数据见附录。

利用极值差方法对水质达标率、雨污溢流量和年径流总量五个指标进行无量纲化处理, 下面只给出的是雨污溢流量费用无量纲化处理, 其余指标的数据见附录七。

表 9 雨污溢流量无量纲化处理

年份	分流	合流	混流
2008	0.986350919	0	0.305992786
2009	0.46579503	0.111660375	0.434403193
2010	0.445026998	0.10537827	0.419139057
2011	0.768555996	0.362480656	0.79532422
2012	0.864067773	0.362309412	0.843249558
2013	0.941753225	0.294916076	0.814747545
2014	1	0.414594265	0.953576474

通过非线性加权综合评价模型求解出 $y_1 = 5.8576$, $y_2 = 3.9311$, $y_3 = 2.4499$ 。

相比之下三种污水收集机制对海绵城市建设最大的是分流, 合流次之, 混流相对较差。

5.2 区域治污实施“清源”、“截排”措施判定条件的确定

为了能够分析出在治污要求合理的情况下，给出实施“清源”、“截排”措施判定条件。通过建立污水治理规划模型，利用治污实施措施中所花费用为目标，以治污要求为约束，即可给出如何判定“清源”、“截排”的判定条件。

5.2.1 污水治理规划模型的建立

建设“清源”、“截排”治污措施，需要根据其特有的独特的治污机制进行考虑。关于“清源”治污措施所需要费用从铺设管道和污水治理费用去考虑；关于“截排”治污措施所需要费用从箱涵建设和污水治理费用去考虑；下面建立污水治理规划模型。

清源雨水管网铺设所需费用：

$$T_{g1} = \gamma_1 g_a$$

其中： g_a 表示清源雨水管网需建管道， T_{g1} 表示清源雨水管网建设花费的钱， γ_1 表示每米需要的管道费用。

$$g_a = g'_a - g''_a$$

其中： g'_a 表示清源雨水管网原有的管道长度， g''_a 表示清源雨水管网现有的管道长度。

定义清源污水管网铺设所需费用：

$$T_{g2} = \gamma_1 g_b$$

其中： T_{g2} 表示清源污水管网建设花费的钱， g_b 表示清源污水管网需建管道。

$$g_b = g'_b - g''_b$$

其中： g'_b 表示清源污水管网原有的管道长度， g''_b 表示清源污水管网现有的管道长度。

清源整治混排、合流或截流管道费用：

$$T_{g3} = \gamma_1 g_c$$

其中： g_c 表示清源整治混流、合流所需要的管道， T_{g3} 表示清源整治管网建设花费的钱。

$$g_c = g'_c - g''_c$$

其中： g'_c 表示清源污水管网原有的管道长度， g''_c 表示清源污水管网现有的管道长度。

所以清源铺设管网的总费用可表示为：

$$T_g = T_{g1} + T_{g2} + T_{g3} = \gamma_1 g_a + \gamma_2 g_b + \gamma_3 g_c$$

其中： T_g 清源管网铺设的总费用。

定义截排管道或箱涵建设的费用为：

$$T_j = \gamma_2 J_c$$

其中： J_c 表示截排需要建设的拦截管道或箱涵， T_j 截排管道或箱涵建设需要的费用， γ_2 表示每平方米所建箱涵所需要的费用。

为了简单起见，不妨设污水处理费用与污水浓度差 $u - u'$ 成一次函数关系，与污水水量 ΔQ_k 成正比，即

$$T_k = \lambda \Delta Q_k [(u_k - u'_k) + b]$$

其中， λ_k 为比例系数，它实际上表示了第 k 个污水处理站的每流量单位降低每个浓度单位所需的资金。当然 λ 的大小可以反应污水处理的技术水平，这里暂且不讨论，一般将 λ_k 看作常数。

污水浓度递推关系满足水质自净方程：

$$C'_k = \frac{1}{Q_{k+1}} (Q_k C_k + \Delta Q_k u'_k)$$

$$C_{k+1} = U_k C'_k$$

显然， $0 < U_k < 1$ 自净因子（或自净系数）与河流状态（水量、污染程度、

地质状况、温度等)有关。在某一段江水中,由于地理位置相差不大可以看出常数。自净因子的获得可以利用监测数据,利用参数估计的方法计算获得。

定义单位时间流过某一断面的污染物的总量为此断面的污染通量 V_k , 显然有污水处理站的流入污水通量为

$$V_k = \Delta Q_k u_k$$

流出通量为

$$V'_k = \Delta Q_k u'_k$$

定义

$$\lambda_k = \frac{V_k - V'_k}{V_k}$$

为第 k 个污水处理站的治理系数。显然 λ_k 反映了治理能力, 一般有 $0 \leq \lambda_k < 1$, $\lambda_k = 0$ 表示未治理。

而 λ_k 越接近, 则治理效果越好, 治理系数也可以看成是对污水治理要求达到的一项指标, 当然治理系数与投资也是密切相关的。所以有:

$$V'_k = (1 - \lambda_k) V_k$$

即

$$T_k = r_k (V_k - V'_k) = r' V_k \lambda_k$$

由此可见, 污水处理的费用与处理系数 λ_k 成正比, 同污水的污染通量 V_k 成正比。

设定 ΔQ_k 比 Q_k 小的多, 即污水的流量比江水流量小得多, 且在整個一段范围内流量 Q_k 为常数。即 $Q_k + \Delta Q_k = Q$, 则污水进入江水混合以后的浓度为

$$C'_k = \frac{Q_k C_k + \Delta Q_k u'_k}{Q_k + \Delta Q_k} = C_k + \frac{1}{Q} \Delta Q_k u'_k = C_k + \frac{1}{Q} T_k$$

则自净方程可简化为:

$$C_{k+1} = C'_k \beta_k$$

要求使江水水质全面达到质量标准, 即使各污染点的污水与江水均匀混合后

都能达到卫生标准，即：

$$C'_k \leq C$$

治污费用：

$$\min T = \sum r_k \Delta Q_k (u_k - u'_k)$$

约束条件：

$$s.t. \begin{cases} C'_k \leq C \\ C'_k = C_k + \frac{\Delta Q_k}{Q} u'_k \\ C_{k+1} = C'_k \beta \\ 0 \leq \lambda_k < 1 \end{cases}$$

将 u_k 作为已知(污染点的污染浓度),将治理系数 λ_k 作为变量,则可得出基于两种治污机制下的治污规划模型。

$$\min Z_1 = \sum_{k=1}^n r_k V_k \lambda_k + T_g$$

$$\min Z_2 = \sum_{k=1}^n r_k V_k \lambda_k + T_j$$

$$s.t. \begin{cases} C'_k \leq C \\ C'_k = C_k + \frac{V_k}{Q} - \frac{V_k}{Q} \lambda_k \\ C_{k+1} = C'_k \beta \\ 0 \leq \lambda_k < 1 \end{cases}$$

显然,目标函数关于 λ_k 是线性函数,而约束条件关于 λ_k 也是线性的,于是本模型归结为线性规划问题得以解决。

5.2.2 实施“清源”“截排”措施下治污的判定条件

定义：“清源”、“截排”的决策函数为 Γ 函数

$$\Gamma = \frac{Z_1}{Z_2}$$

当 $\Gamma > 1$ 时，即在达到治污要求的情况下，利用“清源”收集机制较好。

当 $\Gamma < 1$ 时，即在达到治污要求的情况下，利用“截排”收集机制较好。

当 $\Gamma = 1$ 时，即在达到治污要求的情况下，利用“清源”“截排”收集机制效果相同。

5.2.3 模型求解——光明新区污水治理条件的给出

为了对深圳市提出合理的污水治理方案，故将深圳市进行区域划分，将深圳市按照行政区划分成十二个区域（如图 5）。为了检验污水治理规划模型的可行性，特选定光明新区为例，通过污水治理规划模型去判定光明新区实施何种污水收集机制较为合理。



图 5 深圳市 12 区行政区划方案图



图 6 光明新区简图

根据光明新区特点和实际情况进行分析，设定：

$$\begin{cases} C_1 = 1(mg/l) & Q = 1000(10^{12}l/min) \\ \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 100(mg/l) \\ \Delta Q_1 = \Delta Q_2 = \Delta Q_3 = 5(10^{12}l/min) \\ U_1 = U_2 = 0.9 \\ r_1 = r_2 = r_3 = 1 \\ \gamma_1 = 38.5 \\ \gamma_2 = 200 \\ C = 1 \end{cases}$$

则

$$r_k V_k = r_k \Delta Q_k u_k = 500 = V_K$$

$$C_1 \leq 1$$

$$C'_1 = 1 + \frac{500}{1000} - \frac{500}{1000} \lambda_1 = 1.5 - 0.5 \lambda_1$$

$$C_2 = 0.9 C'_1 = 1.35 - 0.45 \lambda_1$$

$$C'_2 = 1.35 - 0.45 \lambda_1 + 0.5 - 0.5 \lambda_2 = 0.85 - 0.45 \lambda_1 - 0.5 \lambda_2$$

$$C_3 = 0.9 C'_2 = 1.665 - 0.405 \lambda_1 - 0.45 \lambda_2$$

$$C'_3 = 1.665 - 0.405\lambda_1 - 0.45\lambda_2 + 0.5 - 0.5\lambda_3 = 2.165 - 0.405\lambda_1 - 0.45\lambda_2 - 0.5\lambda_3$$

因此，归结为

$$\begin{aligned} \min T &= 500 \sum_{K=1}^3 \lambda_K \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} C'_1 = 1.5 - 0.5\lambda_1 \leq 1 \\ C'_2 = 1.85 - 0.45\lambda_1 - 0.5\lambda_2 \leq 1 \\ C'_3 = 2.165 - 0.405\lambda_1 - 0.45\lambda_2 - 0.5\lambda_3 \leq 1 \\ 0 \leq \lambda_K < 1 \end{cases} \end{aligned}$$

根据 2015 年纳入运营市政排水管渠分区统计表（见附录八）， $g'_a = 544.461$ ，

$$g'_b = 207.470, \quad g'_c = 295.771。$$

由 *Matlab* 求得

$$\lambda_1 = 0.27 \quad \lambda_2 = 0.80 \quad \lambda_3 = 0.80$$

$$\min Z_1 = 11.98 \text{（亿元）}$$

$$\min Z_2 = 15.14 \text{（亿元）}$$

$$\Gamma = \frac{Z_1}{Z_2} = 79.12\% < 1$$

由于 $\Gamma < 1$ 所以关于深圳市光明新区，与其目前状况相结合，可知实施“清源”污水处理机制较为合理。

5.3 光明新区污水治理方案和合理性评估

问题三要求选定一区域给出治污方案，特选定光明新区进行研究。通过两方面对光明新区进行治理，一是从治理污水开始，从茅洲河上游地区出发，追根寻源；二是通过海绵城市建设来防止城市内涝的产生。

5.3.1 光明新区污水治理建议的给出

对于光明新区污水治理建议，本文采用问题二中建立的污水浓度递推关系，考虑污水的自净化能力，求出茅洲河八年内每年应该处理的污水，从而给出污水处理方案。

当处理过后的污水流入江河时，再通过水的净化即可达到目标。下面建立污水浓度递推关系的自净化方程：

$$\Delta Q_k = \frac{C'_k Q'_k - Q_k C_k}{u''_k}$$

$$C_{k+1} = U_k C'_k$$

其中 ΔQ_k 表示需要处理的污水量， u''_k 表示经过污水处理厂处理后的污水的浓度， Q_k 表示未经过污水处理厂处理的污水量， C_k 表示污水处理前的浓度， C'_k 表示污水处理后的浓度。

显然， $0 < U_k < 1$ 自净因子（或自净系数）与河流状态（水量、污染程度、地质状况、温度等）有关。在某一段江水中，由于地理位置相差不大可以看出常数。自净因子的获得可以利用监测数据，利用参数估计的方法计算获得。

根据深圳市所要达到的目标：一年见成效，三年除黑捞，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，全市水生态环境质量全面改善，生态系统实现良性循环。

通过计算求出每年所需要的污水处理量如表 10 所示。

表 10 一、三、五、八污水应处理量（万吨）

目标年份	一年	二年	三年	四年	五年	六年	七年	八年
污水处理量	16425	16425	20075	20075	29200	29200	29200	29200

污水治理建议方案的提出：

根据历年数据结合河流自净化能力，特建议工程实施第一年从河道起点（松白公路）至茅洲河分界处（地下涌）进行对茅洲河流域污染进行整治，处理污水量应不少于 16425 万吨，第二年内处理污水量应不少于 16425 万吨，第三年内处理污水量应不少于 20075 万吨，第四年内处理污水量应不少于 20075 万吨，第五年内处理污水量应不少于 29200 万吨，第六年内处理污水量应不少于 29200 万吨，第七年内处理污水量应不少于 29200 万吨，第八年内处理污水量应不少于 29200 万吨，

为了按照规划完成茅洲河流域的污水治理情况，建议政府大力宣传节约用水，全民行动，使水的利用率提高，重复利用水资源，强环境保护意识的宣传和教育等等。从源头上减少污水处理量。这样就能够提前达到目标。

5.3.2 光明新区内涝治理建议的给出

关于光明新区内涝问题的治理，本文提出采用海绵城市建设方案进行解决，一方面不仅可以美化城市，而且还可以控制径流污染；另一方面海绵城市建设还能够消减径流总量、缓解洪涝灾害、利用雨水资源。

光明新区海绵城市建设方案：

深圳市光明新区 LID 设施主要涉及生物滞留池（Bioretention）、绿色屋顶（Green roof）、透水铺装地面（Permeable Pavements）和植被草沟（Grassed swale）四大类。本文将对 LID 设施进行解释并对深圳市光明新区 LID 建设提出具体意见。

1) 生物滞留池

生物滞留池是指在低洼区种有灌木、花草，乃至树木的工程设施，主要通过填料的过滤与吸附作用。以及植物根系的吸收作用净化雨水，同时通过将雨水暂时储存而后慢慢渗入周围土壤来消减地表雨水洪量流量。

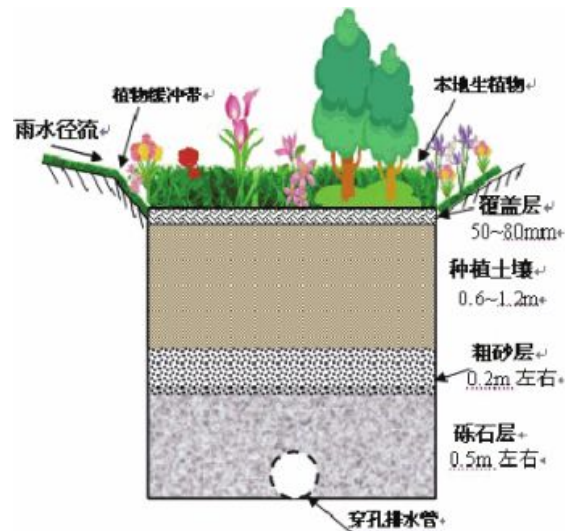


图7 生物滞留池示意图

多项研究结果表明，生物滞留池对雨水径流中的 TSS、重金属污染物有较好的去除效果，而对 N、P 营养物质的去除效果不稳定。

表 11 生物滞留池改善雨水径流水质效果

项目	TSS	TN	TP	Zn
入流浓度 (mg/L)	49.5	1.68	0.19	72
出流浓度 (mg/L)	20.0	1.14	0.13	17
去除率 (%)	59.6	32.1	31.6	76.4

2) 绿色屋顶

绿色屋顶是由很薄、很轻的种植土壤和少量的支撑结构以及植物系统所组成的置于屋顶的装置，主要通过植物和种植土壤滞留雨水，以消减洪量流量和径流总量，且能美化环境。绿色屋顶对雨水滞留是通过屋顶储存雨水和植物的蒸发作用共同完成的。不同试验点对绿色屋顶的研究表明绿色屋顶能够滞留 60%–70% 的降雨量，平均为 63%。

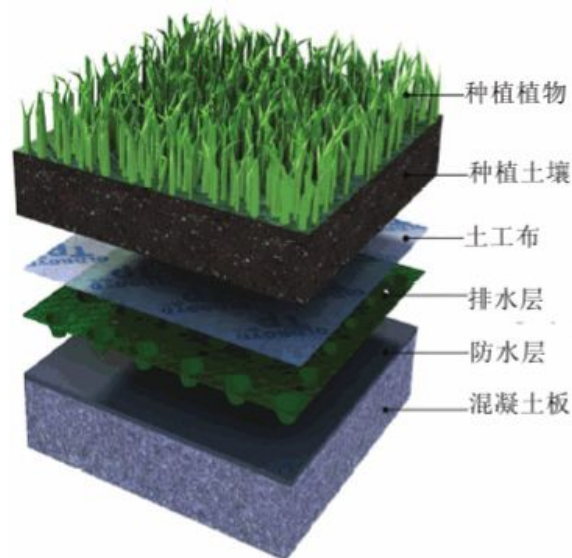


图 8 绿色屋顶结构示意图

3) 透水铺装地面

透水铺装地面是指由各种人工材料铺设的透水地面，如各种透水砖、多孔嵌草砖（俗称草皮砖）碎石地面，透水沥青和透水混凝土等。透水铺装地面可有效入渗雨水，且雨水经透水铺装地面入渗后，雨水水质会有明显改善。

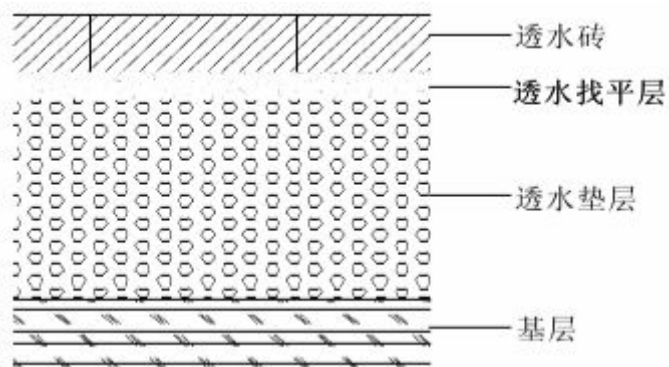


图 9 透水砖铺装结构图

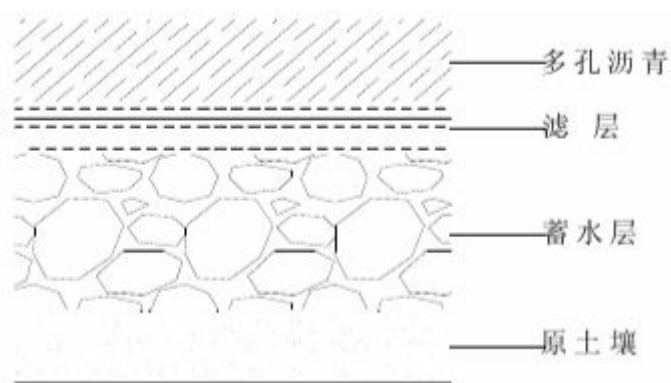


图 10 透水沥青铺装结构图

4) 植被草沟

植被草沟是利用天然的或人工的洼地蓄存、入渗和净化雨水的工程设施。雨水径流植被草沟时，一方面，大量的雨水能够入渗；另一方面，雨水中的污染物质可通过植物系统和种植土壤填料得以去除。另外由于植被草沟具有一定的调蓄容积，可有效消减洪峰流量，减轻城市洪涝灾害的影响。

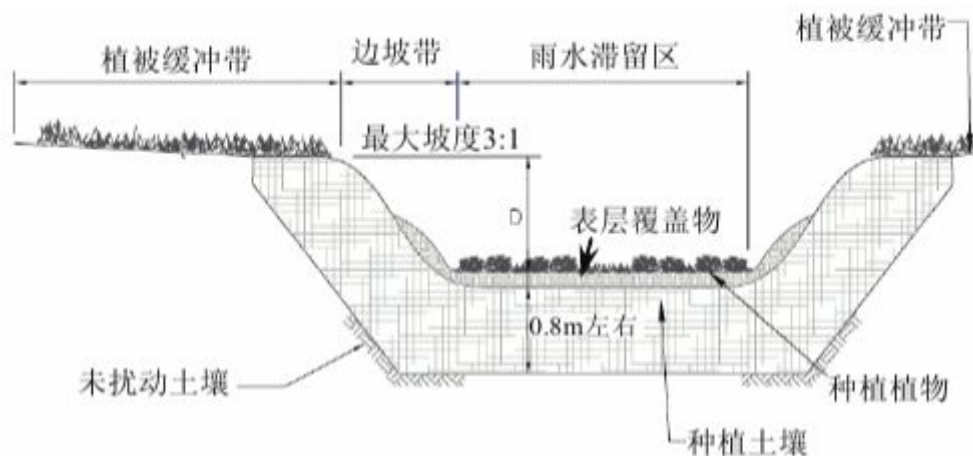


图 11 植被草沟结构图

表 12 植被草沟净化雨水径流水质效果

污染物质	去除率 (%)	污染物质	去除率 (%)
TSS	81	金属	14-55
TP	29	细菌	-50
NO ₃ -N	38	-	-

光明新区海绵城市建设方案：

为了制定出合理的光明新区海绵城市建设方案，将光明新区 LID 建设进行划分区域从而制定建设项目。将建设项目划分成居住小区、公共建筑、公园、市政道路、绿地、城市水体六个，然后制定出了相应的建设目标如表 13 所示。

表 13 光明新区 LID 建设目标

建设项目	低冲击开发雨水综合利用目标（LID 目标）
居住小区	1、径流量控制：开发建设后的综合径流系数 ≤ 0.40 或不大于开发前的评估值； 2、污染物控制：TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%；
公共建筑	1、径流量控制：开发建设后的综合径流系数 ≤ 0.45 或不大于开发前的评估值； 2、污染物控制：TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%； 3、雨水资源收集回用：有水景的公共建筑雨水替代饮用水比率 $\geq 3\%$
公园	1、径流量控制：开发建设后的综合径流系数 ≤ 0.20 ； 2、雨水资源收集回用：雨水替代饮用水比率 $\geq 30\%$
市政道路	1、径流量控制：开发建设后的综合径流系数 ≤ 0.60 ； 2、污染物控制：TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%；
绿地	1、径流量控制：开发建设后的综合径流系数 ≤ 0.10 ； 2、污染物控制：TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%；
城市水体	1、污染物控制：TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%； 2、调蓄洪峰，增强河流综合防洪能力。

海绵城市的建设并不是短时间可以建设完成的，光明新区正在积极建设“光明绿城”，响应国家海绵城市建设的号召。本文将基于“一、三、五、八目标”，提出相应的光明新区每年的建设方案，以便为光明新区海绵城市建设出谋划策。

表 14 光明新区一、三、五、八海绵建设方案

下垫面种类	LID 技术设施	一年建设	三年建设	五年建设	八年建设
屋面	绿色屋顶	743.2	2229.6	3716	5945.6
绿地	下凹式绿地、 生物滞留池、 植被草沟	66.082	198.246	330.41	528.656
机动车道路	沥青路面、生	26.69	80.07	133.45	213.52

	物滞留池				
非机动车道路	透水砖	177.624	532.872	888.12	1420.992
广场	透水砖、生物滞留池	11.297	33.891	56.485	90.376
停车场	草皮砖、生物滞留池	8.536	25.608	42.68	68.288

5.3.3 光明新区污水治理方案可达性分析

城市污染直接关系到人们的生活和出行，对于深圳水环境治理尤为重要。本文选取了深圳市光明新区进行研究，提出了污水治理方案，并给出了具体的污水处理计划。下面本文将根据深圳治水提出的“一、三、五、八目标”进行可达性分析。由于深圳市光明新区属于茅洲河流域，所以需要深圳市提出的污水治理目标进行提取，提取出茅洲河流域的“一、三、五、八目标”如表 15 所示。

表 15 深圳治水“一、三、五、八目标”

目标年限	目标范围	工作目标
一年目标	茅洲河流域	中上游段部分水质指标基本达Ⅴ类
	防洪排涝	消除中心城区主要内涝点
三年目标	茅洲河流域	重点河段主要水质指标基本达Ⅴ类
	防洪排涝	基本清除城市内涝风险区
五年目标	茅洲河流域	达地表水Ⅴ类
	防洪排涝	全面达到城市防洪标准，基本清除洪（潮）隐患和内涝点
八年目标	茅洲河流域	让碧水和蓝天共同成为深圳亮丽的城市名片
	防洪排涝	让碧水和蓝天共同成为深圳亮丽的城市名片

本文将选用问题一中建立的一维水质方程进行可达性分析，本文提出八年内的污水处理量为 16425、16425、20075、20075、29200、29200、29200 万吨，即通过处理茅洲河流域污水，改变茅洲河流域污水浓度以此来实现工作目标。

$$S_c = \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + KC$$

茅洲河流域按照污水处理方案进行处理，由于茅洲河第一年处理从茅洲河中上游开始着手治理，也就是从河道起点（松白公路）至茅洲河分界处（地下涌）区域，由于第一年从源头开始治理，污染源强度 S_c 显著下降。

$$d_a = \frac{d_1}{d_2} \times 100\%$$

茅洲河流域经过八年的污水治理后，达标指标数 d_1 会逐渐增大，所以水质达标率 d_2 也会逐渐增大起来，这样的话茅洲河就能达到一年中上游河段水质基本达Ⅴ类，三年重点河段水质基本达Ⅴ类，五年地表水达Ⅴ类的良好水质环境。

5.3.4 光明新区海绵城市建设可达性分析

深圳市光明新区建设项目在进行低冲击开发雨水综合利用规划与设计时，应该针对具体的 LID 目标，参考各类 LID 设施的应用效果，综合考虑技术、经济、景观等因素，从而确定满足建设项目 LID 设施。下面以光明新区某新建居住小区建设项目为例，进行可达性分析。

该居住小区建成后需满足以下 LID 目标：

①径流量控制标准：开发建设后的综合径流系数 ≤ 0.40 或不大于开发建设前的评估值。

②污染物控制标准：TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%。

表 16 某新建居住小区规划用地构成及 LID 设施应用状况

下垫面种类	面积	LID 设施应用效果
屋面（坡度 $<15^\circ$ ）	4200	①消纳 63%的雨水径流量（取屋面径流系数为 0.37）。 ②绿色屋顶雨水径流污染物浓度与传统屋顶相同。
绿地	3000	①下凹式绿地可消纳 91%的雨水径流量，其余径流量可由绿地内的生物滞留池和植被草沟完全消纳。 ②绿地雨水径流污染物不外排。
机动车道路	1000	①生物滞留池可消纳 50%的道路雨水径流量。 ②雨水径流中 TSS、重金属可有效去除，N、P 营养物质有一定程度的去除，但去除效果不稳定。
非机动车道路	700	①径流系数取 0.3。 ②雨水径流中 TSS，重金属可有效去除，N、P 营养物质去除效果不稳定。
广场	500	①广场透水砖径流系数取 0.3，广场雨水径流可由周围生物滞留池完全消纳。 ②广场雨水径流污染物不外排。
停车场	600	①停车场草皮砖径流系数取 0.15，停车场雨水径流可由周围生物滞留池完全消纳。 ②停车场雨水径流污染物不外排。

表 17 该居住小区在传统开发建设模式下的径流系数

下垫面种类 ¹	屋面	绿地	机动车道路	非机动车道路	广场	停车场
面积	4200	3000	1000	700	500	600
雨量径流系数	0.85	0.15	0.85	0.4	0.85	0.8
综合雨量径流系数	0.61					

注 1：屋面按硬层面、未铺石子的平屋面、沥青屋面计；机动车道路按混凝土和沥青路面计；非机动车道按干砌块、石及碎石路面计；广场按非透水铺装地面计；停车场按混凝土或沥青铺装计。

由表 16 及表 17 可知，该居住小区采用 LID 设施后，其综合雨量径流为 0.23，而在传统开发建设模式下的综合雨量径流系数为 0.61，故该居住小区开发建设后达到了径流量控制目标（综合径流系数 ≤ 0.40 ）。

对于污染物控制，可按公式计算污染物负荷消减率：

$$\eta = \frac{\mu_1 \times h \times c_1 - \mu_2 \times h \times c_2}{\mu_1 \times h \times c_1} = \frac{\mu_1 \times c_1 - \mu_2 \times c_2}{\mu_1 \times c_1}$$

其中： η 表示污染物负荷消减率； h 表示降雨厚度； c_1 表示传统开发建设下污染物浓度； μ_1 表示传统开发建设下综合径流系数； c_2 表示海绵城市建设下污染物浓度； μ_2 表示海绵城市建设下综合径流系数。

为了便于对问题进行计算，假设小区雨水径流中污染物浓度相同，即 $c_1 = c_2$ ，代入 $\mu_1 = 0.61$ ， $\mu_2 = 0.23$ 可计算出 $\eta = 62\%$ 。即与传统开发模式相比，采用低冲击开发模式后污染物浓度消减率为 62%，达到了污染物控制目标（TSS 消减 50%；COD 消减 50%；TP 消减 40%）。

通过某小区的低冲击开发模型建设后进行检验，得到低冲击开发模式能够很好的消减污染物浓度，所以基于“一、三、五、八目标”的光明新区海绵城市建设方案能够通过可达性检验。

六、模型的评价

6.1 模型的优点

(1) 本文查找了许多数据，并结合实际了目前深圳的实际情况作了详细的分析，具有一定的可靠性和可行性。

(2) 本文全面的对问题进行了分析，运用了合适的模型，不仅对分流和混流两种收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响，而且还给出了合流收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响。

(3) 运用非线性的综合评价模型，弥补了传统综合评价的不足。使评价结果更加符合实际。

(4) 考虑了水环境的自净化能力，依据水质达标率，使得资金费用达到了最低。

(5) 利用污水治理方案和海绵城市建设进程相互结合，给出了切合实际的茅洲河流域的治污和防洪方案。

6.2 模型的缺点

(1) 在问题的求解中只考虑了主要指标。

(2) 忽略了在污水治理方面的人工管理费用和维修费用。

七、模型的推广与应用

本文针对各个问题建立的数学模型不单适用于深圳市的治污治理，也同时适用于其他城市的污水治理，能够根据其他城市的具体情况，给出合理的污水处理方案。

例如在解决量化分析雨污“分流”与“混流”收集机制对污水处理系统以及海绵城市建设的影响时运用的非线性综合评价模型还可以运用到水资源短缺、教学质量评价、客户的满意度等问题。

又例如在深圳治水提质工程数学模型的构建所利用的线性规划还可以运用到投资、工厂选址、人员分派、道路运输等等领域；其中水质模型的构建不仅可以解决深圳污水治理问题，而且还可以运用到长江水体的整治等问题。

八、参考文献

- [1]罗靖. Construction and Application of Drainage System Model in Baishizhou Urban Village of Shenzhen. 清华大学申硕论文, 2014
- [2]宋继琴. 深圳污水截排工程设计与德国的差异分析. 中国农村水利水电, 2006
- [3]林佩斌. 深圳地区污水截流倍数研究. 重庆大学工程硕士学位论文, 2006
- [4]高俊合. 深圳水库流域污水截排隧道设计与施工. 现代隧道技术, 2008
- [5]贺金林. 城市排水管网正本清源工程技术探讨. 中国水运, 2010
- [6]陈筱云. 深圳水库污水截排工程规模的选择. 中国农村水利水电, 2005
- [7]叶志辉. 城市初期雨水截排规模分析方法探讨. 中国农村水利水电, 2011
- [8]黄刚. 正本清源雨污分流改造实践探析. 中国高新技术企业. 2011
- [9]郑庆. 浅谈深圳河湾污水截排二期工程合同管理. 中国高新技术企业. 2010
- [10]胡守丽. 深圳河纳污能力评价与污染削减方案优化. 给排水增刊. 2006
- [11]赵洪军. 深圳市西丽水库水源保护措施_环库污水截排. 有色冶金设计与研究. 2003
- [12]陈雯. 深圳水库流域污水截排工程研究. 中国水利期刊. 2008
- [13]肖素芬. 深圳水库污水截排对深圳河的影响及对策. 广东水利水电期刊. 2000
- [14]谢永超. 深圳水污染治理中应考虑的若干技术问题探讨. 中国农村水利水电期刊. 2012
- [15]曾彦君. 分流制雨水系统旱流污水截流效果及改善对策研究. 同济大学硕士学位论文. 2008
- [16]黄慧. 谈浦东新区排水系统中雨污混流现状及对策建议. 城市建筑期刊. 2013
- [17]王宏芳. 深圳排水管网清源行动分析. 绿色科技期刊. 2010
- [18]蔡勇. 深圳市排水管网工程管理初探. 中国农村水利水电期刊. 2013
- [19]张大伟. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用. 给水排水. 2008

九、附录

附件一：三种不同收集机制收集的污水量折线图

```
clc;clear;
x=2000:2014;
y1=[7.365 7.787 8.646 9.824 10.802 11.159 11.618 12.338
12.556 12.008 12.518 12.918 12.829 12.731 13.131]; %分流
y2=[22.545 24.245 19.926 19.457 18.587 23.999 23.219 21.812
28.789 21.659 22.307 20.505 22.141 25.931 23.469]; %合流
y3=[10.446 11.167 10.3 10.749 10.977 12.779 12.775 12.713
14.915 12.501 12.951 12.611 13.057 14.145 13.606]; %混流
plot(x,y1)
hold on
plot(x,y2,'-.')
hold on
plot(x,y3,':')
xlabel('年份');
ylabel('污水处理量(亿吨)');
```

附件二：三种收集机制对应的污水处理费用折线图

```
clc;clear;
x=2000:2014;
y1=[9.996 10.567 11.733 13.331 14.659 15.144 15.767 16.744
17.040 16.295 16.987 17.531 17.410 17.277 17.819]; %分流
y2=[30.596 32.902 27.041 26.404 25.224 32.569 31.51 29.601
39.07 29.393 30.272 27.828 30.047 35.191 31.849]; %合流
y3=[14.177 15.154 13.979 14.587 14.897 17.342 17.337 17.253
20.241 16.965 17.575 17.114 17.719 19.196 18.464]; %混流
plot(x,y1)
hold on
plot(x,y2,'-.')
hold on
plot(x,y3,':')
xlabel('年份');
ylabel('污水处理费用(亿元)');
legend('分流','合流','混流')
```


附件三：水质达标率

```
clc;clear;
x=2000:2014;
y1=[89.23  89.14  90.94  92.08  93.3  91.44  92.01  93.05  90.98
92.87  92.98  94.08  93.27  91.86  92.95]; %分流
y2=[94.23  94.14  95.94  97.08  98.3  96.44  97.01  98.05  95.98
97.87  97.98  99.08  98.27  96.86  97.95]; %合流
y3=[56.65  56.23  63.44  66.88  69.92  65.03  66.68  69.35  63.56
68.92  69.18  71.59  69.86  66.26  69.12]; %混流
plot(x,y1)
hold on
plot(x,y2,'-.')
hold on
plot(x,y3,':')
xlabel('年份');
ylabel('水质达标率(%)');
legend('分流','合流','混流')
```

附件四：污水截污率

```
clc;clear;
x=2000:2014;
y1=[90.04  89.95  91.75  92.89  94.11  92.25  92.82  93.86  91.79
93.68  93.79  94.89  94.08  92.67  93.76]; %分流
y2=[94.93  94.84  96.64  97.78  99  97.14  97.71  98.75  96.68
98.57  98.68  99.78  98.97  97.56  98.65]; %合流
y3=[55.45  55.03  62.24  65.68  68.72  63.83  65.48  68.15  62.36
67.72  67.98  70.39  68.66  65.06  67.92]; %混流
plot(x,y1)
hold on
plot(x,y2,'-.')
hold on
plot(x,y3,':')
xlabel('年份');
ylabel('污水截污率(%)');
legend('分流','合流','混流')
```

附件五：无量纲化处理数据

水质达标率无量纲化处理（单位：百分比）

年份	分流	合流	混流
2000	0.770058691	0.886745711	0.00977968
2001	0.767997036	0.884684055	0
2002	0.81008737	0.926774389	0.168363057
2003	0.836600152	0.953287172	0.248604396
2004	0.865076488	0.981763508	0.319518208
2005	0.821693613	0.938380633	0.205450842
2006	0.834909195	0.951596215	0.243940069
2007	0.859288522	0.975975542	0.306178328
2008	0.810929054	0.927616074	0.171165666
2009	0.855084722	0.971771742	0.29616727
2010	0.857608741	0.974295761	0.30221138
2011	0.88331298	1	0.358475944
2012	0.864426146	0.981113165	0.318044188
2013	0.831395368	0.948082388	0.234065207
2014	0.856986845	0.973673865	0.300731536

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

城市污水集中处理率无量纲化处理
（单位：百分比）

年份	分流	合流	混流
2000	0.782279754	0.891554309	0.009364451
2001	0.780305633	0.889580188	0
2002	0.820608878	0.929883433	0.161214629
2003	0.84599597	0.955270525	0.238049047
2004	0.873263246	0.982537801	0.305951971
2005	0.831722339	0.940996894	0.196727725
2006	0.844376808	0.953651363	0.23358276
2007	0.867721027	0.976995582	0.293178481
2008	0.821414826	0.930689381	0.163898243
2009	0.863695714	0.972970269	0.283592477
2010	0.866112567	0.975387122	0.289379964
2011	0.890725445	1	0.343255623
2012	0.872640516	0.981915071	0.304540535
2013	0.841012172	0.950286727	0.224127169
2014	0.865517076	0.974791631	0.287962951

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

附件六：

三种收集机制对应的水质达标率
(单位：百分比)

年份	分流	合流	混流
2008	90.98	95.98	63.56
2009	92.87	97.87	68.92
2010	92.98	97.98	69.18
2011	94.08	99.08	71.59
2012	93.27	98.27	69.86
2013	91.86	96.86	66.26
2014	92.95	97.95	69.12

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

三种收集机制对应的截污率
(单位：百分比)

年份	分流	合流	混流
2008	91.79	96.68	62.36
2009	93.68	98.57	67.72
2010	93.79	98.68	67.98
2011	94.89	99.78	70.39
2012	94.08	98.97	68.66
2013	92.67	97.56	65.06
2014	93.76	98.65	67.92

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

三种收集机制对应的年径流总量控制率
(单位：
百分比)

年份	分流	合流	混流
2008	70.60%	30.30%	44.44%
2009	72.81%	45.36%	57.14%
2010	64.18%	49.42%	52.34%
2011	67.60%	49.80%	45.47%
2012	75.67%	45.78%	56.05%
2013	73.62%	38.77%	49.37%
2014	69.22%	39.97%	41.30%

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

附录七：

水质达标率无量纲化处理

年份	分流	合流	混流
2008	0.771883308	0.912667799	0
2009	0.825157728	0.965942219	0.150816151
2010	0.828202991	0.968987482	0.158108453
2011	0.859215509	1	0.225992421
2012	0.836428284	0.977212775	0.177210952
2013	0.796576197	0.937360688	0.075889159
2014	0.827452665	0.968237156	0.156323

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

污水截污率无量纲化处理

年份	分流	合流	混流
2008	0.786407369	0.917102651	0
2009	0.836976439	0.967671721	0.143157496
2010	0.839867059	0.970562341	0.150079485
2011	0.869304718	1	0.21451621
2012	0.84767466	0.978369942	0.168211933
2013	0.809846318	0.9405416	0.072035401
2014	0.839154836	0.969850118	0.1483847

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

表 8 管道溢流量一致化处理

年份	分流	合流	混流
2008	1.32058791	0.330268209	0.637492219
2009	0.797937459	0.442377873	0.766419311
2010	0.777085863	0.43607049	0.751093757
2011	1.101916646	0.69420738	1.128792577
2012	1.197812734	0.694035446	1.176910752
2013	1.275810769	0.62637094	1.148294056
2014	1.334291911	0.746530678	1.287681591

年径流总量控制率无量纲化处理

年份	分流	合流	混流
2008	0.888252149	0	0.311683801
2009	0.936962751	0.331937404	0.591471059
2010	0.746748953	0.421423848	0.485837528
2011	0.82212916	0.429799427	0.334278421

2012	1	0.341194622	0.567467035
2013	0.954815958	0.186687238	0.42025287
2014	0.857835574	0.213136434	0.242467589

注：数据来源深圳统计年鉴和计算所得

附录八：

2015 年纳入运营市政排水管渠分区统计表（单位：公里）

行政区域	合计	雨水管渠	污水管渠	
福田区	1177.85	710.69	458.32	8.84
罗湖区	625.70	375.89	243.87	5.94
南山区	1209.84	717.73	491.19	0.92
盐田区	243.11	141.65	100.83	0.63
原特区内小计	3256.50	1945.96	1294.21	16.33
宝安区	2994.4	1332.24	834.47	827.69
龙岗区	3128.963	1755.108	1189.938	183.917
光明新区	1047.702	544.461	207.470	295.771
坪山新区	1062.25	323.62	418.22	324.41
龙华新区	1262.37	627.87	498.75	135.75
大鹏特区	304.24	211.75	27.79	64.7
原特区外小计	9804.925	4795.0	3176.6	1832.2
全市总计	13061.425	6740.96	4470.81	1848.53