目　录

绪论 …… 1
第一章　城市的功能和结构 …… 4
§1.1　城市的起源 …… 4
§1.2　城市的形态要素 …… 6
§1.3　城市的结构要素 …… 10
§1.4　城市化 …… 11
第二章　城市化对河川径流的影响 …… 14
§2.1　水文循环 …… 14
§2.2　城市化引起的土地变化 …… 17
§2.3　城市地形和径流 …… 18
§2.4　城市地区入渗减少 …… 21
第三章　城市化引起水文变化的分析 …… 23
§3.1　如何进行城市水文研究 …… 23
§3.2　水量资料的收集 …… 25
§3.3　水质资料的收集 …… 28
§3.4　城市化区域和流域 …… 30
§3.5　不透水地面百分数估算 …… 34
§3.6　概率方法 …… 36
§3.7　统计技术 …… 41
§3.8　城市化的河道 …… 44
第四章　城市化与河流水质 …… 50
§4.1　天然河流的水质 …… 50
§4.2　未处理污水对河流水质的影响 …… 58
§4.3　城市污染的来源 …… 64
§4.4　城市径流对水质的影响 …… 67
§4.5　城市径流对河流水质的影响——实例研究 …… 71

§4.6 城市径流对土地侵蚀的影响…… 83
§4.7 城市交通措施对河流水质的影响…… 87
第五章 城市水量和水质模型 …… 94
§5.1 数学模型的建立…… 94
§5.2 天然流域模型…… 98
§5.3 降雨-径流模型 ……100
§5.4 城市集水区模型……105
§5.5 城市集水区模型——水量模型……119
§5.6 城市集水区模型——水质模型……130
第六章 非工程措施 ……139
§6.1 规划和规划委员会……139
§6.2 规划和规划过程……146
§6.3 城市水资源规划……155
第七章 工程措施 ……160
§7.1 水量……160
§7.2 水质……165
§7.3 地表侵蚀和沉积控制……170
第八章 废水处理 ……175
§8.1 废水的氧化和污染物的去除……175
§8.2 高效好氧工艺……176
§8.3 治理责任社会化……180
第九章 沿海城市风暴潮 ……182
§9.1 风暴潮的基本概念……182
§9.2 风暴潮的特征……185
§9.3 风暴潮的作用过程……189
§9.4 风暴潮可能最高潮位预测……193
第十章 城市地面沉降 ……196
§10.1 城市化与地面沉降 ……196
§10.2 影响地面沉降的因素 ……199
§10.3 地面沉降的防治对策 ……201
编译后记 ……203

绪　论

城市水文学是水文学的一门新兴分支学科，它着重研究城市及周围地区的水分循环、水的运动变化规律以及水与城市人的相互关系。城市化地区人口集中，工厂与建筑物林立，地面透水性能降低、废水浓度和排放量增大，排水速度加快等因素势必引起城市地区水体环境(水量和水质)的变化，从而产生了城市地区特有的水文问题。如城市地区的给水水源问题，城市及其下游的洪水排放问题，城市地面积水问题和城市水体的污染控制问题等，使水文的变化规律和水资源的开发管理成为密切不可分割的整体。本世纪六十年代起，城市水文和水资源的研究在英、美等发达国家有了很大的进展。

我国径流总量虽丰，居世界第六位，但由于人口众多、幅地辽阔，人均水资源量仅每年2500至2600立方米，居世界众国之中后，加之人类活动对自然环境的破坏，大部分地表水和相当一部分地下水遭受严重的次生污染，致使我国的水质污染发展很快，很大程度上加剧了水资源的不足。由于城市化使原来非常缓慢的自然进程大大加速，所以上述两个问题在城市地区尤为突出。我国现有城市近500座，其中有300多座因水源不足或水质恶化而缺水，每日缺水量约1500万吨，给城市生产、生活造成极大影响。为适应廿一世纪我国城市社会经济发展的需要，我们必须以新的理论和技术研讨城市的水文问题。

本书试图向读者介绍国外城市水文学研究的理论和手段，阐明城市水文并非只是个水文学的问题、应用多学科手段、各领域专家精诚合作的宗旨。本书章节的安排为：

第一章"城市的功能和结构"为城市化研究提供背景，试图让

读者透视城市生活的过程，从而有可能把握未来城市发展的物理效应和方向；

第二章"城市化对河川径流的影响"着重讨论水量因土地利用变化而受到的影响；

第三章"城市化引起水文变化的分析"罗列了各种分析的方法，评价城市化后河流情势改变而造成河流形态和水流结构的变化；

第四章"城市化和水质"讨论水质的影响，触及城市化对一地区水文、水质的作用；

第五章"城市水量和水质模型"开发和概括了基本模型和现有的分类模型；

第六章"非工程措施"和第七章"工程措施"、第八章"废水处理"、第九章"沿海城市风暴潮"、第十章"城市地面沉降"讨论城市水文问题的解决方法。第六章主要介绍规划的作用，提出民众参与规划的重要观念。第七章提出当前采用的工程技术；第八章介绍我国最新的污水处理技术；第九章介绍沿海城市风暴潮特征和预测；第十章介绍城市化区域地面沉降的状况，讨论沉降的原因及对策。

本书提倡土木工程学、物理地理学、环境科学、城市规划学、水文水资源学等课程相互结合，全面妥善地研究城市水文问题。本书也可供其它专业研究参考。

本书采用的计量单位体系是英制，为方便读者起见，以下提供一些简单的换算关系。

1英寸＝25.4毫米

1英尺＝12英寸＝0.3048米

1码＝3英尺＝0.9144米

1英里＝1.6093公里

1英亩＝0.405公顷＝4050米^2

1加仑＝3.785升

1 磅＝0.4536千克

1 短吨＝2000 磅＝0.908 公吨

第一章　城市的功能和结构

对城市的功能进行综合分析和全面了解城市化的自然过程是研究城市水文学的基础。通过这种认真的探索，我们不仅能准确地预测城市未来的发展和衰亡，而且将有助于我们对雨水下水道和滞洪水库等的规划。此外，如果我们能够减缓而不是加剧城市径流问题的话，那么，新的建设会使环境更趋完美。从长远来说，这将节省人力和财力资源。因此，本章将对城市功能和结构的基本原理作一简单的介绍。

§1.1　城市的起源①

人们由游牧生活转而为在社区中定居下来的原因，在最初是个神秘莫测的问题，因为当时人们未必认识到定居比游牧更为优越。吉布森(1977年)在研究了美索不达米亚的一些村落之后，得到的结论是，定居是社会发展过程的必然结果，农业革命也许是最有道理、最能被广泛接受的原因。

所谓农业革命，指的是人对动物和谷物成功的驯化和培育。这意味着人不再依赖狩猎和采集食物维持生计，而可以在永久聚居地通过耕种和从事畜牧业谋生。博格黑(1971年)认为，早期的村庄(公元前5000年)是一些150人左右的农业社区，一些家庭在一起劳动、耕地、储存食物，并负有永久保存剩余物品的全部职责。

随着技术的进步，剩余食物增多，使得社区发展为一个更复杂

① 1965年斯乔伯格对城市的定义是"……是一个具有相当规模和人口密度的社区，该社区内含有各种专家和文化名流。"

的社会组织，并在地域上得到扩展。约翰逊(1967年)阐明，大约公元前4000年左右，居民点成为行政管理的中枢，它不仅用于商品的贮存，而且也用于交换和分配。斯乔伯格(1965年)称此为前期工业社会，他阐明食物剩余使得劳动专门化并产生了领导阶层。前期工业社会还有另外两个重要的特征，(1)有书面文件，使记录得以保存，这也促进了文化交流；(2)除人力、畜力之外，像水力、风力之类的自然资源开始被人们利用。

在社区或居民点里，当领导变得强有力和意识形态增强，并且农业生产更有效率时，相当规模的城市就出现了。自公元前3000年到公元前2500年乌鲁克和巴比伦这两个城市的人口分别增到了五万和八万(哈盖脱，1973年)。然而，社区的规模仍然要受到其邻近地区农业生产和运输条件的制约。约翰逊指出，在总人口中，若有一个非农人口，就要有50～90个农人为他服务，这一点显示了大多数城市的发展受土地所束缚。

大多数的前期工业城市保持了较好的生态关系，芒福德(1956年)在对早期罗马的描述中，将城市和周围地区的关系解释为一种共生型的关系。随着城市的发展，罗马开始超出了其郊区的负担能力，城区与郊区的关系变成寄生型的，这时的罗马只有藉助对其它地区进行有计划的军事开拓才能维持其生存和进一步的发展。在这方面，罗马不是独一无二的，在它以前和以后的其它城市和王国都经历了同样的过程。然而，军事开拓只是权宜之计，它不会继续促进城市化的进程。

斯乔伯格提出，与罗马文化传统相关联的技术和观念传播到了阿拉伯世界，并在中世纪得到了进一步的发展。当欧洲走出中世纪并与阿拉伯商人接触时，这些新概念不仅对整个欧洲产生了深刻的影响，而且与文艺复兴也有直接的关系。

在罗马衰落了一千年之后，大城市又再次形成和出现。与罗马和其它前期城市相比较，这些大城市不再凭借武力强占其它地区的自然资源，而是签订彼此有利的互惠贸易协议。芒福德将此称

作城市化的第二阶段。十七世纪出现了很多能成功地维持十万人口左右的大城市。

优越的地理位置刺激了城市的产生和发展，哈里斯和乌尔玛(1945年)提出了城市的三种功能或类型：

1. 城市作为为周围地区提供综合服务的中心地域；

2. 转运货物并沿运输线路提供相关服务的运输城市；

3. 完成一项服务，诸如贸易和作为附属地区社会中心的特殊功能城市。

如果周围地区像美国中西部那样平坦并具有相同的生产能力，那么这些中心就趋向于均匀分布，社区按照其提供功能的范围分成不同的等级。

货物转运是指货物的运输从一种方式转变为另一种方式，譬如，从用船舶变为用火车运送。一旦这个过程发生，用运来的货物进行大规模生产以及发展相关服务的潜势就存在了。实质上，形成城市的潜力一旦具备，城市就容易演进。许多城市，例如纽约、路易斯维尔，旧金山和芝加哥等就是从运输转运点起步的。近年来，汽车运输和公路干线的建设已经使很多城市得到发展，原因就是这些城市正好位于两条州际公路的联结处。

高度集中的资源支持特种功能的城市。迈阿密就是一个例子；气候和海滩创造了一个供休养和娱乐的良好环境。宾夕法尼亚的斯克拉通和威尔克斯-巴勒是专业化的煤矿中心。这些城市以相关功能为核心，在其周围地区的许多社区相应发展起来，哈里斯和乌尔玛认为，美国大多数是以上谈到的三种类型的综合城市。

§1.2 城市的形态要素①

公元1800年前后，人们觉察到一个与城市发展有关的趋势。

① 城市化定义(戴维斯1965，塞维尼和卡默勒1961)为城市居住地人口集中和因农村土地转化为城市、郊区和工业社区而引起的土地利用变化的过程。

拉格(1972年)指出：

从十九世纪开始，一种新趋势变得明显了——那就是城市化。现在，我们已经目睹了可以发展为"城市"的苗子，一种只有总人口中的一小部分居住在那儿的聚落形式。

拉格接着指出，1800 年以后，城市开始聚集越来越多的人口，并且随着时间的流逝，这种城市化趋势加快了。

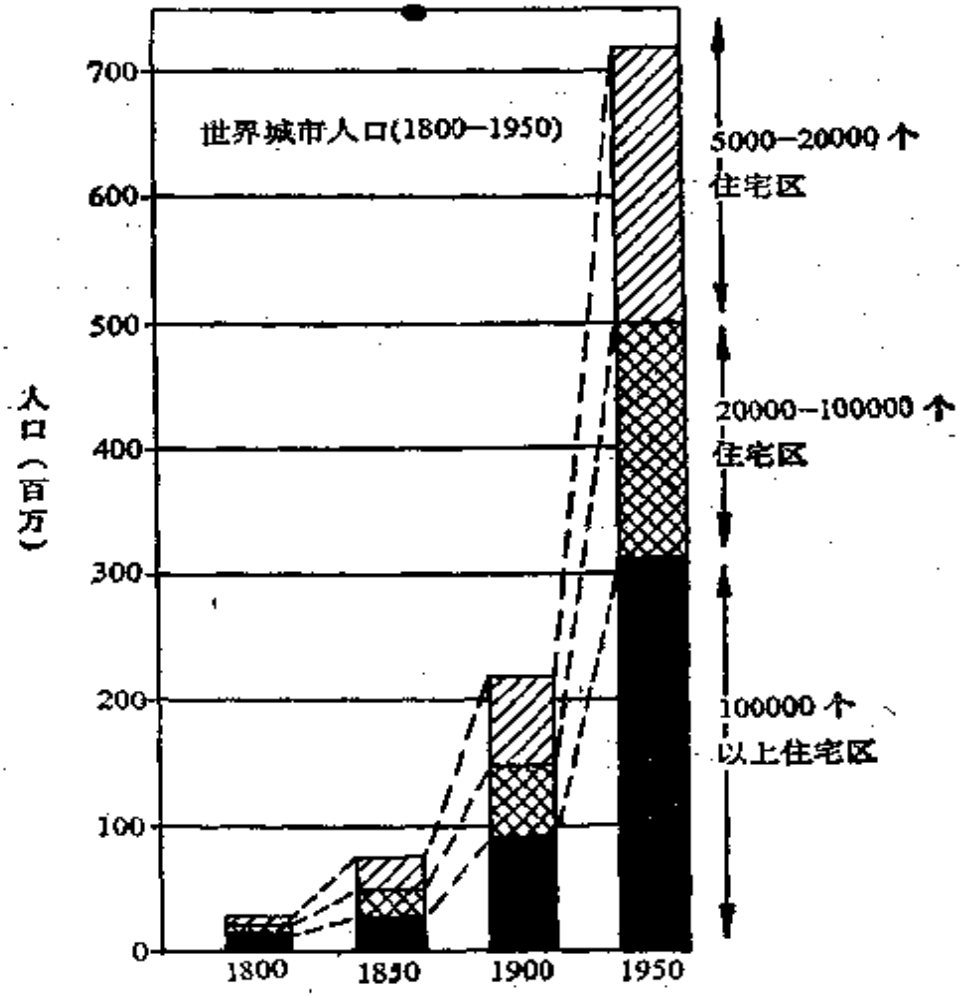


图 1-1 世界城市发展(约翰逊,1967年)

约翰逊(1967 年)指出，从 1800 年到 1950年，世界城市人口从不足 4000 万增长到七亿以上，增长了 1650%左右(图 1-1)。霍脱(1963 年)估计，1800 年世界人口中 1 %居住在一万或一万多一点的城市中，他估计在 1960 年城市人口已增长到 20%，拉格(1972 年)证明，从 1800 年到 1850 年，世界上 36 个主要城市人口平均增

长率约为200%。如伦敦和纽约这两个最大的城市，1800年人口分别为 958800 和 62900，1890 年增长到 4200000 和 2700000。博格(1953 年)指出，1900 年到 1950 年期间，美国标准城市地区人口已增长了 177.8%。第二次世界大战以来的城市化有着"市郊化"的趋势，如美国许多农村的人口在二十世纪四十、五十和六十年代渐趋减少。莫勒(1976年)阐明，1970年美国37.6%的人口住在郊区，1975 年估计有 39.1%的人口是郊区居民。

导致世界人口大规模重新分布的原因是人们还在探索的一个问题。本节将讨论使人口呈对数效应的因素。

后文艺复兴时代(Post-Renaissance era)，思想的复苏促使人们接受科学和科学的方法。提出假设、进行试验、观察结果并寻找科学地解决问题等步骤，都用公式来清晰地表达。一切科学的训练有利于人们基础水平的提高。最终，技术将使定量化得到发展。通过最新方法和技术的运用，人们设计并创造了比任何人都能干的机器。将这些新创立的技能与基内西思经济学所提出的利润刺激结合起来，我们开始看到了工业革命的基础。技术被用以创造利润，人们对技术的改进又增加了利润。

机械化程度的提高使得农业生产的效率和规模得到了空前的增长。约翰逊指出，从生存农业到产品完全为了销售的农业有一个转变过程。农业本身成为一个成本-效益的工业，它为城市地区提供食物并采用科学方法来改善和扩大其自身的生产过程。

当农业变得更有效益时，数以百万计的人就从不断耕作的辛劳中解放出来，并被城市中能赚钱的职业所吸引。劳动力充足，城市化就开始了。工业的发展与城市、城市化往往是密切联系的①。克劳森和霍尔(1973年)指出，工业常能在城市中得到最好的发展，因为有充足的劳力供应并且接近原材料产地和市场，所以，工厂要么位于已建成的城市，要么促使城市的产生。对于一个受雇于基

① 戴维斯 1973 年指出城市发展和城市化不需要相同的过程。

础职业部门(如工厂)的人,必须有三至四人被非基础部门(或服务行业)雇佣(亚历山大,1954年)。随着工业和服务业(如:理发业、洗衣业、修鞋业)的发展,城市就业机会变得多样化,其结果是人口和城市迅猛增长。

戴维斯(1965年)认为,工业化对英格兰和威尔士城市人口的增长有着巨大的影响。他指出,到1801年,这些地区约十分之一的人口居住在一万及一万以上的城市中①,在四十年中人口翻了一倍,再经六十年又翻了一倍。戴维斯指出,经济增长与城市化之间存在着密切的关系。

十九世纪科技进一步发展,不仅产生了城市生活,而且进一步加速了城市的发展。随着铁路和蒸汽船的发明,运输条件改善,不但城市内部,而且城市之间的运输都得到了发展,大规模的贸易在世界范围内展开了。城市成了交通中心,来自远方的移民带来了新的观念。这些人都抱着寻找工作的愿望而来,就增加了劳动力。

技术进步继续扩展到所有领域,使工业生产过程显著改进。汽车成批生产的方式被借鉴并运用到其它领域,如房屋的成批生产。成批生产的方式使每个工人成为一个专门生产者。专业化的概念不仅影响工业组织也影响到研究工作,通过专业化,技术进一步改善。今天,这种螺旋式的上升仍在继续。专业化曾经是并且仍然是美国时代的一个组成部分,对世界其它工业化国家来说,情况也同样如此,它与工业方式的密切关系迅速促进了大城市的发展。

城市化的原动力是人类的一种创造能力,人类不断追求效率,人类不断地满足城市地区社会和文化环境的需要,于是导致了城市化,技术的不断发展和改进已使得人类具备了实现其抽象观念的能力,人类已发现了在城市内部扩展的人类观念的多相性。城市是人类构想和脑力思考的产物。在谈到城市化的未来时,吉布森

① 戴维斯用居住在一万或一万以上城市的人口比例作为城市化的指标。

说得最好："城市的居民将控制城市的未来，就如同他们早已经做的那样，虽然他们常常未曾意识到这一点。"

§1.3 城市的结构要素

前面我们概括地讨论了城市的功能。在这一节中，我们要探索那些导致城市结构发展的因素。城市的功能和结构是两个相互联系的概念，不能绝然分开。形成城市形态的三个因素是，(1)地形障碍，(2)地质条件，(3)道路网。地形障碍一般是指山脉、水体、大片岩石的露头、沼泽等。当城市只能分布在这些区域中时，它就将沿着阻力较少的方向发展。多数城市为这种发展类型的结果。在某些情况下，因受地形限制，致使城市只能向高空发展。

城市所在地的地质条件将决定该区域支撑多大规模和建筑物的能力，莱吉脱(1973年)指出，纽约城下面坚实的曼哈顿片岩给摩天大厦的建造提供了坚固的地基；在另一方面，伦敦的粘土层承受不起摩天大厦，结果，一直到近些年，伦敦的垂直发展还受到限制。

道路网的模式是影响城市形态的最主要的控制因素。马丁(1972年)指出：组成城市的道路网和小块土地就像放置或抛掷在地上的一张网格，这就是城市化的框架。不论是人工的、规划的、预先规划好的，还是历史事故所造成的，这个框架始终是我们修建道路的控制因素。

世界上大多数城市采纳了网格的形式。街区和街道的宽度对城市形态有深刻的影响。莱科布锡(1939年)指出，通过扩大曼哈顿街道网的宽度，并采用不同的建筑物形式，摩天大厦就可能会消失，而大部分面积是绿地的城市就会产生。这类城市的设计将在后面谈到，因为这种布局会对城市水文学有重大影响。

必须提出的是，上述三个因素依次受到现实技术能力和初期城市的布局所制约。换句话说，任一阶段的城市发展趋向于在这

三个因素都有利的地方发生，即使过去的发展产生了空间利用效率不高的结构。同样，文化限制也有相似的影响，行政分区制度和发展管理条令会引导城市发展并影响城市结构。

城市的形态结构同样受到外界因素影响，如运输中枢的能力、与周围地区和其他地区贸易相关的程度等。

总之，城市形态结构是环境、文化因素、历史阶段和技术发展的综合产物。

§1.4 城 市 化

本节将概述某些城市的功能因素并讨论他们对城市形态的影响。

早期社区（前期工业社会）的形态和配置由人类的需要所支配。博尔（1968年）把这些城市地区称为"步行的城市"。正像这一名称所蕴含着的，步行是决定早期城市规模的因素。重要的商业和管理建筑群紧紧地座落在一起，狭窄的道路并不比小马车道宽多少。上层阶级要求方便地进入城市而居住在市中心，并把底层劳动群众挤向城市边缘居住。在这一时期，城市的发展表现为建造新的城市而不是扩大已建成的城市。

首都城市是个例外。很多首都城市是同时代建筑上的杰作，如罗马、亚历山大、雅典等，那时建这些城市是为了炫耀和神化统治阶级，而并不是适应人类需要。

19世纪中叶后，当火车从城市中心向外驶出时，蒸汽机和火车城市出现了。通过铁路这种新运输工具的媒介，出现了城市化，人口大量向车站周围集中，形成了星状城市。

总的说来，今天的城市可以归入"柔性的城市"一类（博尔1968年）。这类城市是在适应电力输送、内燃机、电信和钢架建筑的应用而发展起来的。必须提到的是，许多柔性城市围绕着一个较老的、通火车的城市"核"而扩展。电力的广泛传送，使城市内部地区

有可能向外界增强联络，使老城市和星状城市之间有可能互相构通，城市化也就随之实现。

电信和钢架建筑的发明和改进对工业化产生了深刻的影响。电话能使行政上的决定传达到工厂的每一个角落，与外界迅捷的联系使工厂能适应外面市场的任何变化。随着电信技术的进步，人们可能迅速地获得最新信息，世界就变小了。

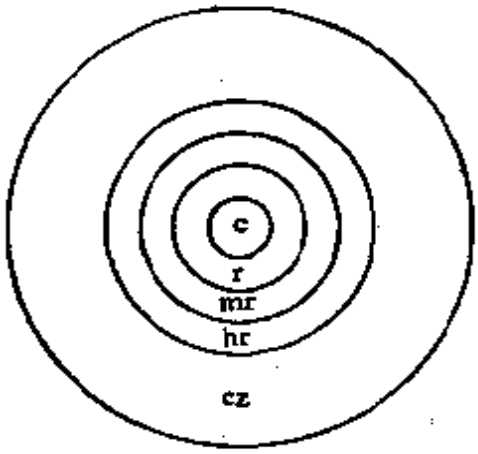
钢架建筑使城市商业区增加了多层空间，从而改变了社区的形态，城市开始向高空发展。工厂许多加工过程能向垂直高空发展，而其它过程也将适应这个发展。约翰逊(1956 年)发现具有相关功能的专业集聚在同一建筑中能产生出一个高效率的共生现象。复合公寓的建成，为数以千计的人提供了住房，并增加了人口密度。如果没有钢架建筑的发展和成功的应用，那么今天大型市郊区的商业、工业和住宅复合体是不可能出现的。

机动车是使得城市和郊区发生改变的最大工具。工人从不得不住在其受雇地方附近处解放出来，到新扩展的郊区居住，每日往返于市中心和郊区之间成为正常生活的一部分。正像莫非(1966 年)提到的那样，主要睡觉的地方——居住卫星镇是适应城市向郊区扩展的产物。不久这些卫星镇发展并合并成为城市。

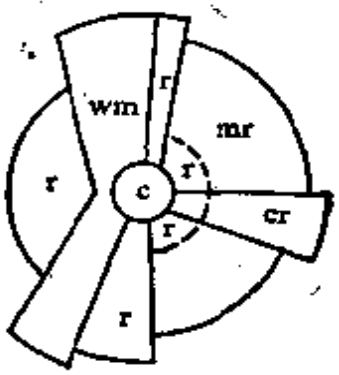
哈里斯和乌尔玛(1945 年)根据城市的内部结构，曾把这些城市归纳成三种通式：①同心圆模式，②扇形模式，③多核心模式(图 1-2)。同心圆模式(博格斯，1925 年)假定一个城市可以被划分为五个同心圆层。从城市中央向外递推，这些圈层是①中心商业区，它是社会、商业和市民生活的焦点；②过渡区，它围绕着中心商业区，在许多城市中这是一个居住条件很差的地带，新来的移民在此居住；③自食其力的工人居住区，这是已经离开城市但仍希望住在能便捷地进入工作地的工人所居住的地方，④较好的居住区，主要由单个家庭住房和高级公寓组成，⑤使用月票者居住区，是郊区或卫星城。

扇形模式理论(霍脱 1939 年)阐明，城市沿交通线发展形成了

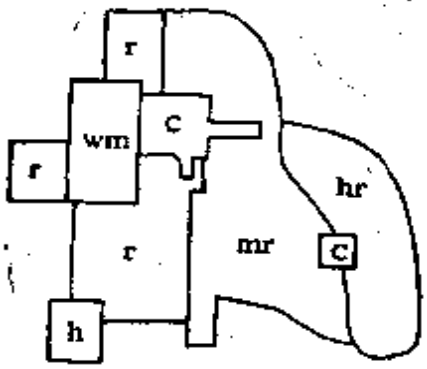
星状城市。在这种理论中，城市仍然被认为是圆形的，由各种自中央向外辐射的扇形所组成。相似类型的土地利用从中央开始并随城市的发展而向边缘推进。



同心圆模式理论



扇形模式理论



多核心模式理论

c 中心商业区
r 低阶层居民区
mr 中阶层居民区
hr 高阶层居民区
wm 批发轻工产品区
h 重工业区
cz 使用月票者居住

图 1-2 城市内部结构的通式(哈里斯和乌尔玛，1945年)

多核心模式理论提出土地利用形式不是围绕单一中心，而是围绕一些分离的核心建设的。这些核心可能是经常存在，但并不十分明确，他们受专业化或移民群的刺激，并可能发展为城市形成的基础。

这三种通式也引起许多争议，城市很少有可以作为这些模式中的任何一个典型例子存在，大多数城市就其空间结构而言，是这三类理论模式的综合。

第二章　城市化对河川径流的影响

§2.1　水 文 循 环

地球上的水量是平衡的。佩克佐罗和卡拉尼(1973 年)估算：海水占 97.2%($1.35\times10^{18}m^3$ 或 $13.5\times10^8km^3$)，冰川和极地冰占 2.09%，地下水含量占 0.6%，湖泊、河流水量占 0.014%，还有数量相对很小的大气水。巴里(1969 年)指出，任何时候，河流和湖泊仅拥有全部淡水量的 0.33%，大气水量不超过 0.035%。水体的连续运动遵循水文循环的原理：在太阳的自然热力作用下，水由海洋进入大气，并在重力作用下降落在地表，再流回海洋，作循环运动。水循环有二个部分，在大气中水平运动的水分主要呈汽态，而陆上水流主要呈液态、固态。

如图 2-1，当水分从海洋上蒸发时，水文循环就开始了，大气中的水汽凝结成云并降水到陆面，先被植物拦截，降水中一部分再次蒸发进入大气，一部分则成为地表径流和壤中流。地表径流暂时贮留洼地作填洼水，其余水流入河川，壤中流渗入土壤并缓慢流动渗入河流内。植被可以根据其生理需要从土壤中截获水分并通过气孔蒸腾至大气中。

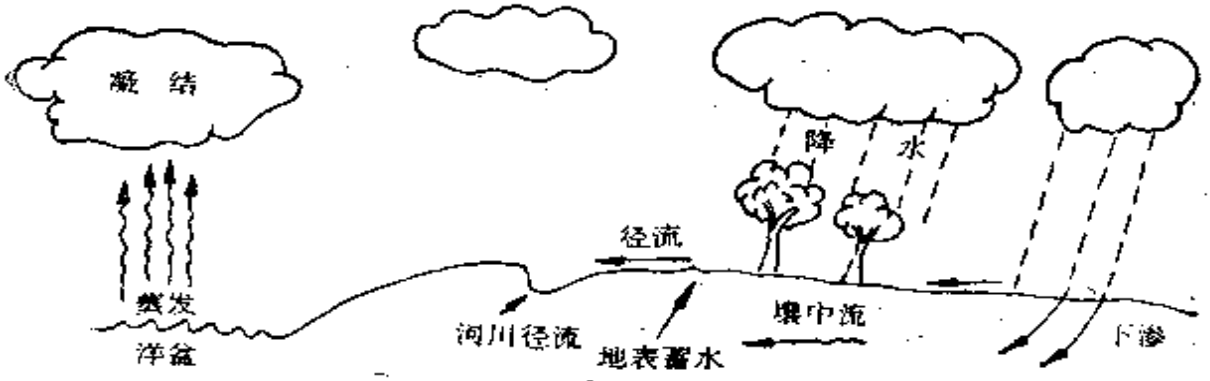


图 2-1　水 分 循 环

蒸发

巴里于1969年讨论了蒸发的机制。1克水在100℃时蒸发需540卡热量，在0℃时需600卡热量，干风与阳光一样使蒸发过程加强。

降水

水汽在大气中微小灰尘粒子周围凝结。首先，水分形成直径小于0.04mm的细小微滴，并随气流而动，聚集成为云。由于水汽的继续聚集，使微滴变大成为液态或固态的颗粒。当气流不再能驱动这些水滴时，它们就以降水的方式离开大气，回到地表。

下渗

降落在森林，草原等自然区的雨水被树、矮小植物、草等的枝、叶所截留，当植物吸饱后，过剩的雨水开始落在地上并渗入土壤。基克拜(1969年)指出，入渗率取决于水能透入土壤的最大速度。土壤的孔隙率和土壤前期含水量(即雨前土壤的干湿程度)是影响入渗的二个最重要的变量。菲立浦(1957年)用方程式表达了入渗的组成：

$$i=st^{1/2}+At,$$

式中：i为累积入渗量；t为时间；s为吸附系数；A为第二参数，是菲立浦分析推导的第二参数。

地表容蓄量

植被和小洼地一样可以滞留可观的水量，事实上它的作用是蓄积水分、延缓水流，并使一些雨水重又蒸发至大气中。

径流

戴维斯和迪韦斯脱（1966年）把径流定义为河道中流动的水(河川径流)，即地表径流和壤中流的总和。地表径流等于降水扣除地表拦蓄和下渗后的水量，换句话说，当地表容蓄和土壤饱和时，入渗停止，其过剩的雨水就形成地表径流。壤中流是渗入地表，并较地表径流慢得多的回归河流的那部分雨水。

河川径流

河川径流由地表径流和壤中流组成，还有少量直接降落在江河中的雨水。流量的计算公式为：

$$Q=VA,$$

式中：Q 为流量，以 ft^3/s 或 m^3/s 计；V 为流速，以 ft/s 或 m/s 计；A 为河川的横截面积，以 ft^2 或 m^2 计。

流量过程线

暴雨形成的河川径流可以用流量～时间曲线来分析其变化。图 2-2 表示了河流的"流量过程线"。林思里，科勒和帕勒斯(1949年)把流量过程线分成三个部分：(1)涨水段(上升段)，(2)尖峰段，(3)退水段(下降段)。

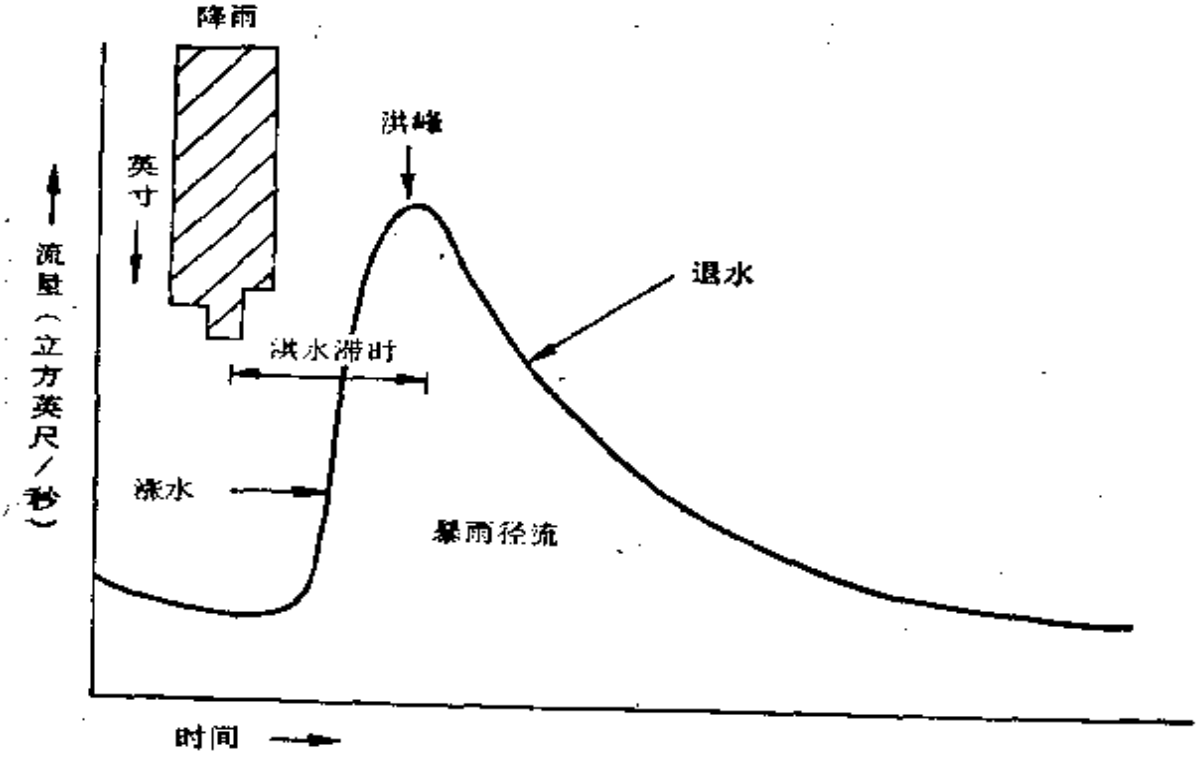


图 2-2 流量过程线(乔莱，1969 年)

过程线的形状随降雨量大小及其时空分布而变化(单独影响或共同影响)，这些因素可使过程线涨水段快速上升形成尖峰、双峰或宽峰等。作为一个普遍规律，实际上没有两条流量过程线是相同的，就是对一个固定的流域，其流量过程线的类型也是不确定的。为了在同一基础上比较流量过程线，舒尔曼(1932 年)推荐了

一个标准的方法——单位线法。周文德(1964年)和纳须(1966年)提出可用以推导单位线的技术(是舒尔曼概念的延伸)。"单位"的含义是假定时空分布均匀地降落在流域上的雨量是10毫米或1英寸①。

在确定流域特征、降水对流域的作用和土地利用变化对河川径流特征的影响等方面，单位线已成为水文专家所应用的有力的分析工具。通常，如果产生水文循环的某种土地状态随着其它因子不断变化的话，那么流量过程线的形状也发生变化。如果流域内滞流的植物数量减少，则蓄水将减少，而径流将增加，单位过程线将升高。过程线的涨水段通常是光滑的斜坡，因为在雨水过剩形成径流以前已受到洼地蓄水的调节。在这种状况的流域内，单位线的上涨历时(滞时)缩短，峰部增高。

§2.2 城市化引起的土地变化

1972年斯坦科斯基在观测下列事实时精确地描述了这些变化：城市化发展伊始，集中的小型社区——密集的房屋群、学校、教堂和商店设施等占用农田。城市化进一步发展的特点是：土地出卖供大型住宅建设，学校的增加、商业中心和一些工业建筑物，街道和人行道网的扩展。中心商业区逐渐形成，有大型商店和办公室，往往还有文化和行政中心。工业沿着河流、铁路线和主要公路线发展，这发展过程一直要维持到住宅、复合公寓、商业和工业建筑、停车场和街道占据了所有的或大部分原有的农田为止。

为把这些土地利用的改变进行分类，萨维尼和卡默勒(1961年)把城市化分成四个阶段：(1)农村，(2)早期城市，(3)中期城市，(4)晚期城市。农村阶段是指某个地区处在耕作或放牧情况的未开发阶段。很明显，地球表面的大部分土地都处在这个阶段。

---

① 单位线将在第五章进行详细的讨论。

早期城市土地利用的特征是一大片城市型住房与许多当地原有的植被共存。许多农村小型社区和郊区可以划入这一类。

中期城市阶段，大规模发展居民住房、中心商店、学校、教堂和工厂。并有越来越多的地段被划归为道路和人行道。这种中期城市的发展首先可以在市郊出现。

晚期城市阶段是城市进一步发展的结果，本地原有的植被减少到最低限度，地表几乎全部被人造的建筑和设备所覆盖。

§2.3 城市地形和径流

当开发出的土地为城市所利用时，该区域就由天然状态转化为完全的人为状态。新的建筑使流域的不透水面积①大量增加，通常，坡度增加，蓄水的能力就大幅度减小。当建筑面积覆盖率达到100%时，植被数量、天然的土地表面和下渗将趋近于零。

图 2-3 阐明两种极端的情况，一个天然的流域和一个全部城市化的流域。降落在天然流域的雨水，部分被植物截留，余下雨水落在地上蓄在洼地内或开始渗入土壤，当植物和土壤水分饱和时，超渗降雨开始在地表漫流。此时，壤中流也已开始，然而，因为地下径流比地表径流缓慢，所以它对河川径流的补充过程较长。

在城市流域内，因为蓄水量和下渗几乎已减少到零，蓄满和坡面漫流的发生相对要快些，进入流域的水迅速充满每个洼地，很快形成地表径流。壤中流已不存在。全部过剩的降雨增大了河川径流。

单位线的方法证实了这个结果。这类似于暴雨降在一个逐步城市化的试验流域上所计算的单位线(图2-4)。由于城市化使流域蓄水容量减少，迅速地形成了大量径流，流量过程线的上升段陡峭。不透水性增加，使洪峰增高。退水段则遵循相同的模式，即急

① 不透水面积定义(弗来明 1975 年)为：地表的透水能力等于零。

剧下降而恢复到基流。早期城市的暴雨，因为有壤中流的补充，它的流量过程线的退水部分就增大，恢复到基流的时间相当长。

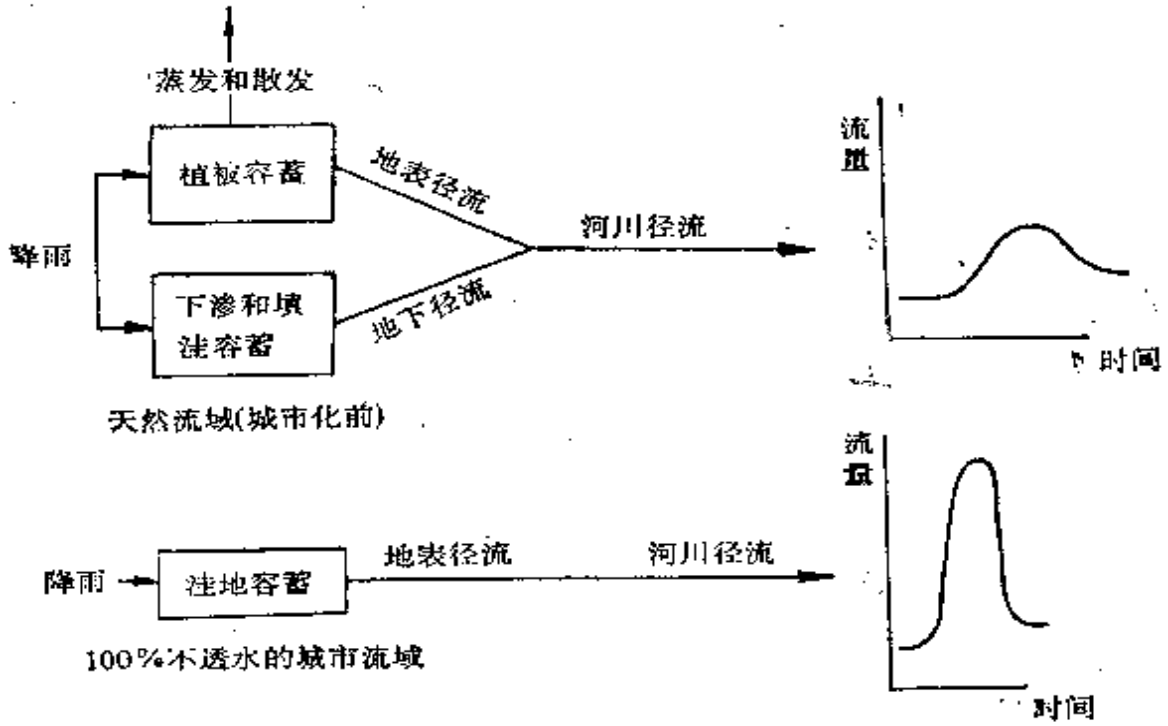


图 2-3　天然流域和城市流域的比较

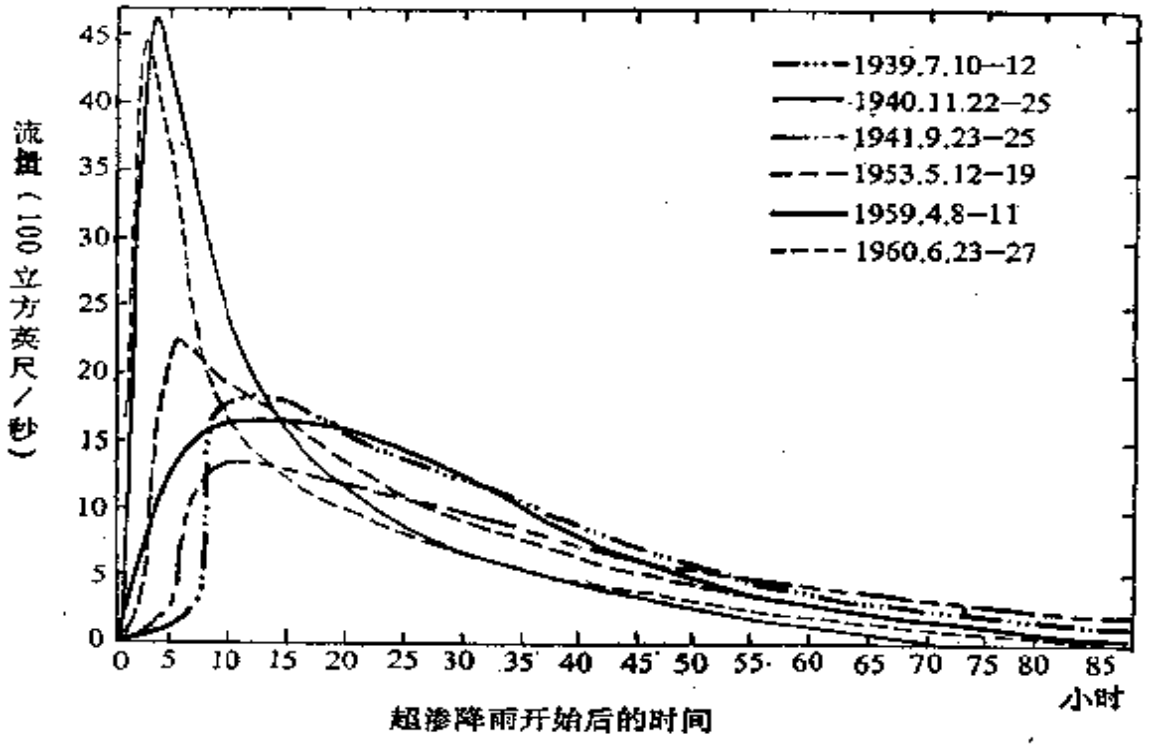


图 2-4　单位线(摩尔和摩根，1969 年)

研究人员应用实验室的流域模型论证了增加不透水性对洪水过程线的作用。罗伯脱和克林格曼(1970年)在一个实验中，试验了透水面积分别为0，占50%和100%时对单位线的作用。他们发现透水面积为0和占50%时，单位线涨水段的前半部分几乎是重合的，在重合点以后，透水面积占50%的要较透水面积为0的滞后(图2-5)。产生这现象的原因是，流域中那一半不透水部分总是位于低平地区(下游)，这部分水以一定的流量和速率流出，与透水面积为0的流量过程线相符合。可是下渗在流域较高的那一半透水流域上的水却不能很快地补给流域低地部分所流走的水，过程线的时间滞后现象就产生了，其结果使50%透水的流量过程线与不透水的流量过程线分离，并开始比较光滑的上升。另外，他们观察到100%透水流域有一个相当缓慢的涨水历时(大约是50%透水流量过程线的两倍)，这证实了蓄水和下渗量大所形成的时间滞后作用。一些其它模型也进一步证实了罗伯脱和克林格曼所得出的结论。

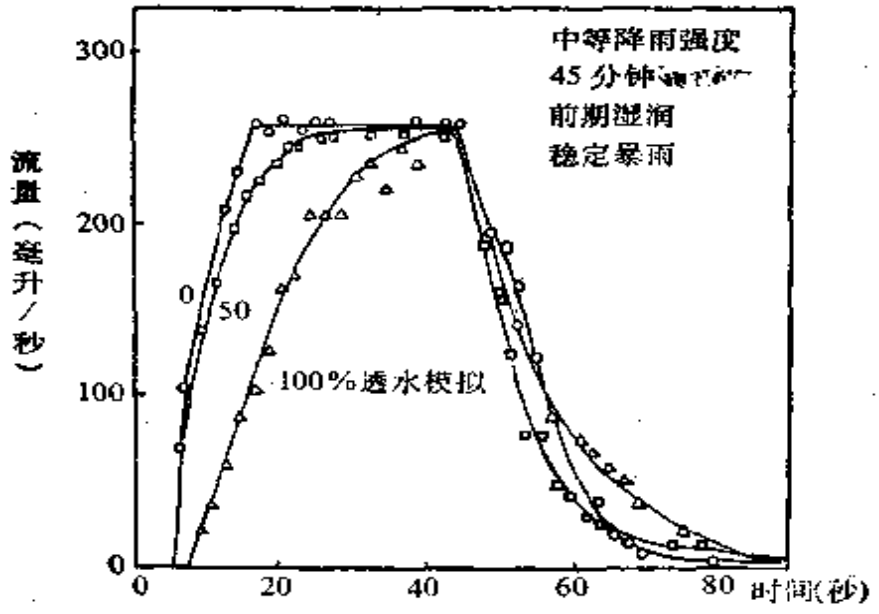


图 2-5　透水面积为0、50% 和100% 的单位线比较(罗伯特和克林格曼,1970年)

相似的经验并不是很容易就能推广到实验室以外的，因为必

须考虑到气候和自然地理的因素。然而，许多研究已经证实了不透水面积确实对地表径流总量和时间有影响，这一点，现在已为人们所认可。哈里斯和兰茨(1964年)在5.12平方英里的流域上研究了城市发展的影响，他们观测到暴雨径流明显地增加。克里彭(1965年)在沙伦河流域使用了单位线方法，他发现，一个面积为24.5英亩的小集水区，在城市化的几年进程中，洪峰流量从180立方英尺/秒增加到250立方英尺/秒。

埃斯佩、温斯洛和摩根(1969年)研究了有关城市地区洪峰流量的几份早期著作，其中有两个结论可用来合理估算地区经历城市化所期望产生的单位线：(1)单位线洪峰流量可增加到三倍左右，而涨水段历时将缩短约1/3，(2)根据河道整治、不透水覆盖、河道内植被数量和排水设施等不同的情况，暴雨洪峰可为未开发地区的2～4倍。

大多数城市的排水设施是下水道。改进排水系统，滞时(Lag-time)可能缩短为天然河道的1/8。不透水表面除了减少滞时以外，还使暴雨径流增加，洪峰流量增加的范围可由2倍至近8倍。布拉脱和桑格(1969年)讨论了下水道的设计问题①，该问题是因输送城市化引起的大洪量、高洪峰的需要而产生的。

§2.4 城市地区入渗减少

考虑到城市土地利用对地表径流的作用，特别是它对河川径流的影响非常明显，通过考察单位线的变化可以清楚地阐明这些影响。前已指出，当一个区域变成不透水时，下渗减少，壤中流减小。壤中流不是单位线的实体部分，所以壤中流减少对单位线的作用远不如地表径流来得明显，这有两个基本原因：(1)流量过程线考虑的只是较短期的暴雨，而壤中流可能要经过多天才流入河

① 下水道设计将在§5.4简要讨论。

川，因此，在单位线上难以显示出来；(2)以年为单位，植物可以吸收相当数量的壤中流，并把水分散发到大气中。桑伊(1963 年)研究了长岛上两个流域的年径流量①。一个受城市化影响，另一个不受影响。他估算受城市化影响的流域有 2％的壤中流不会回归地表径流。有关水量转换的研究成果几乎未见发表，但可以确切地估计到这种现象在城市化流域确实是存在的，一个城市流域的地表径流损失数量能以不透水百分率直接估算。

流域管理人员曾研究植被的种类和数量以确定可能的产水量。美国农业部森林局所发表的论文讨论了森林保护的许多方面和它对产水量的预期作用。休莱脱和赫尔维(1970年)报告，把南阿巴拉契亚山脉的一个 108 英亩流域的森林全部砍光，河川径流明显地(显著性水平为 0.001)增加了 11%。可见砍伐森林对河川径流情势(洪峰和基流)的作用相似，但比城市化的影响要小多了。

① 本书中年径流量定义为一年中全部径流均匀分布在排水区域表面所覆盖的深度。

第三章　城市化引起水文变化的分析

§3.1　如何进行城市水文研究

本章将要论证能用来确定城市土地利用变化范围的多种方法和描绘流域相应水文变化的各类图示手段。

在开始研究城市水文时，研究者必须首先确定其研究所在的领域是与河川径流有关的水量或与水污染有关的水质。§3.2和§3.3将帮助读者收集这些领域的水量和水质数据。本节将概述几种研究方法。本节最后列出参考文献，我们认为这些文献是研究城市水文学的基础。

城市水文学的研究手段

斯尼德(1971年)观测到，水文变化的检测要借助于分析历史记录，以建立合理的非同步数据。按常规，这种非同步与某些流域的自然变化有关。

城市水文研究常常调查土地利用变化对水质和水量的影响。我们可应用三种基本手段来检验这些变化，(1)上下游对比，(2)前后期对比，(3)流域对比。上下游对比要求把城市地区河流的上游与同一条河流下游所收集的数据加以比较，这方法必须注意上下游之间是否有支流汇入和地质变化。应用上下游对比方法，研究流域城市土地利用的变化，可以得出十分清楚和基本确切的论据。

前后期对比方法是把城市区域土地利用变化的前、后数据进行对比。这方法所得成果的缺陷是研究者不能截然分开一个时期暴雨对另一时期暴雨的影响，拉扎罗(1976年)曾采用非参数统计学以试图消除降水的影响。

流域对比方法必需对二个或二个以上流域的水文数据进行对比。其中一个流域是城市，另一个流域是农村。两流域同期数据的每一个变化都可作为土地利用变化的指标。如果应用恰当，流域对比方法会产生有益的结论。然而，相比较的流域气候必须相似，地质条件应当相同。而且，在整个研究期间，农村土地利用必须稳定、少变。

城市化的阶段

土地利用变化的状况可以根据收集到的人口迁移、住宅或其它建筑的资料来确定。这些资料可在地方规划委员会、大学图书馆找到，有时在县、市的图书馆也查得到。人口和住房资料从美国商业部、人口普查局收集，他们每十年普查一次。地方规划委员会密切监察土地利用的变化。委员会中拥有专职的规划人员，通过他们能取得许多土地利用变化的信息。

研究范围

研究范围的大小取决于下列因素：(1)资料的需要和可能，(2)研究采用的方法，(3)研究的焦点，(4)研究的时间限度。一个研究者必须完善他的视野，从而使其研究产生合理的结果。所有的研究都可采用最优化的方法。首先，研究的目的必须明确，其次，研究者必须选择一个可行的工作规模。如果工作范围很大，必须适当地阐明气候和地质的影响，洛杉矶和纽约等一些城市就应归属于这个范畴。

城市水文学的背景参书文献

在美国，多数大学有土木工程、环境科学、地理或地质图书馆，在这些图书馆中通常可以找到下列书目：

《应用水文学手册》，周文德主编。包括29篇描述水文循环的综合性论文，介绍分析的方法和资料收集技术，这些是水文科学普遍适用的工程基础。

《水、地球和人》，R.J.乔利主编。包括从地理角度着眼的一系列水文循环方面的文章。它介绍了从人类调节的方法中所得到的

研究成果。

《流域形态和作用》，K.J. 格里高利和沃林著。该书从地貌的角度讨论流域，有大量关于发生在流域内物理过程的资料。

《应用水文学》，R.K. 林思里，M.A. 科勒和 J.L.H. 保洛斯著。虽是 1949 年的老书，但仍为现代水文学家所推崇并经常参考的一本好书，它介绍了水文基本概念方面的研究成果。

《水文学导论》，W. 维斯门·乔 等著。是一本迄今为止最为综合的有关水文论题的研究著作。它是目前可得到的基础水文书中一本数一数二的好书。

《流域预报水文学》，T.G. 普查门和 F.X. 杜宁主编。是一次水文学专题讨论会的论文汇编，它包含大量有价值的信息。

《城市化和环境》，T.R. 代沃勒和 M.G. 玛库斯主编。该书介绍了许多论题，不仅仅是水文方面的，还包括城市发展引起的环境问题，观点完整而合理。

美国地质调查局(U.S.G.S.)

美国地质调查局水资源处所设立的机构遍布全美国。在所属机构的图书馆中可以找到"地质局"的刊物，它们有：

(1) 刊登专业论文的刊物，主要是水文、水力和地质的研究；

(2) 刊登供水论文的刊物，有定向的研究，但多数是研究水文实例的论文；

(3) 学报，一般是简要介绍著名学者的研究；

(4) 通报，对国内普遍有兴趣的题目开展通俗易懂的有关讨论。

§3.2 水量资料的收集

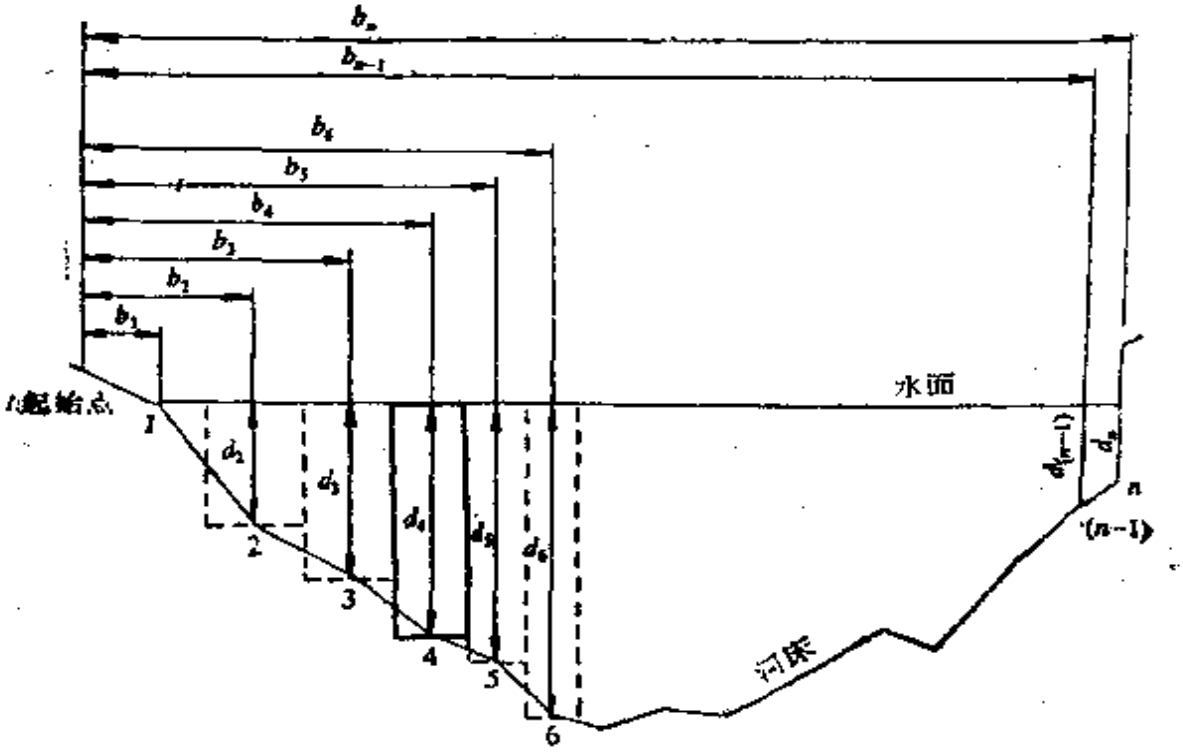
基本资料收集①

在§2.1中我们提出了河川流量的公式为：

① 研究者亲自收集的资料的基本资料。

$$Q=VA,$$

式中，Q 为流量(立方英尺/秒)，V 为流速(英尺/秒)，A 为断面积(平方英尺)。因此，为了测验河流某一横断面的流量，就要确定横断面的平均流速和横断面积。先把断面分成 20～30 个部分断面，记下每个部分断面的宽度，测量其深度和流速(图3-1)。把每个宽度乘上它的深度，就得部分面积，部分面积乘上平均流速得部分断面流量，把所有部分流量相加等于该横断面的河川流量。



$1, 2, 3, \cdots, n$	测点
$b_1, b_2, b_3, \cdots, b_n$	起始点到测点的距离(英尺)
$d_1, d_2, d_3, \cdots, d_n$	测点水深(英尺)
虚线	部分断面边界
断面积	$(b_1-d_1)+(b_2\times d_2+\cdots+(b_{n-1}\times d_{n-1})+(b_n\times d_n)$

图 3-1 河流横断面(布蔡能和柴默斯，1939年)

正如已知横断面的河水深度是变化的一样，断面的流量也是变化的。水面在任意(固定的)基面以上的高度称"水位"。水位与河流深度直接有关。流量测验机构(如：美国地质调查局、美国陆军工程兵团和其它联邦、州的机构)在所设测站上定期进行流量测

验，并把测量结果点绘成图，图的纵坐标(Y 轴)是水位，横坐标(X 轴)是流量增值。这种流量测验图通常用来确定测站的流量-水位关系，根据这条曲线建立率定表。

流量测验机构管辖一个河川径流站网，大多测站都设有一套连续观测水位的设备。一些河流的断面往往达不到精确的流量测验，这是因为河流的水文和水力特性复杂多变的缘故。因此，河川径流监测站的位置在设置和施工以前必须进行认真考虑。我们建议读者在打算测验流量前，先与河川径流监测机构商定沿河确切的测流地点，以便能切实测得精确的河川径流。

浮标测流是确定河川径流的一个简便方法。把一个浮标(如软木塞)放入河内，测量它在流逝的时间内所漂浮的距离。这个方法虽然很粗略，也不是专业机构使用的精确方法，但却可以取得流速。河流的断面积可由上面已描述的方法来估算或按要求的精度进行修正。

要警惕河川径流测验时有危险。专业河川径流测验机构已采取避免伤害和减少人身危险的措施，水文学家则在已经建有河床历史档案的专门位置上测量河川径流。读者打算在一条河流上收集资料以前要谨慎小心，因为城市河流可以暴发洪水引起严重的灾害、河流若被严重污染，就不适宜在收集资料时涉水或与水体接触等。

第二手资料收集①

河川径流测验站可以连续提供流量资料。测验站有已关闭的、重新开放的、新建的或改建的等等。所以研究者必须在他研究的区域内寻找一个河川径流测验站，并从有关的流量监测机构了解该站资料记录的年限(测站运行年限)。大多数测站可提供每15分钟一个水位穿孔的连续数字磁带，测站通过分析这些磁带确定日平均流量。如发生暴雨，就可点绘出一条相当精确的水位过程线。

① 专业机构收集的资料为第二手资料。

有些测站装备有长期记录纸的记录器，则可以点绘连续的水位过程线。

§3.3 水质资料的收集

基本资料收集①

通常可把水质取样分成四大类：(1)溶解气体和金属，(2)有机物，(3)悬移质泥沙②，(4)细菌。收集水样可采取三种基本方法：(1)等输送率法 ETR (Equal Tranist Rate)或等宽增量法 EWI (Equal Width Increment)，(2)等流量增值法 EDI③ (Equal Discharge Increment)，(3)在选定的地点抓取或浸没采样法，这方法的目的是采得有代表性的水样。

ETR法是在断面的每一垂线上，采水器以一个均匀的速率潜入水中来采集水样。要注意的是，一旦选定了某个速率，断面的其它各条垂线采样都保持相同的速率；每根垂线代表相等的宽度；河流垂线的数目随河宽和其它因素而变化。

EDI 法是把河流横断面分成相等流量的部分面积，从每个部分面积中采取相等容积的水样。这个方法通常要取四个左右的水样，比 ETR 法节省时间。然而，如果断面上流量的主要部分在哪里不清楚的话，采样前先要测流来确定。

浸没采样法是把一个充水的容器(瓶子)放置在水面下，瓶子有一个固定的重座并浸没在水中。在浅水河流中 ETR 和 EDI 方法不能应用，而浸没采样法可以取得准确的结果。不过，在采样期间必须留神，不能扰动河底，否则河床质可能混入到水样中去。

溶解气体和金属

① 由于污染、河床碎玻璃和其它因素造成危害，城市河流中收集资料的地点必须反复检查，应当采取减少危及安全的预防措施。

② 本节把悬移质泥沙作为水样的一个分析类目，但它并不是必须考虑的水质指标。

③ 水资源联合委员会 1963 年讨论过这个方法。

溶解气体、pH、电导比和温度随时间的变化很显著，因此要在采样地点当场测出来，这些可称为非稳定性成分。

采集溶解金属的取样器应当用脱磷酸脂肥皂彻底清洗，为了排除外源的干扰，在采样前还要用取样点的河水把瓶子漂洗干净。准备进行金属分析的水样，可以加酸或置于冰内冷却的方法加以保存。

有机物

采集有机物有碳、氮及其衍生物、耗氧量、化学耗氧量(COD)、农药和杀虫剂等。玻璃瓶是采集、运输、贮存水样最理想的容器。瓶子应当彻底洗净并消毒。有机物样品特别容易分解，必须置于冰内，或安排好采集时间，使样品能尽快送到实验室。为了分析 COD、有机碳、油和蜡、除草剂等，可以在水样中加入硫酸以便保存。分析有机物水样要求专门的操作，并严格防止污染。

悬移质泥沙

河流泥沙的测量重点是悬移质。悬移质包括粉砂、粘土、沙子和一些悬浮在河水中的杂质。这些粒子主要由无机岩屑组成，因而采集后的贮存并不十分困难，通常只要彻底洗净贮存这些水样的玻璃瓶(1品脱容积的小型玻璃瓶)就可，关键是要严格坚持采样步骤(如 EWI 法或 EDI 法)采集悬移质水样。

细菌

斯拉克和格里森(1977年)介绍了微生物的取样。理想的方法是，分析样品的生活习性并应当确定其生命循环周期；开发一种合理的统计取样方法，一次取得相当多的样本。通常，微生物采样与前已述及的 EWI、EDI 方法相结合取样是办不到的，主要因为取样时要保持无菌状况极端困难，在有菌情况下，水样采取后又必须立即处理。这两个因素妨碍了多垂线取样步骤的应用。因此浸没取样或定点取样是细菌取样的最常用方法①。

① U.S. 地质调查局水质资料报告处指出，他们应用这种技术采集大量水样。

分析细菌的水样必须采集在完全洗净并消毒的瓶子中。按照已获得广泛应用的薄膜过滤技术，水样通过薄膜将被过滤，过滤纸就类似一个营养培养基。细菌培养物在固体(琼脂)或液体(清水)中，培养 24～48 小时后检测(格里森等)。

根据以上所述，我们可以清楚看到，为实施水质资料收集计划，需要熟练的工作人员，还需要昂贵的专门设备。综合考虑这两个因素，在最初的研究设计中应想到，"……收集水质资料是困难而昂贵的，并还要大量思考，只有满足研究目标必要的资料才应当收集"(阿莱，1976年)。

第二手资料收集

主要是指"水量"测站及河川径流监测机构收集，以及可公开免费提供的大量水质资料。

水质书目

《河流污染研究》，G.A. 贝斯脱和 S.L. 鲁丝著。这是一本关于各种水质成分测验的简要、适用而明了的手册，它对河流污染的有关原因作了有益的讨论。

《河流水质研究的实践指导》，F.W. 基脱勒著。对河流水质研究方法进行了简要而适用的讨论。

《水和水污染手册》，L.L. 西西奥编。对水污染作了广泛的、综合的探讨。

《实用河流环境卫生》，C.J. 维尔兹著。对河流水质的无机和有机成分作了精辟的讨论，是一本优秀的教科书，经常被用作参考文献。

§3.4 城市化区域[①]和流域

流域是一个天然的自然地理区域，它是由地形来分界的。为

① 美国人口调查局(1970年)已公布了城市区域的几个界限：1)有一个5万以上人口的中心区，2)5万人口以上中心区周围至少有2500人的结合地带，3)一个区内每平方英里有1000以上居民密度的小块土地。

了估算流域内的人口，我们不得不利用与排水区分水线通常不一致的行政区或人口调查区。收集人口调查区资料是统计人口最精确的手段，因为这些区域的面积相当小，即使在一个很小的城市流域内也拥有好几个。拉扎罗(1976年)在研究华盛顿特区内阿纳科西亚河东北支河地区的城市水文时，未能从人口调查区收集到人口资料，因此，就应用选区资料。选区资料是在人口调查局的人口调查区成立以前就填写好的。选区范围以相同的比例尺缩小，并绘在流域地图上(图3-2)，这是一个表现和确定城市化对人口密度变化影响的近似方法。表 3.1 示出 10 个选区的人口数。图 3.2、图 3.3 分别从地域上证明了 1940 年和 1970 年人口的密度和变化。

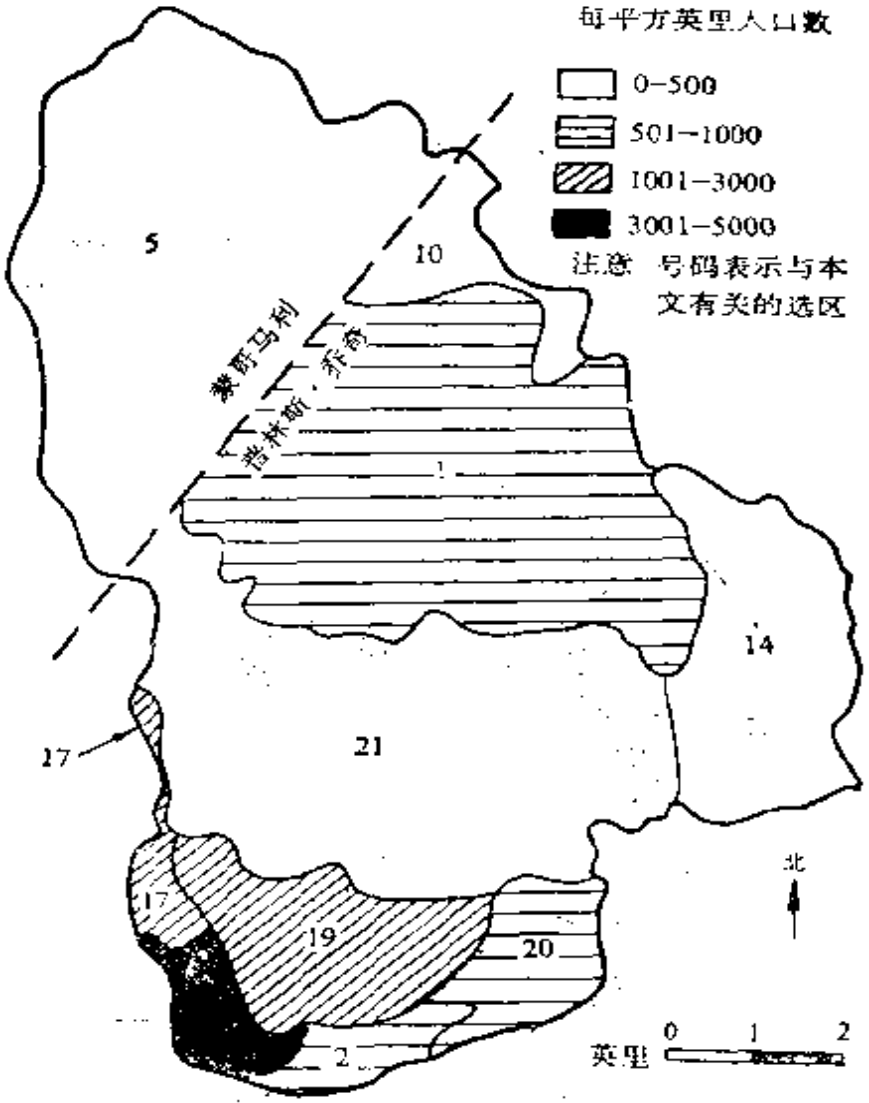


图 3-2 1940年东北支河流域，选区的人口密度(拉扎罗，1976 年)

表 3.1　1940 年和 1970 年东北支河流域人口数比较

选区编号	选　区	人口	
		1940	1970
1	Vansville	1923	20914
2	Bladensburg	6103	41885
10	Laurel	3691	31579
14	Bowie	3600	29161
16	Hyattsrillo	7923	15491
17	Chillum	10864	75728
19	Riverdale	6187	21909
20	Lanham	1758	37739
21	Berwyn	7741	61688
5	Colesville	4045	49605
总数		53835	385699

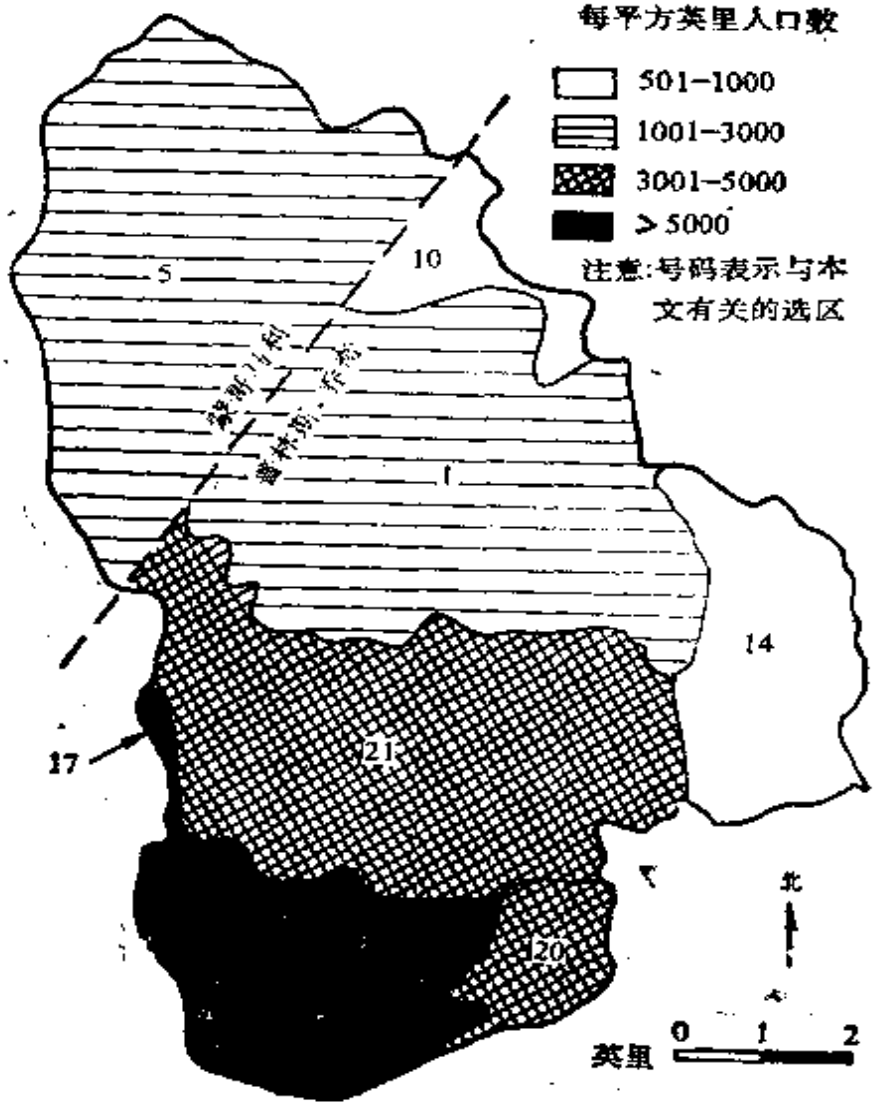


图 3-3　1970 年东北支河流域,选区的人口密度(拉扎罗,1976 年)

在多数情况下，城市发展的土地利用变化主要是居民住房的建设。地区规划委员会或房管处可能有住房资料，美国人口调查局会有这方面的资料。住房单元资料通常按多户住房和单户住房进行分类。如果研究人员能确定每类住房占有的平均面积的话，那么，他就可以估出人口调查局、选区或其它相应单位增加的不透水面积值。表 3.2 列出上述排水区的住房数，在研究的 30 年内住房单元数几乎增加了500%。这种房屋单元分类的方法是可行的，然而，拉扎罗还应用其它一些更准确的方法来估算土地利用的变化。

表 3.2　1940 年和 1970 年东北支河流域的住房单位数比较

选区编号	选　区	住　房　单　元	
		1940	1970
1	Vansrille	1250	6100
2	Bladensburg	2563	13037
10	Laurel	1684	10756
14	Bowie	683	7751
16	Hyattsrille	3804	5306
17	Chillum	5128	28253
19	Riverdale	2336	7110
20	Lanham	474	10413
21	Berwyn	3005	17329
5	Colesrille	944	14586
总数		21971	120641

拉扎罗使用航测照片估算东北支河流域土地利用的变化。他找到了 1936 年和1968年的航空照片，仔细辨析航片并列出土地利用的变化，得到每种土地利用所占面积的准确数值。哈里斯和兰茨(1964 年)用过类似的方法(1948 年和 1960 年的航片)。当研究范围很小可以包容在一张照片内时，土地利用的变化是十分明显的。

§3.5 不透水地面百分数估算

美国城市住房发展部设计了四个指标：(1)土地利用密度率(LIR)，是单位土地面积(英亩)的居民户数，(2)底地面积比，单位土地面积(英亩)的底地(已铺砌)面积数(平方英尺)，(3)总土地面积，与住房发展有关的全部土地面积(如当地街道、边界街道等)，(4)总密度，是住房户数除以总土地面积。研究人员可以利用上述各种比率计算住宅区的不透水面积百分数(表 3.3)。为了确定城市其余部分的不透水百分数，我们必须应用航空摄影法，这将在下面进行叙述。

表 3.3 不透水性指标

土地利用密度率(LIR)	底地面积比(FAR)	每英亩总土地中底地面积平方英尺/英亩	每英亩总土地的土地利用密度	
			1089平方英尺(土地利用)	871.2平方英尺(土地利用)
0.0	0.0125	544.5	0.5	0.625
1.0	0.025	1089	1.0	1.25
2.0	0.05	2178	2.0	2.5
3.0	0.1	4356	4.0	5.0
4.0	0.2	8712	8.0	10.0
5.0	0.4	17424	16.0	20.0
6.0	0.8	34848	32.0	40.0
7.0	1.6	69696	64.0	80.0
8.0	3.2	139392	128.0	160.0

土地利用密度法的主要缺陷是需要准确描绘区域的位置和面积大小，而要获得这类变化多样的城市化面积资料是十分困难和非常麻烦的事情。

判析航测照片是个好方法，它使我们能够获得最精确的土地利用资料(见§3.4)。在航测照片上仔细求积就可以计算各种土地利用的面积。这个方法十分精确但费时太多。

斯丹福等(1974年)认为航测方法可以测算面积，它的精度高于专门研究中应用的其它资料，而且取样的步骤比较简单，精度能满足要求。不少研究人员对这种取样方法表示满意，瓦莱士(1971年)应用每20英亩一个点的样本密度；哈台(1970年)用每2.5英亩一个点的样本密度；格拉克和迈克可思(1975年)在比例尺为1英寸＝400英尺的航测照片上放置一个方格网，从而取得100个样点，每点代表0.9英亩左右的面积，把样点及其周围的主要土地利用面积列为全样方。

斯坦科斯基(1972年)提出在新泽西州用人口密度作为城市和郊区土地利用的指标。他的公式是建立人口密度与市、郊六类土地利用百分比之间的相互关系。这六种分类是：(1)单户家庭住宅区，(2)多户家庭住宅区，(3)商业区，(4)工业区，(5)公共事业和非公共事业区，(6)娱乐场、公共场所和保护区。每种类别以不透水面积平均百分数加权(如低的、中间的和高的)，从而得出下列方程式：

$$I_l = 0.170D^{1.185-0.094\lg D} \qquad \text{(低的)}$$

$$I_m = 0.0218D^{1.206-0.101\lg D} \qquad \text{(中间的)}$$

$$I_H = 0.0263D^{1.247-0.108\lg D} \qquad \text{(高的)}$$

式中：I_l、I_m、I_H为不透水面积百分数，分别以低的、中间的、高的不透水面积作权重，D为人口密度(人/平方英里)。

这方法比应用航空摄影方法进了一步。用本法可以在没有航片时期获得不透水覆盖面的估值，而不透水面积的计算精度将直接取决于加权平均值的确定。

格拉克和迈克可思(1975年)改进了斯丹科斯基的方程式(表3.4)，他们在预估不透水面积时考虑了更多的变量，他们赞同对研究地区航测照片仔细求积的方法，并把由照片收集的数据与方程式求得的结果加以比较。现在，由于计算机制图功能的开发，利用不同历史时期的航片进行计算机分析，不仅能了解现在的不透水地面的百分数，而且能了解不同历史时期的变迁过程。

表 3.4 确定不透水性的(判别)标准

标准变量	R	Se(%)	模式
不透水面积(I)%	0.907	6.27	$I=10.06+58.23\frac{0.000128P}{1+0.000128P}\cdot 1.258\cdot(D-10.05)$
住宅区面积(R)%	0.649	5.44	$R=1.445P^{0.3150}D^{-0.2658}$
商业区面积(C)%	0.552	1.72	$C=2.09P^{0.1045}E^{0.1735}H^{-0.07405}D^{-0.6419}$
停车场面积(PL)%	0.587	3.59	$PL=2.725+32.70H^{0.04150}PE^{0.1468}D^{-2.293}+\frac{H-10.0}{11000-1.015H}$
街道面积(S)%	0.794	3.23	$S=15.05+19.40D^{-0.5125}-115.0PE^{-0.3147}$
农田面积(AG)%	0.781	4.05	$AG=-9.4+9.2P^{-0.43}D^{1.21}+\frac{E-25.2}{0.14E-4}$
草地面积(G)%	0.460	8.37	$G=44.09-0.00008P+1.155\ln E-0.00042\ln H-1.188D$
森林面积(F)%	0.788	10.20	$F=11.21-0.00188P-0.00050E+0.00080H+2.297D$

表中 P 为人口密度(人/平方英里),
D 为距离(英里),
E 为职业人员密度(人/平方英里),
H 为住房密度(住宅单元/平方英里),
A 为面积(平方英里),
PE 为人口密度+职工密度.

(原载《水资源研究》)

§3.6 概率方法

周文德(1964年)指出：水文学中最重要的一个问题是以水文事件的历史记录来描述未来事件的概率。水文学的许多科学研究是建立在历史资料基础上的，因此，概率方法得到普遍应用，尤其适用于对洪水的研究。

洪水系列有两类，年洪水系列和部分历时系列(partial-duration series)(代鲁姆普，1960年)。年洪水系列是从每年摘出的最大瞬时流量组成的。但这方法的缺点是某一年中可以有好几个

超过其它年份洪峰的流量。

部分历时系列的方法解决了上述的矛盾，它规定每个洪水都要超过某一基数。一般就把最小的年洪峰作为基数。另一个选定的标准是每个洪水事件彼此独立，也就是说，它必须是从洪水过程线的退水段上分割出来的。但在实践中要取得这个数据似乎很难，因为连续的洪峰常常紧靠在一起，从何处着手划出分界线是个需要研究的问题。

洪水类型一旦被选定，就有好几种方法可以用来计算重现期(T，年)，表 3.5 列出了几种方法。

表 3.5 计算重现期方法

加里福尼亚法(California)	$T_r=\frac{n}{m}$	n：记录年限
海森法(Hazen)	$T_p=\frac{2n}{(2m-1)}$	m：排列序号最大的为1
美国地质调查局法(U.S.G.S.)	$T=\frac{n+1}{m}$	T_p：重现期

(代鲁姆普，1960年)

我们可以对每种方法在理论上的矛盾进行辨析(代鲁姆普，1960年)。如，取 20 年洪水系列应用上述三种方法进行计算，根据加里福尼亚方法，最大洪水排列第一，重现期是 20 年，这是合乎逻辑的。海森方法求得的重现期是 40 年，把记录进行了人为的扩展。美国地质调查局公式得出的是 21 年，这也是合乎逻辑的。

加里福尼亚法和地质调查局法在理论上似乎是合理的，因为这两种方法表明最大洪水出现的时间相当于 5%或超过 4.76%的频率。然而，当我们颠倒次序、把最大洪水事件列为第 20 时，两种方法理论上的区别就明显了。应用加里福尼亚法计算后可以发现，所有洪水都将小于或等于历史上出现的最大事件(但无一洪水是超过的)，而调查局方法指出，最大事件的发生可能超过或落在

历史上曾出现过的范围内。

城市洪水频率

通常，城市化使重现期短的洪峰流量增加，同样大小的洪峰流量重现期变短，从而呈现新的频率分布。研究人员已发现这种现象确实存在，甚至一些较长期重现期的洪水也是如此。玛坦斯(1968年)在卡罗来纳州查洛梯市区的研究中写道，年平均洪水的大小随不透水度的增加而增加，不透水面积的作用随洪水重现期增加而减小，超过五十年一遇的洪水其影响几乎为零。威尔森(1967年)在研究密西西比州杰克逊地区的洪水以后，得出的结论有些不同，他发现一个全面城市化流域的年平均洪水为一相似天然流域的4.5倍，另外，五十年一遇的洪水也增加3倍。其它一些研究人员得出了与玛坦斯和威尔森相类似的结果。

在认识到洪水滞时要缩短和洪峰流量要增加的情况下，卡特(1961年)在斯尼德早期(1958年)提出方程式的基础上发展了几个回归方程式。他研究了华盛顿特区内流域的资料，考虑四个假设条件，导出下面的方程式。方程式假定为：(1)平均降雨径流系数为0.3，(2)不透水面积变化的作用与洪水大小无关，(3)不透水表面75%的降雨量流入河槽，(4)不透水面积由许多相当小的面积组成，它们随机地分布在流域内。

$$K=\frac{0.30+0.0045I}{0.30},$$

式中：K为不透水面积百分数(I)使洪峰流量增加的因子。

$$T=1.20\left(\frac{L}{\sqrt{S}}\right)^{0.6},$$

式中：T为洪峰滞时；L为从测流断面至流域边缘的主河道总长度；S为坡度(英尺/英里)，流域内3条、3条以上或全部河槽加权平均的坡度。

$$\frac{\bar{Q}}{K}=223A^{0.35}T^{-0.45},$$

式中：$\bar{Q}$ 为年平均洪水① 流量，A 为排水面积(平方英里)。

实例研究

拉扎罗(1976年)曾应用加里福尼亚方法展示阿纳科西亚河东北支河的年洪水系列。东北支河是华盛顿特区玛伦德郊区的一条中等河流，流域面积为 72.8 平方英里。图 3-4 绘出两条曲线，A 线由全部 32 年洪水系列点绘，B线由前16年资料点绘而成，横轴 x 是对数的，竖轴 y 是线性的。B 曲线表明流域中没有发生城市化

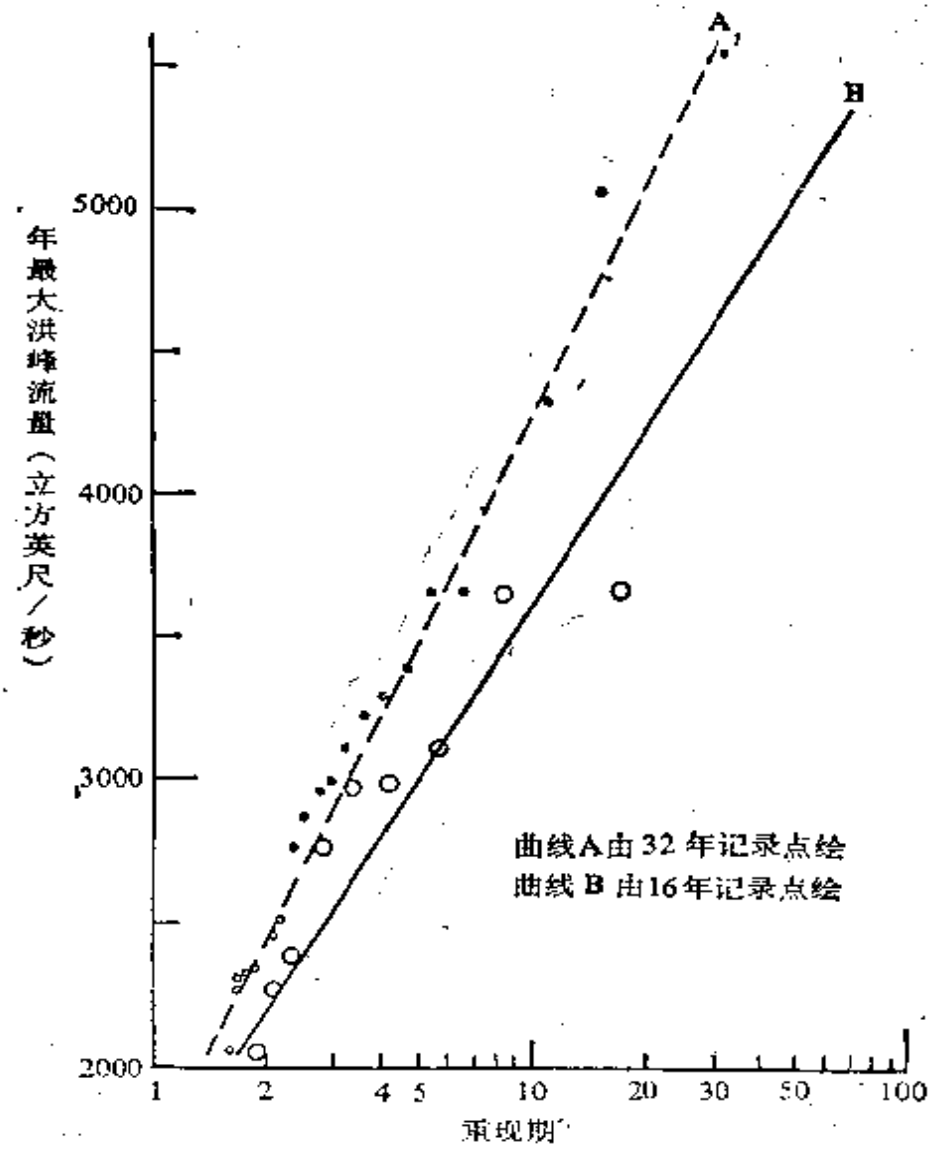


图 3-4　东北支河洪水的重现期(拉扎罗,1976年)

① 年均洪水的重现期为 2.33 年，见周文德 1964年的统计说明。

的情况。曲线 A 显示每三年可望发生一次洪峰流量为 3000 立方英尺/秒的洪水，而曲线 B 则表示五年发生一次。曲线 A 证明了城市土地利用对洪水重现期的影响。

这个观点通过与邻近流域相似资料比较后可得到进一步的论证(改进的比拟流域法)。图 3-5 表示玛伦德地区帕图克森脱河尤尼蒂以上一个天然集水区的年洪峰流量。资料较前例稍短(26年)、但系同步的。曲线 A 为前半期记录的图形，而曲线 B 是用全部年径流系列绘制的。通过对图 3-4 和图3-5的比较得出，在天然的、不受人为干扰的研究时期内，重现期小的年洪峰流量应是较小的。图 3-5曲线B 可证实这一点。

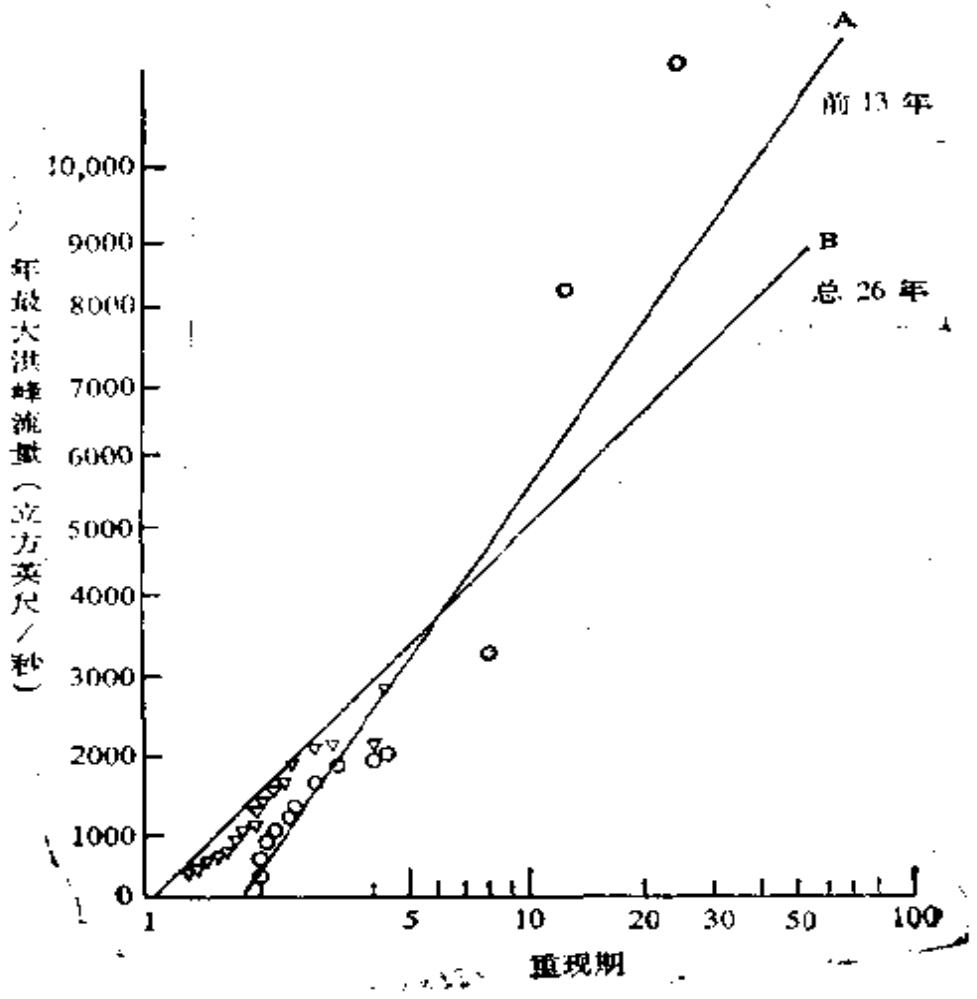


图 3-5　玛伦德地区帕图克森脱河尤尼蒂以上流域洪水的重现期

§3.7 统 计 技 术

推理的统计方法可以分成参数和非参数两种(鲁尼恩和哈伯，1968年)，其基本概念实质上是相同的，都是以总体的一个样本作统计检验，并假设该样本代表总体。由于参数检验的条件十分严格，稍有不符，就可能导出错误的结论。迈克可恩和杰姆斯(1972年)提出在城市水文研究中宜应用条件较宽松的非参数统计法。他们认为，在大多数情况下，城市地区可取得的资料是有限的，应用参数检验，至多也只能得到不可靠的结果。然而，研究人员必须明确应用统计方法的基础是随机性。为了能(在经常发生洪患的情况下)保证人民的安全，研究者应当选择最安全的设计条件，应用统计学得出近似的而非绝对的结论。

实例研究

在§3.1的讨论中对传统方法进行了改进，如比拟流域法，前后期对比法等。拉扎罗把这些方法应用到东北支河流域和帕图克森脱流域(见§3.1 和§3.6)。

应用"威尔科克森马切德—带正负符号的秩检验(Wilcoxon Matched-Pairs Signed-Ranks test)"来考查以上两流域年洪水系列的中心趋势变化。用以检验的零假设是：

零假设：将年洪峰系列分成二半，其正秩部分和负秩部分的差值为零。

将每一个流域记录的时段一分为二，在表 3.6 和 3.7 中年洪峰流量按大至小排列在第 1 和第 2 两列，第 3 列是第 1 和第 2 列数值的差，最后一列为秩，若第二时段记录的洪峰比第一时段大，则秩的差为正，反之则为负，统计值 T 为带符号的正秩或负秩总和的较小数。比较统计值(T)和临界值(T_C)就可确定中心趋势是否有显著性差异。$T_C>T$ 表示大多数较大秩的值与这个时间段的值相符合，因而应期望中心趋势有差异。有 15 对观测资料的东北支

河 $T_C=16$，有 13 对观测资料的帕图克森脱河的 $T_C=17$，两者在显著性水平为 0.01 的情况下临界值均超过 3(西格 1956)。

表 3.6 和表 3.7 的检验表明东北支流 $T=0$，而帕图克森脱河 $T=3$，因此，这两个系列就不接受零假设。两个年洪峰系列中心趋势变化是有的，只是帕图克森脱河有负变化，而东北支河有正变化。

表 3.6 威尔科克森，马切德—带正负符号的秩检验应用于东北支河 1939～1969 水文年度的年洪水系列

1939～1953(Qp)[a]	1954～1969(Qp)[b]	差值	正秩	负秩
3680	5660	1980	15	
3660	5060	1400	14	
3000	4080	1080	13	
2980	3400	420	1	
2770	3300	530	2	
2350	3240	890	11	
2280	3120	840	9	
2060	2870	810	8	
1980	2830	850	10	
1820	2510	690	5.5	
1780	2470	690	5.5	
1660	2340	680	4	
1350	2310	960	12	
1280	1940	660	3	
889	1670	781	7	
		总和	=	0
		T	=	0

表中：Q_p^a、Q_p^b为最大年洪峰流量。

1956 年无洪峰资料，因此第 2 列共 15 年资料，1969年洪峰流量被列入。

(拉扎罗，1976年)

表 3.7　威尔科克森，马切德——带正负符号的秩检验用于帕图克森脱河1944～1969水文年度年洪水系列

1944～1956(Qp)	1957～1969(Qp)	差　值	正　秩	负　秩
10700	2920	7780		13
8060	2290	5770		12
3490	1800	1690		11
2220	1590	630		8
2200	1490	710		9
1920	1340	580		7
1830	1090	740		10
1300	934	366		6
1240	920	320		5
1100	828	272		3
1080	788	292		4
494	716	222	2	
240	446	206	1	
		总和	= 3	
		T	= 3	

（拉扎罗，1976年）

两个流域洪峰中心趋势产生变化，可能由于以下二个原因：(1)降水量变化，(2)流域内的水文过程变化。帕图克森脱流域在整个研究阶段内土地利用维持不变，因而不考虑水文过程的变化，该流域洪峰中心趋势变小的倾向，可以假定是由于天然暴雨变小而引起的。

将该方法应用于东北支河的降雨记录。首先把当年洪水系列相应的暴雨资料列出，然后，以威尔科克森，马切德—带正负符号的秩检验法检验暴雨的中心趋势方向，结果列于表3.8。

零假设：将年暴雨系列分成两半，其正秩部分和负秩部分的差值为零。

我们观察到中心趋势的负变化(显著性水平为0.01)。将表3.8

表 3.8　威尔科克森、马切德——带正负符号的秩检验应用于东北支河流域引起洪水的年暴雨系列

1940~1955	1956~1971	差　值	正　秩	负　秩
7.7	5.4	−2.3		
7.0	4.6	−2.4		
6.1	4.3	−1.8		
5.2	4.3	−0.9		7.5
5.0	4.1	−0.9		7.5
4.5	3.5	−1.0		9.5
4.3	2.8	−1.5		
3.8	2.6	−1.2		
2.9	2.5	−0.4		5
2.6	2.4	−0.2		2.5
2.3	2.1	−0.2		2.5
2.2	2.1	−0.1		1.5
2.1	2.0	−0.1		1.5
2.0	1.3	−0.7		6
2.0	1.0	−1.0		9.5
		总和	= 0	
		T	= 0	

1. 上表中暴雨数据系由流域内或流域周围三个或三个以上雨量站的资料算术平均求得，由于流域面积较小，只有 72.8 平方英里，所以平均降雨量的计算提供了要求的精度。
2. 注意 $T_C=15$(0.01显著性水平)。

(拉扎罗，1976年)

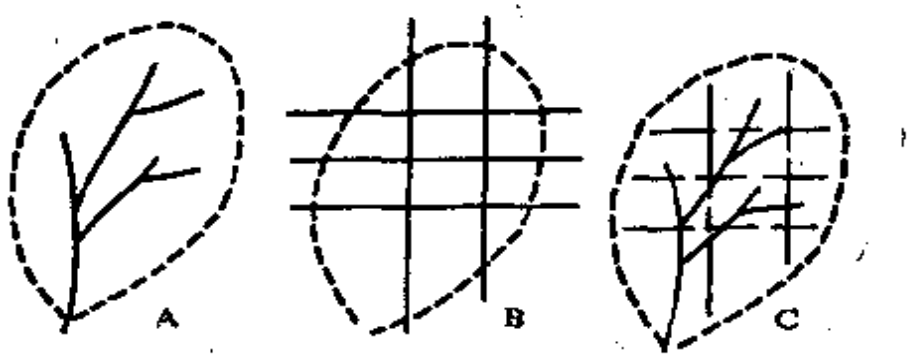
与表3.6的数据进行比较，说明暴雨减小了，而洪峰流量却增加了。应用这种非参数统计检验使我们了解到东北支河流域内的水文过程(主要是径流)确实已经改变，这一点由零假设被拒绝(显著性水平 0.01)而得到证明。

§3.8　城市化的河道

格拉芙(1977年)在研究市郊区河流中发现，城市化发展，往往

在先已存在的天然河网中增加了许多人工河道，郊区的河网中，一部分是天然的、另一部分是人工河道。

图 3-6 说明了格拉芙的观察。舒尔茨和劳普兹(1974年)仔细地调查了城市地表的排水后指出，乡村和城市的行车道建在高于周围环境的某一个高度上，而四邻的街道却建在低于周围的某一高度上，这就使街道起了排水道的作用。通常，街中心有一个路拱，水就朝向两旁的边沟排出。



图中，A 为原始河网，B 为由于城市化而建造的街道、边沟和排水道，C 为部分天然，部分人工的总河网。

图 3-6 假设的市郊区河网的排水网络变化

(《水资源研究》，格拉芙，1977年)

格拉芙总结地表排水改变的作用时指出，河道网络的变化大大加快集水的效应，因此，暴雨流量过程线的峰度和洪水滞时发生变化，从而使城市地区易产生暴发性洪水①。

利奥普德等(1964年)提出，根据当地的气候和下垫面的情况，河槽随着时间的推移，可将其槽容量调蓄到满槽流量，这流量相当于重现期约为 1.5 年的洪水。城市土地表面的变化使河流径流的频率和数量增加，加速河床的淘刷并增加了槽容量。哈默(1975年)调查了费城附近 78 个小流域的情况，其中 28 个流域只含有农村土地利用。他得出了农村流域河槽横断面积与流域面积之间的经

① 格拉芙(1977 年)在他的结论中告诫水文学家，不要只考虑不透水表面的威胁，而忽略与排水网改变有关的一系列同等重要的问题。

验关系(相关系数为 0.87)。

$$C'=24.8A^{0.657},$$

式中：C'为河槽横断面积(平方英尺)，A 为流域面积(平方英里)。

城市河槽的扩大率(R)是实际河槽横断面积(C)与未城市化河槽面积期望值(C')的比例：

$$R=C/C'=C/24.8A^{0.657}。$$

哈默在其研究区域内发现大多数河流的资料所呈现的河槽断面扩大率在 1.0～2.0 之间。

但利奥普德(1973年)却报告了他不同的研究成果，在玛丽伦德、洛克维尔、瓦茨支流上的一个 3.7 平方英里面积的流域内，于 1953～1972年的 20 年中，由于城市化而引起了河槽演变，他发现，尽管漫滩水流引人注目地增加了(自每年二次到十次以上)，但平均断面积在整个研究期内却减少了20%。

霍里斯和卢基特(1976 年)也报告了 1956 年至 1970年间河床形态变化的结果。在研究期内，英国哈洛，艾萨克的佳能河流域内有 18% 的面积作了铺砌，他们应用一种参数检验的方法得出：在1956～1970年间，虽然月平均洪水、洪水总量和其它洪水要素的大小和频度都增加了，但河床的形态却没有统计上的显著性变化。

拉扎罗曾研究了东北支河各支流的横断面(1977年)，也发现了有关研究人员所观测到的类似的无规律性。他认为，城市化，特别是短期的城市化增加了河槽的变异性(如，研究河段的宽度、深度、横断面积等的变化)，但由于洪峰流量的增加而引起的冲刷、淤积和全河槽扩大等，在不同的地区似乎是以不同的速率进行的。

拉扎罗于 1977 年作了以下总结，在城市土地利用变化和河流结构参数变化之间存在着密切的关系，而河流结构参数的变化又直接影响到存在于流域内大块地表结构的变化。因此，河流结构参数可以用来作为测定流域自身较大范围内发生变化的尺度。

拉扎罗把东北支河流域(§3.4 和§3.5 已作介绍)分成六个子集水区，如图 3-7 所示，有些集水区是用来作控制区的。他仅收集

了这些区的横断面资料，而且也收集了粗粒河床质①的分配及其中值资料(拉扎罗，1978年)②。按照确定的标准，选择了十三个地点。计算这些位置的横断面，测量100个粗粒的中值轴线，并在每个位置上绘制直方图。图3-7、表3-9显示了每个断面上游的土地利用情况。

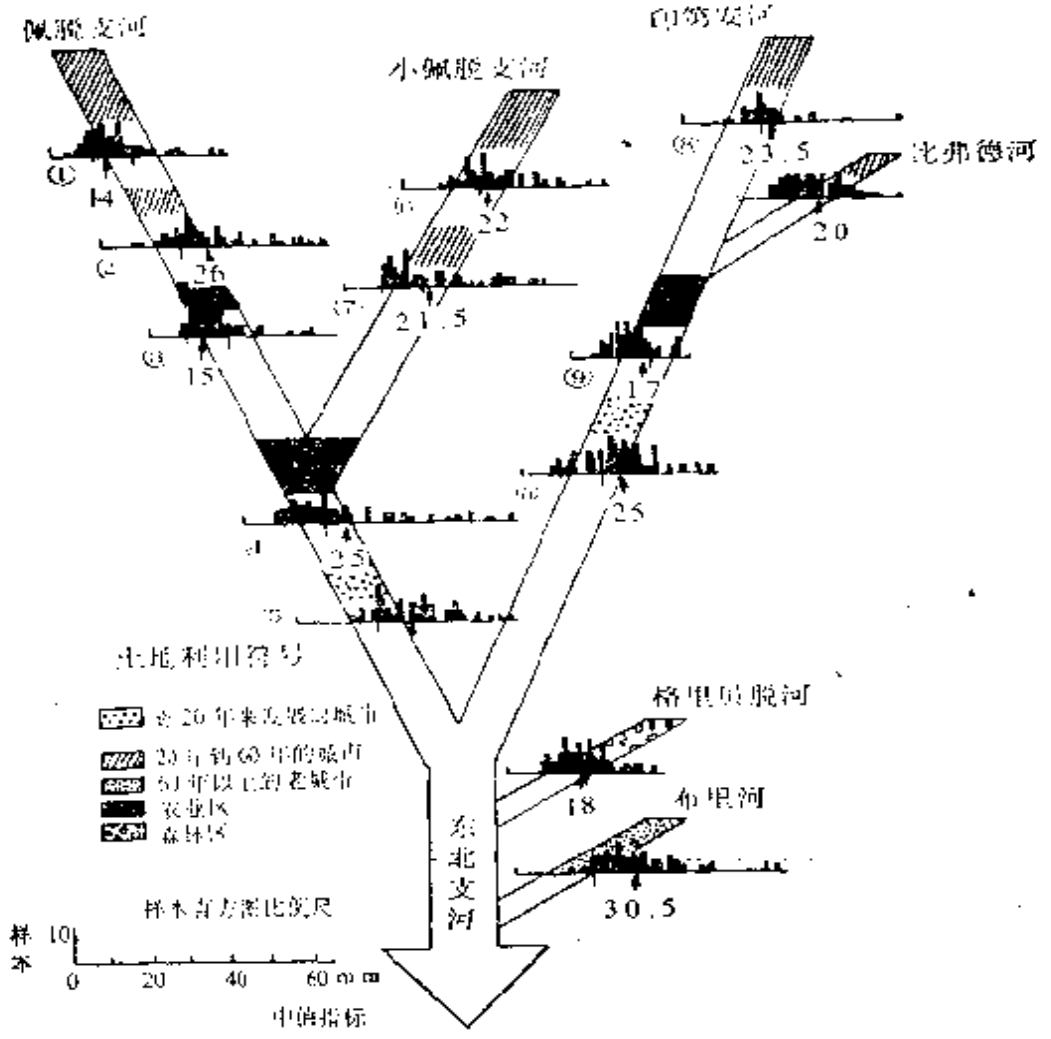


图 3-7　粗粒河床质中值轴线直方图
(拉扎罗，《城市河流结构分析适用技术》，1977年)

① 粗粒河床质是河床上找到的小砂砾—大卵石尺度物质。
② 拉扎罗在这篇论文中详细地描述了资料收集和分析的方法。

表 3.9 东北支河支流的横断面积

河流横断面	断面以上流域面积（平方英里）	横断面积（平方英尺）
佩脱支河(1) (Paint Branch)	6.7	431
佩脱支河(2) (Paint Branch)	10.5	429
佩脱支河(3) (Paint Branch)	13.3	142
佩脱支河(4) (Paint Branch)	23.3	356
佩脱支河(5) (Paint Branch)	26.2	330
小佩脱支河(6) (Little Paint Branch)	7.0	80
小佩脱支河(7) (Little Paint Branch)	8.3	130
比弗德河 (Beaverdam Creek)	6.5	60
印第安河(8) (Indian Creek)	6.8	76
印第安河(9) (Indian Creek)	23.0	141
印第安河(10) (Indian Creek)	26.7	288
布里河 (Brier Ditch)	3.9	312
格里贝脱河 (Greenbett Creek)	2.9	77

a. J.O.杜罗阿纳科西亚河东北—西北支河，1973 年。

b. 根据不规则四边形计算流域面积。

c. 表源：拉扎罗的《城市河流结构分析适用技术》，1977 年。

拉扎罗得到以下结论：

1. 从集水区收集的资料来看，农田和农田-城市混杂的土地利用显示出直方图的离散度较小、中值较小，河流横断面积随着流域面积的增加而增大。

2. 布里河流域是研究中最老的城市，以它与格里贝脱河流域相比较，离散度最大、中值最大，由于流域面积不算大而横断面积

最大。

这些指标表明城市土地利用改变的程度和密度直接影响河槽有关结构的变异性。较近期土地利用变化剧烈，则直方图离散较宽，粗粒河床质中间轴线的中值较大。支流的横断面积较不规则。

第四章　城市化与河流水质

§4.1　天然河流的水质

天然河流中水量和水质的关系

很多水文和水力要素都是不稳定的。它们对河流系统的水量有直接的作用，并且影响到水质。例如：河流的流速、水深和过水断面面积与其下的地质情况直接有关，在河底地层的侵蚀过程中，许多(地球)化学成分进入了河流系统。径流也会带来无机物和有机物。水量的变化，诸如洪水或枯水，就会导致各种成份浓度的变化，进而改变水质。从一个地质时代来看，水质的这些变化仅仅是一瞬间的事。然而，它们能极大地改变河流系统中的生物区系。因为只要极短的时间就会使植物区系和动物区系遭到严重的损害。

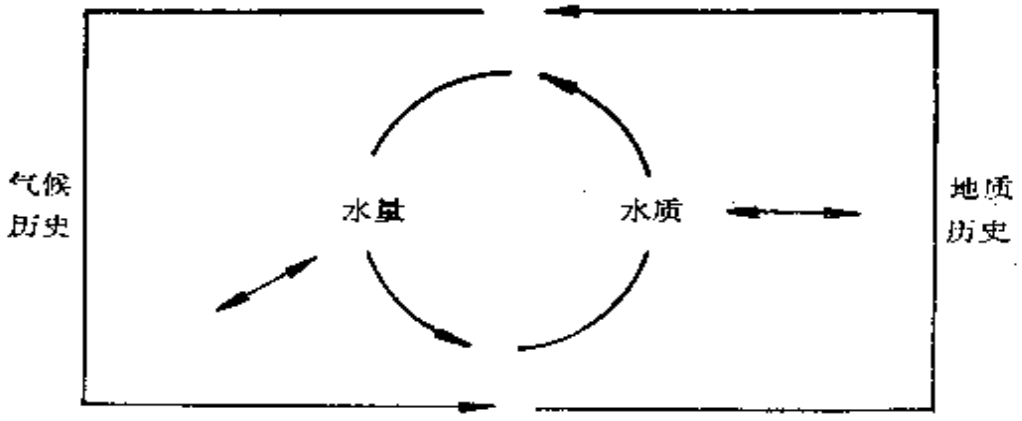


图 4-1　气候和地质历史对水量和水质的控制

所有这些短期的水量与水质的相互影响最终都被区域气候和地质演变所控制(见图 4-1)。水量和水质之间的相互影响往往发生在地质和气候演变的特定时期。例如，一些溶解成分是通过水

来输移的。气候(降水)所给予的影响能使水比地质历史上的其它时期产生更强的侵蚀能力，这些水能暂时地使水质发生极大变化，并使河床受到严重侵蚀。

所以，当一个研究者在调查特定的河流系统时，他必须慎重对待地质、气候条件下的水量水质的关系。它们都相互作用，从而产生了一条独一无二的河流，并且只能与其它河流作一个粗略的对比。每条河流都把自己印刻在地质历史中，一般来说，每条河流本身具有本身的个性①。

河流的纵断面，由于一些前面提到的因素而印刻下来。每一条河流的纵断面都是独一无二的。然而，一般来说，许多河流的纵断面是下凹的，纵断面是许多水力要素对河流系统中的有效能量的不稳定调节的象征(兰格本和利奥普德，1964年)。典型的大河纵断面是从山地的源头开始，它跃过岩块，漫过砾石，直达山脚下，这里坡度较缓，流速减小(图 4-2)。在滨海平原，河流表现为平缓的曲线，流速更小，并出现细砂和淤泥的沉积。

维尔兹(1970 年)建议，根据河流环境卫生的要求，把河流大致分为两类：(1)深槽和急滩，这一类在前面已部分解释过；(2)规则的倾斜河底，多数河流一般发生在它的下游河段，人们通过仔细地考察河流的纵断面，可以发现一些裂点(图 4-2)。多半是由于地质不连续，也就是地质演变造成的。这些裂点就是急滩(浅的河段)和深槽(深的河段)的标志，也就是影响水质的最基本的重要因素。在急滩，机械增氧使该处的溶解氧增加。在深槽，流速大大慢于急滩，从而发展了不同类型的生物区系。

急滩和深槽是特定河流系统中生态现象的完整组成部分。汉尼斯(1960 年)指出：河流的流速和溶解氧是许多不同种群的水生动物和植物区系栖息地得以发展的关键因素。

---

① 在试图描述天然河流的研究者中，水生生态学家汉尼斯(1960年)总结道："河流是严格的独立个体，除了非常粗略地予以分类以外，每一条河流都有与众不同的特点。"

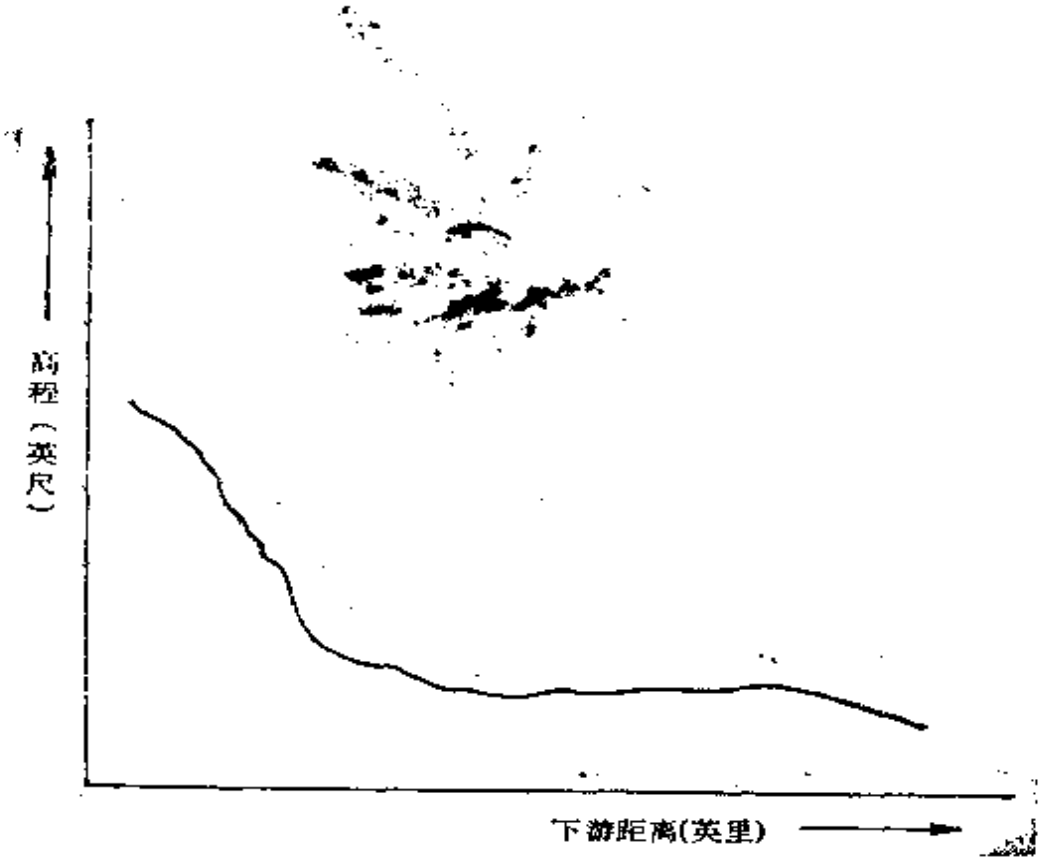


图 4-2　许多河流的下凹纵断面特性

以上是天然河流系统的一个相当概要的描述。从这些描述中，人们可以归纳出关于天然河流水质的概略定义，黑姆(1970年)观察到：天然水的化学成分由许多不同的溶解质所组成，其来源主要包括：大气中的气体和尘埃，裸露并遭侵蚀的岩石和土壤，在地表以下发生化学反应的溶解物或沉淀物，以及来自人类活动的文化影响。

我们从上面最后一行中可以看到，所谓"天然水"是受人类影响的。事实上，许多天然河流由于人们建筑水坝，开通运河，排放各种无机物和有机物及其它活动而大受影响。

为了确定"天然水"或"自由水"的涵义，人们必须明白，任何意义上的"纯水"是不存在的，至少以比较古老的标准来说是如此。事实上，自由水是一种稀薄的混合物和化合物的水溶液。

天然河流的实际水质

表 4.1 列出了亚马逊河，密西西比河的部分化学成分浓度和全球河流的平均值。从表上可以看出，河水确实是一种含有多种

溶解质的混合溶液。它随时间的推移而变化，并且与所流经地区的地球化学、植被和气候环境的变化有直接关系。

表 4.1 河水的部分化学成分浓度值

项目	1963. 7. 16①		1962.10.1～1963.9.30②		③	
	毫克/升	毫克当量/升	毫克/升	毫克当量/升	毫克/升	毫克当量/升
SiO_2	7.0		6.7		13	
Al	0.07					
Fe	0.05		0.04		0.67	
Ca	4.3	0.214	42	2.096	15	0.750
Mg	1.1	0.090	12	0.987	4.1	0.342
Na	1.8	0.078	25	1.088	6.3	0.274
K			2.9	0.074	2.3	0.059
HCO_3	19	0.311	132	2.163	58	0.958
SO_4	3.0	0.062	56	1.166	11	0.233
Cl	1.9	0.054	30	0.846	7.8	0.220
F	0.2	0.011	0.2	0.011		
NO_3	0.1	0.002	2.4	0.039	1	0.017
固体溶解质	28		256		90	
以$CaCO_3$计的硬度	15		155		55	
非碳酸盐硬度	0		47		7	
电导比(25℃，微姆)	40		421			
pH	6.5		7.5			
色度			10			
溶解氧	5.8					
温度(℃)	28.4					

① 亚马逊河巴西奥比多斯站，高峰流量 7,640,000 立方英尺/秒。

② 密西西比河路易斯安娜的路林·福瑞站(新奥尔良以西 17 英里)，每天的样本以时间作权数加以平均。

③ 世界河流水的平均成分。

毕沙克和雷菲斯特(1975 年)分析了分布在 37 个州的 57 个水文定位观测站的水质资料。每个站都经过精心选择，以显示出各个区域的"天然"河流的状况。他们找到了显示美国 14 个自然

区中的11个区溶解质浓度与单位流域面积产水量的相关曲线。所选用河流中最大溶解质浓度(见表4.2)、水源地区的硝酸盐浓度(见表4.3)、从各定位观测站收集来的杀虫剂资料表明，DDT族农药的检出率为75%。最高的出现次数大约为100次，低于美国联邦水污染控制管理局(1968年)所推荐的允许最高次数。少数的有毒金属浓度也很低，645次测定中约65%浓度值接近于零。仅三次超过美国公共卫生局(1962年)所推荐的饮用水标准。

表 4.2 水文参证基站的部分水文特征

站号 州	流域面积(平方英里)	自然分区	基本岩石类型	平均年径流量(英寸)	最大溶解固体浓度①
1 阿拉巴马	86.8	F		23	N.D.
2 阿拉巴马	91.3	C		26	70
3 亚利桑那	36.4	R	花岗岩	3	253
4 阿肯色	89.4	I	页岩 砂岩	23	48
5 阿肯色	58.4	H	石灰岩	19	186
6 加利福尼亚	6.5	T	海相沉积物	50	88
7 加利福尼亚	181	S	花岗岩	25	27
8 加利福尼亚	23.7	R	沉积变质岩	0.02	N.D.
9 科罗拉多	23	N	板岩	18	61
10 科罗拉多	72.1	N	板岩，砾岩	20	51
11 康涅狄	97.9	F	石灰岩	25	153
12 佐治亚	72.2	E	片麻岩，板岩	14	103
13 佐治亚	53.5	D	片麻岩，板岩	40	20
14 夏威夷	11.6	—	火山堆积物	N.D.	N.D.
15 爱达荷	22.0	M	石英岩	21	60
16 爱达荷	253	Q	火山岩	0.1	140
17 印第安纳	38.2	J	石灰岩	12	353
18 爱荷华	52.5	J	石灰岩，页岩	6	505
19 路易斯安那	51	F	未固结沙	16	48
20 缅因	69.5	A	片麻岩	34	25
21 密歇根	13.6	K	砂岩	13	139
22 明尼苏达	253	K	花岗岩，辉长岩	10	31
23 明尼苏达	101	J	石灰岩、砂岩	4	514
24 密西西比	52.2	F	未固结沙	20	20

续表4.2

站号 州	流域面积(平方英里)	自然分区	基本岩石类型	平均年径流量(英寸)	最大溶解固体浓度①
25 蒙大拿	100	L	页岩，砂岩	2～3	1,870
26 蒙大拿	31.4	M	石灰岩，石英岩	64	56
27 内布拉斯加	960	L	未固结砂	3	172
28 内华达	20	R	火山堆积物	3	94
29 内华达	11.1	R	石灰岩	5	203
30 新泽西	2.31	F	未固结沙	13	25
31 新墨西哥	69	R	火山岩	3.5	110
32 新墨西哥	53.2	N		7	72
33 纽约	59.5	C	砂岩	25	44
34 北卡罗来纳	49.2	D	砂岩	30	20
35 北达科他	74	L	砂岩，淤泥	1	3,420
36 北达科他	160	J	页岩，耕地	<1	1,220
37 俄亥俄	12.8	C	页岩，砂岩	15	83
38 奥克拉荷马	24.6	J	花岗岩	3～4	213
39 奥克拉荷马	40.1	I	页岩，砂岩	20～25	29
40 俄勒冈	26.2	S	安山岩	湖泊	
41 俄勒冈	240	Q	火山岩	25	57
42 宾夕法尼亚	46.2	C	页岩，砂岩	17	36
43 南卡罗莱纳	70	F	未固结沙	15～20	29
44 南卡罗莱纳	87	F	未固结沙	14	17
45 南达科他	51	J	页岩，板岩	1.5	292
46 南达科他	51	J	淤泥	1	N.D.
47 田纳西	447	G	火遂石	22	65
48 田纳西	106	D	页岩 砂岩	36	19
49 德克萨斯	52.4	R	火山岩	0.15	126
50 德克萨斯	34.2	L	石灰岩，泥灰岩	3	291
51 犹他	7.25	O		9～10	447
52 弗吉尼亚	8.53	E	板岩，石英岩	13～14	42
53 华盛顿	22.1	S	花岗岩	N.D.	N.D.
54 华盛顿	74.1	T	片岩	145	60
55 威斯康星	131	K	板岩，花岗岩	12	152
56 怀俄明	10	O	页岩，砂岩	19	207
57 怀俄明	72.7	N	花岗岩	16～18	56

① 最大值是在1968～1970水文年内观察到的，以月为样本。
② N.D.未确定。

表 4.3 水文定位观测站和不同水源区的主要河流河水的硝酸盐浓度(1968～1970水文年)

水源区	硝酸盐浓度(毫克/升)			
	水文参证站		主要河流	
	平均最大值	平均中数	平均最大值	平均中数
北大西洋	1.7	0.3	5.9	2.9
南大西洋-墨西哥湾	1.7	0.5	2.1	0.4
密苏里	4.9	0.4	7.4	1.0
阿肯色	1.0	0.2	16	1.9
哥伦比亚-北太平洋	1.0	0.2	6.1	1.0

天然河流中生物栖息地的分布①

亨特(1954年)把在美国的一些天然河流分为四个生物带：

(1) 鲑鱼带——急流，水温稍低，河水富氧，并且位于较陡的峡谷或山谷。

(2) 鳟鱼带——一次急流，有的河段流速较慢，当从陡坡流向平坦的山谷时，总是富氧的。

(3) 白鱼②带——流速中等，在宽广平坦的谷地有长距离的低流速河段，在那里如气温偏高，溶解氧会下降。

(4) 鲷鱼带——水流迟缓，类似于运河，溶解氧会降得很低，只有少数顽强的鱼类才能生存。

从以上叙述可以发现，河流的动物区系和植物区系是由水的综合特征，溶解氧浓度和水流流速所精细调节着的。伊顿(1977年)指出，三种生物组成的特征可以用来确定河流是否未受到污染，这就是多样性③、稳定性和自净作用。一个多样性很强的植物

① 尤辛格(1967年)解释，并讨论了有关生物栖息地的分布。

② 白鱼：一种欧洲产的大型四须淡水鱼。

③ 见阿姆斯特朗等人(1968年)所作的关于种群的多样性指标的精采讨论。

和动物种群组成，标志着一种健康的河水组成，花几分钟就能捕获两打以上肉眼可分辨的种群，而在显微镜下发现的微生物种类接近 100 种。这在大多数具有良好环境的天然河流中可以经常见到。如同连续提供一种能维持生命的水和溶解氧一样，流动的水含有有机物、无机物颗粒和营养物质，供给植物和动物。

多样性很强的动物区系和植物区系促进了河流生物组成的稳定性，并形成复杂的、能自我调节的生态食物链。如果某一种类的数量由于某种原因而减少了，其摄食者的数量也会随之下降，该种类从而得以增殖，并重新恢复原有的数量。在一次大洪水之后，原有的河流生物组成会迅速恢复，这种令人惊讶的恢复能力证明了自我平衡的存在。

伊顿所描述的第三种特征就是自净作用，他指出河流肯定从流域表面获得了大量的有机废物，另外，水生生物在死亡和腐烂时，对河流也是一大负担，这些物质进入食物链，并迅速地完全消失。

兰格本和特伦姆(1967 年)研究了河流的复氧能力，他们观察到：河流的氧化作用是河流的生态、物理和水力特性的函数，氧可以通过诸如水生植物的光合作用过程和流水的机械复氧过程而增加。

他们用一个简单公式表示了复氧速率：

$$dC/dt=K_2(Cs-C),$$

其中：C 为氧的浓度(mg/l)，Cs为在一定温度下氧的饱和浓度，t 为时间，K_2为复氧系数[引自斯居特-菲尔帕斯(1925 年)公式的第二个系数]。

兰格本和特伦姆还继续指出，对于给定的河流来说，水力特征对复氧系数(K_2)具有重大的影响，其关系可用下列公式大致地表示出来：

$$K_2=3.3V/H^{1.38},$$

其中：V 为河流的平均流速(英尺/秒)，H 为平均水深(英尺)。

当这个公式用于几个流域的资料时，就会发现近海平原的河流是平滑倾斜的，而人口稠密地区的河流复氧能力与河流流量的相关程度较低。

这里必须注意的是，部分天然河流可能受到"自然"污染①，汉尼斯(1960 年)指出："在森林茂密的地区，秋天的落叶会产生如此大量的有机物进入水体，以至鱼类感到窒息。"缓慢流经茂密林地的天然河流是自然污染水体的最典型例子。某些来自特殊地区的地球化学作用而产生的无机化学成分也可以出现在河水中，并使河水受到污染，例如，黑姆(1970 年)曾指出：在新西兰，由于饮水中含有砷而导致牛群出现死亡。

§4.2 未处理污水对河流水质的影响

巴茨克(1984 年)指出：污染物一进入河流，在下游的河水中就开始发生一连串的物理、化学和生态事件，污染物的性质和数量决定这些事件的特性。

为了说明污染物对河流系统的大致影响，在这一节里，我们将简单地讨论未处理污水对一条假想河流的影响。

在刚进入河水以后，污水② 对细菌来说无异是丰盛的食物，并使它们的数量呈指数增长。当它们繁殖时，需要大量的溶解氧。例如，它们会产生很高的生化需氧量(BOD)，并使河流中的溶解氧急剧下降。

斯托克和西格(1972 年)曾证明高 BOD 负荷产生的原因，是碳素的污染(这是污水中的基本现象)，这可以由一个简单公式说明：

---

① 斯托克和西格(1972 年)定义污染为对一种状态的偏离，这种状态与其说是"纯的"，不如说是"正常的"，正常的水被定义为，它含有的任何物质都具有正常的浓度，不足以妨碍水的用途。

② 见佩因特(1971 年)对未处理污水的描述。

$$C+O_2 \rightarrow CO_2。$$

由于细菌的作用，使碳氧化为二氧化碳，即反应从左向右进行(见图 4-3)，在这个过程中，每氧化 12 克碳就需要 32 克氧，正如斯托克和西格解释的："这种反应的数量比例就是一加仑(3.8 升)水中的溶解氧与一小滴油。"因此，溶解氧就会以这种形式迅速降低。

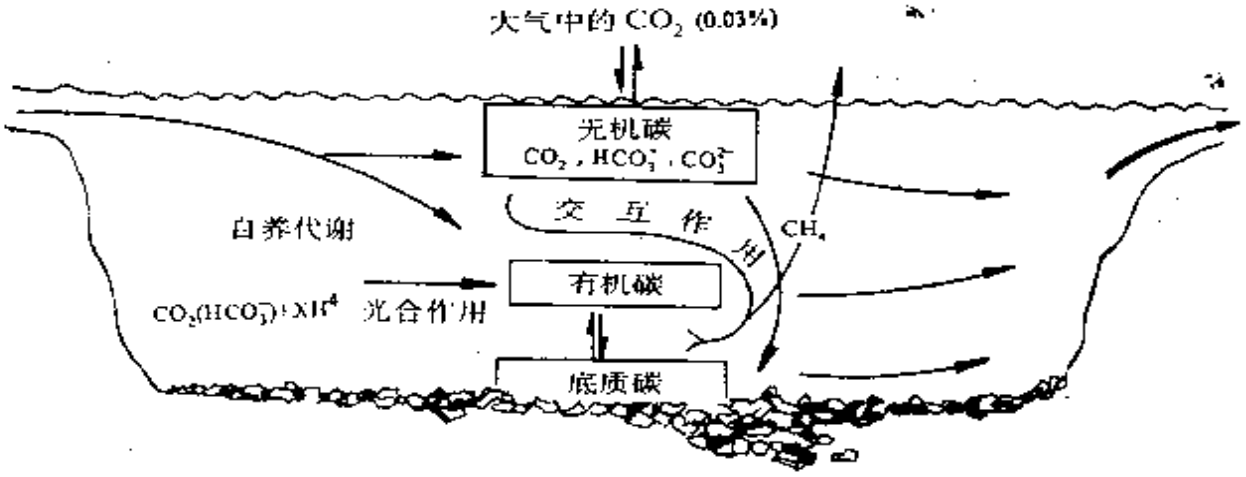


图 4-3 碳循环的示意图(科尔，1972 年)

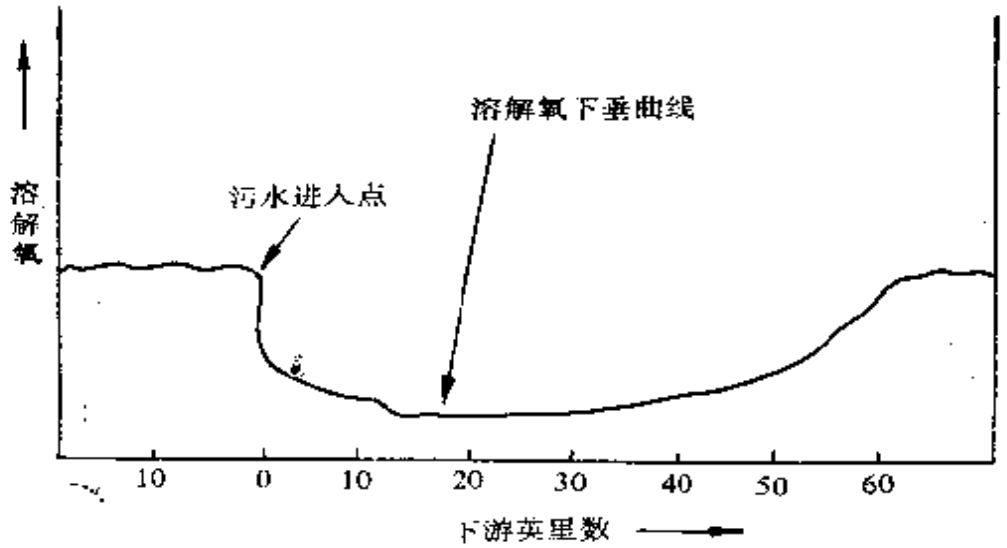


图 4-4 溶解氧下垂曲线

如果有人沿着河流向下游在不同的地点测定溶解氧，那么，他将得到一条溶解氧下垂曲线，如图 4-4 所示，从污水进入的地点(在 0 英里处)之前到下游 15 英里处，细菌的分解以氧化作用为主，从 15 英里到 30 英里，细菌的分解一般是以厌氧作用为主，再

往下，氧化作用就恢复，我们现在就简单地讨论所涉及到的化学部分。

好氧细菌的分解作用

特克等人(1974 年)定义的氧化作用如同空气中的好氧分解一样，对于一定重量的营养物质来说，这个放出大部分能量的过程可以用下面的反应来说明。

$$C_xH_yO_2N_qS + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + NH_4^+ + SO_4^{2-}$$

一般的蛋白质分子　　铵离子　硫酸根

+4100 卡/克蛋白质

上面这个反应是典型的污水被细菌氧化的第一阶段，称为"碳化"阶段。在这一阶段，BOD 对水体的影响可以用这个公式(赞诺涅，1967 年)进行计算：

$$Y_t = L(1 - 10^{-kt})。$$

其中：Y_t为在 t(天)时段内所消耗的氧，用mg/l表示(通常与BOD有关)；k 为第一反应速度，单位是 1 /天(水温是控制性因素)；L为碳化或第一阶段的最终需氧量，单位是 mg/l。

在这个阶段完成以后，有机的营养物质就耗尽了，其他的好氧细菌就轻易地氧化铵盐并产生能量，就像下面的例子。

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow 2H^+ + H_2O + NO_3^- + 4350\text{卡/克·氨根}$$

铵根　　硝酸根

这个过程被称为硝化作用(特克等，1974 年)或 BOD 作用的第二阶段，其反应速度与第一阶段无关。

考谦(1968 年)在密歇根州的格兰德河朗欣站研究 BOD 硝化(硝化作用)过程(图 4-5)，他的结论与萨诺涅和其他人的结论对比，证明了 BOD 的碳化和硝化是同时发生的。然而，他发现反应速度是不同的，在最初的六天里，碳的氧化速度超过硝化速度，以后则是硝化作用占优势。考谦指出(参见图 4-6)，BOD 硝化曲线可以分为两个时段或阶段：(1)硝化缓慢阶段，在这一阶段细菌发生增殖，并达到最高数量；(2)在最初的增殖完成以后。

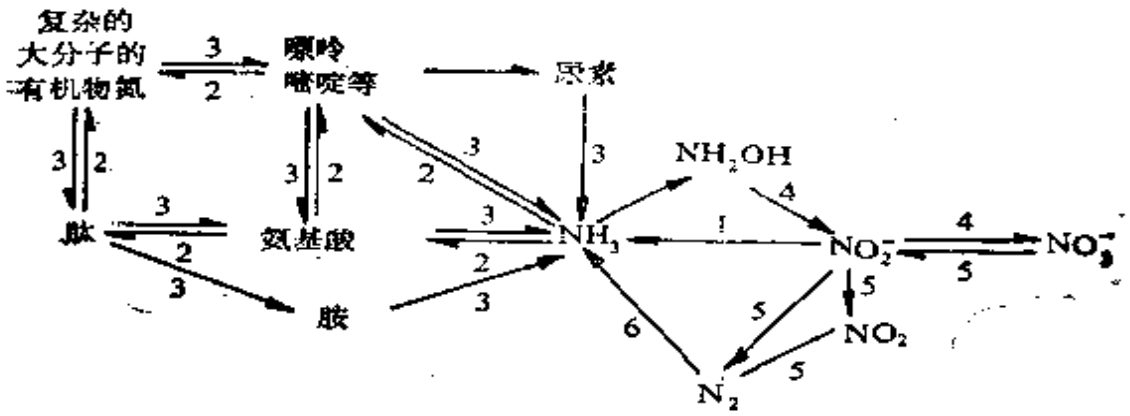


图 4-5 揭示主要分子变化的氮循环简图

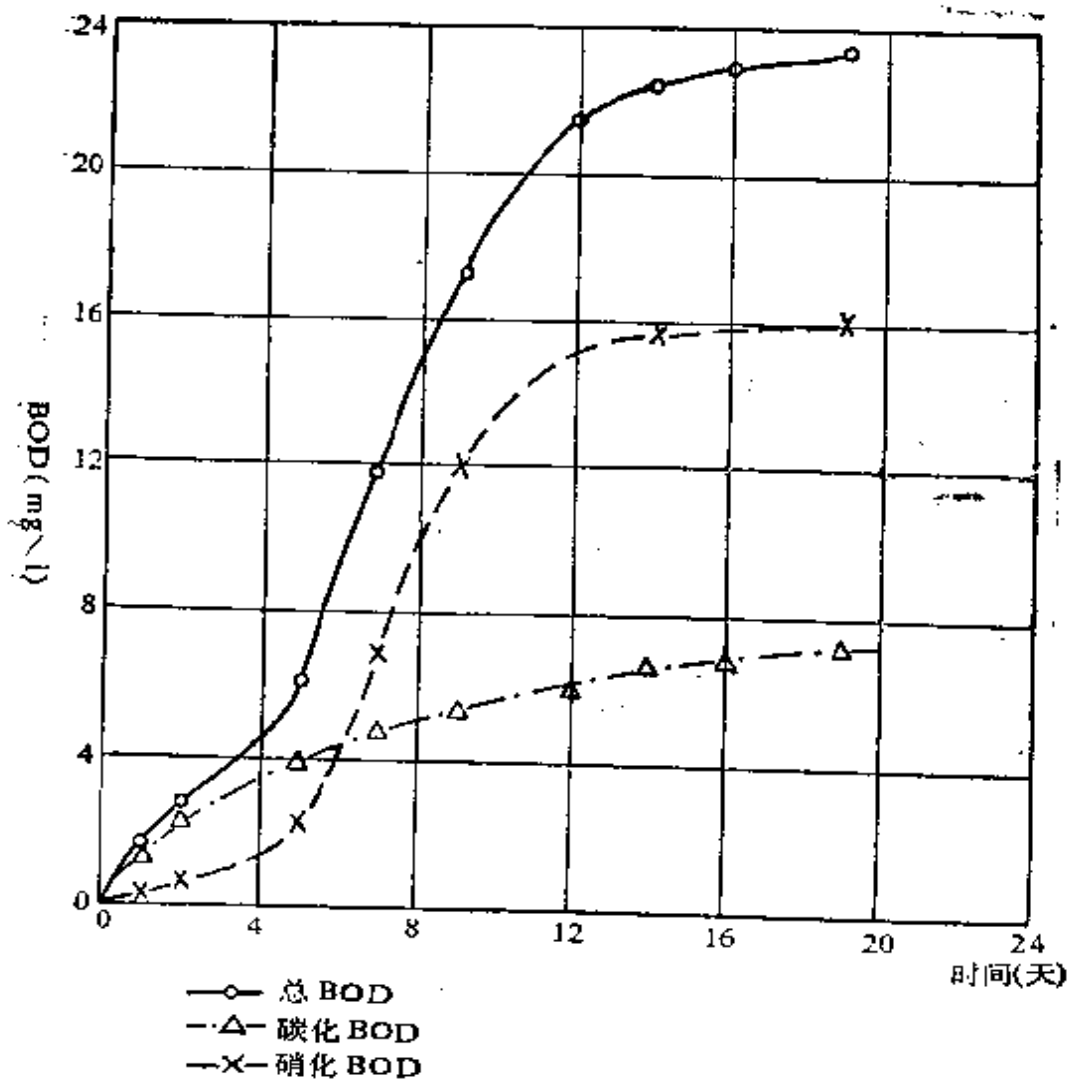


图 4-6 格兰德河 BOD 曲线，运河路-代尔他山(考谦，1968 年)

硝化缓慢阶段可以解释为与某些种类细菌对能量的需求有关，异养菌从有机物中得到能量，并氧化碳化物，正如考谦所指出的，它们由广泛的不同种类的细菌所组成，其最适宜生长的温度是18℃～25℃。

如上所述，氮的氧化是由好氧细菌进行的，它们从氨的氧化过程及其产品中获得能量(图 4-5)，这些细菌被称为自养菌，自养菌利用无机化合物的方式见下面的方程式(鲁安和克伦 刻尔，1978年)，

$$NH_4^+ + (3/2)O_2 \xrightarrow{\text{亚硝化菌}} NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

和

$$NO_2^- + (1/2)O_2 \xrightarrow{\text{硝化菌}} NO_3^-。$$

亚硝化菌和硝化菌最适宜生长的温度是25℃～28℃，考谦通过对他试验样品的观察，也认为平均值在25℃～28℃①之间。因此，他认为这是硝化缓慢阶段产生的基本原因，而BOD是由于碳化过程和硝化细菌的氧化作用而造成的。另一个可能同样重要的因素是，这时存在着硝化细菌污染。考谦提到有部分河流可能缺乏这个现象，这就部分地解释了为什么过去的研究者观察到两个分离的BOD峰值。

厌氧细菌分解作用

在图 4-4 上的15～40英里范围内，溶解氧大大下降了，细菌的分解便具有厌氧的特点，正如特克等人(1974年)指出的，这种分解不能产生好氧分解那么多的能量，但能量仍有富余。糖和碳水化合物的厌氧分解称为发酵，被证明是这样反应的：

$$\underset{\text{葡萄糖}}{C_6H_{12}O_6} \rightarrow \underset{\text{酒精}}{2C_2H_6O} + 2CO_2 + 100 \text{ 卡/克·糖},$$

蛋白质的厌氧分解称为腐败，可以证明是下面的反应过程：

---

① 考谦(1968年)在朗欣观察电厂排放的冷却水热流进入河流的情形时得到，1960年8月间平均达到150亿英国热量单位/天。

$$\underset{\text{蛋白质}}{C_xH_yO_zN_qS} + H_2O \longrightarrow NH_4^+ + CO_2 + \underset{\text{甲烷}}{CH_4} + H_2S$$

$+370$ 卡/克蛋白质，

碳水化合物可以转变为甲烷①：

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 3CH_4 + 3CO_2 + 220 \text{ 卡/克·糖。}$$

腐败使水冒泡并产生难闻的气味，这主要是硫化氢、甲烷聚集在阴沟里。由于可能引起爆炸而变得危险，不用说，达到如此地步的河流，要作为风景那是难以想象的。

未处理污水改变了河流的生态特征

我们已经简单地阐述了水污染化学的过程。现在再对河流污染的后果进行简要的考察，以下是巴茨克(1948 年)、巴茨克和英格拉姆(1950 年)的论文中所叙述的。按照图 4-4 从 0 英里至 40 英里，微生物由于污水中的营养物质而得到很大的增加，这一河段内的水生生态条件被破坏了。用不了多久，许多种有机体都会发现自己处于一种新的不合适的生活条件下，因而产生死亡，或逃到一个新的栖息地去，而细菌占了优势。一个低溶解氧水域，或者说一个退化的，分解旺盛的地带产生了。从城市的下游 10 英里处开始，到以下的 20～30 英里地段中，溶解氧几乎为零。在这些地方，BOD② 超过了大气溶解于水所提供的溶解氧(因为幸存植物的光合作用几乎为零)。这种腐败区域由于细菌、食细菌的原生动物和其他的有机体而产生，它们必须通过载氧化合物的厌氧分解或作出特殊的适应才能获得所需要的氧。达到这种情形通常(或部分的)是由于硝酸根、亚硝酸根和硫酸根的减少。

鼠尾蛆、污泥虫、红虫和其他动物特别适宜于污泥环境。例如，

---

① 米诺埃特(1971 年)观察到一种经常出现的厌氧微生物反应，该反应能把有机质分离成二氧化碳和比碳水化合物更低级的分子，如这个方程式所说明的：$2CH_2O \rightarrow CO_2 + CH_4$(甲烷)。

② 维尔兹(1970 年)讨论了 BOD 的盈亏，并对 BOD 的概念作了非常精彩的描述，详见第四章：生物自净作用。

鼠尾蛆有一个像潜水艇通气管一样的长柱状气囊，能延伸在水面上呼吸空气中的氧气。因此，肯定减少了一部分溶解氧的消耗。这些动物都是耐污的，由于同一个原因，又成为污染水域的指示生物。

纤毛动物和细菌之间存在着摄食关系，这是一个重要因素。因为细菌在适宜环境下会迅速的增殖，但又不能维持一个稳定的惰性数量水平。凶猛的进攻性的原生动物使细菌维持在一定数量水平下，这时，细菌能最有效地分解污水，巴茨克和英格拉姆确认：这就是污水在河流中迅速消失的原因之一。

在腐败的地区内，微生物通常会累积成为厚实的菌落。这些被汉尼斯(1960 年)称为污水真菌。事实上，只有少数微生物是真菌。有些是细菌和其他动物，厚实的菌落可以是棕色，白色、黄色或粉红色的，并附在泥沙表面形成毯状菌落。当它们死亡时，通常发生难闻的气味。

河底在最靠近污水排放的地方污泥沉积最多，污泥的厚度沿程减小，污水被泥土覆盖。在这种条件下，各种细菌也减少了，无脊椎动物，如鼠尾蛆在这里找到了适宜的栖息地。

极少有藻类能占据这种含有浮渣，固体悬浮物的低劣水域，甚至讨厌的蓝绿藻及底生种类在这种河段都很少。

当人们向下游前进，就会发现溶解氧下垂曲线开始回升，污染的指示生物在数量上开始减少，纤毛动物吃食细菌，而成为轮虫的食物，而轮虫又成为甲壳动物的食物，等等。事实上，上游会重新提供清洁水源，从而耐污的植物、动物的生长受到了阻碍，漂浮在清洁水流中的绿藻和其他植物又会重现，呼吸作用，光合作用和复氧过程的恢复，又提供了一个健康的水生生态环境。

§4.3 城市污染的来源

一般认为，污染源可以分为两大类：点源和非点源。点源的

例子，可以是市政下水道系统的出口，或工厂直接排入河流的出口，这些污染物造成的"排放点"可以方便地观察并确定之。而非定源的污染是由一个较大区域的污染物构成，它们的来源不容易确定，并因此不容易控制，例如：泥砂、酸性矿物废水、城市径流。

联邦水污染控制条例 1972 年修正案(公法，92—500)提供专款，并创建水质管理规划，该规划用于降低城市和乡村的点源污染，并制定相应的点源污染标准。这条法令及其影响将在第六章中予以讨论，这里不加评判，点源污染也同样不予讨论。根据韦伯尔等人(1974 年)和拉特萨乌尔等人(1975 年)的看法，非点源污染是更难控制的，对城市水质具有最大威胁。这里，我们就这一问题进行讨论。

在过去，相对来说地球上的人口稀少，并且很分散人们几乎可以在任何地方处置他们的有机和无机垃圾，自然因素可以轻易地降解和同化这些圾垃。在过去的两个世纪里，出现了规模空前的人口迁移，在城市地区产生了高密度人口群。与此同时，工业化也同样迅速地发展，随着人口的巨大增长，这些高度集中的人群产生的垃圾山远远超过了区域环境的容纳量，再加上工厂和工业革命造成了许多新的、需要很长时间才能被降解的废物。总的来说，城市分布的密度和发展趋势已经造成了很多环境问题和生态问题。

美国公共事业协会(1969 年)对街道杂物或垃圾作了如下定义："逐渐累积在街道、人行道或路边沟旁，能被清除的物质。"① 垃圾包括公众不注意时剩余的、私人积存的废物，动物和鸟类的泄落物，土壤冲刷或地表侵蚀的泥沙，建筑材料碎屑，汽车运输中摔下的、碰撞的、冰冻作用或其他作用造成的碎屑，空气中飘落的灰尘，从开敞地区和大堆辅助材料上被风刮来的灰尘。

图 4-7 说明了城市非点源污染的来源，外来的灰尘会进入城市系统，有些灰尘是来自几千英里以外的微粒沉积物。萨特和博

① 由于本章的需要，我们将扩展该定义，认为：街道垃圾不仅包括街道地表上的，而且是整个城市表面上的。

伊德(1977 年)认为：街道地面沾染物中，相当大部分的微粒物质会产生水体污染，这些微粒的大小恰好使它们能够被气流输送，首先降落在街道表面。然而，城市灰尘的绝大多数是本地产生的。灰尘可以有各种化学成分，凯洛格等人(1972 年)讨论了从空气中沉积下来的各种硫化物。

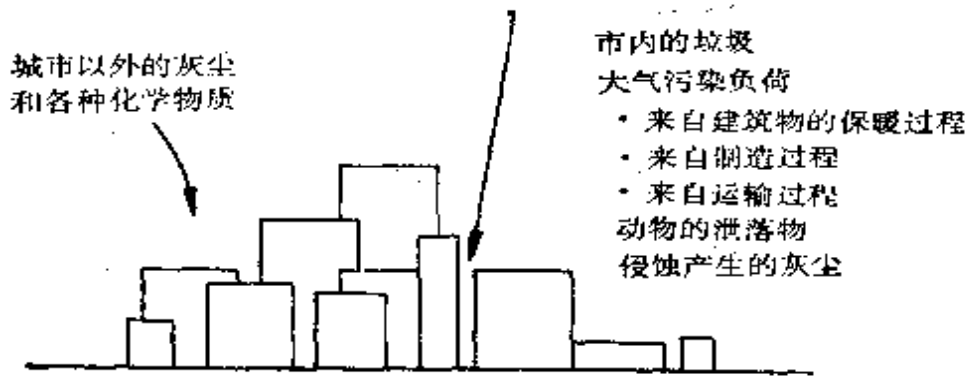


图 4-7　城市非点源污染物的来源

盖贝尔和菲希尔(1966 年)观察了弗吉尼亚州的东南部和北卡罗莱那州共 34,000 平方英里上的降水组成，他们观察的内容有 Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NO_3^-, SO_4^{2-} 和 Cl^-。他们观察到：如果包括碳酸氢盐，那么几乎河流中一半的溶解质是来自降雨的，降雨使河流增加的硝酸盐和硫酸盐比河流夹带的要多。特伦姆(1971年)认为降雨提供了河流负荷的氮化物的四分之一。所以，化学物质中外源性空气飘落物是有相当数量的。

来自城区的各种废物包括：由燃烧而造成的碳氢化合物和各种气体，工业制造过程所产生的各种微粒，交通工具排放的碳、硫和铅的化合物，动物的泄落物，以及来自城市和天然地表侵蚀而产生的灰尘及落叶等等。

韦伯等人(1966 年)和洛尔(1974 年)提供了关于城市降水的物质组成的资料，韦伯等人发现氮、磷、固体悬浮物和 COD(化学耗氧量)与生活污水中的浓度相比则较低。洛尔指出，降水中硫的浓度最大值出现在城市工业区附近。劳肯和哈里逊(1977年)讨论了由于大气降尘而分散稀释了汽车在公路和街道上排放的铅的现

象。总的来说，城市降水和空气的化学组成表明，污染物总量中重要部分，是由城市垃圾的大部分无机物和有机物混合而成的①。

欧弗顿和米朵(1976 年)把城市工地利用模式划分为五种基本类型：(1)建筑类，(2)工业类，(3)商业类，(4)公路和街道类，(5)住宅类。建筑活动早已被认为会对河流水质产生一种短暂但又明显有毁灭性的冲击。建筑过程有以下几个步骤：(1)工地准备，如清理和挖掘，(2)爆破，(3)拆除，(4)开凿，(5)切割和灌注，(6)封闭和安装。在工地准备阶段，侵蚀会大大加快，河流将充满泥沙(盖伊，1963 年；沃尔曼，1968 年)。在以后的阶段，灰尘将会产生，机器会溢出油和润滑剂，建筑材料的渗漏或腐蚀会产生无机废物，而垃圾和废弃的食物会产生有机废物。

许多工业都会对由暴雨所致的水质产生明显的影响，露天堆放的原材料，经雨水冲刷，将因渗漏而产生污染物。由于疏忽造成使用材料的外溢，管道系统的渗漏都会带来这一问题。输气过程也会由于降尘或冲刷而使水质变差，工业污染物，如毒物、气体和重金属会对所接受的水源产生严重影响。

商业区通常是高度不透水的，由建筑物、街道和停车场建成，露天地面将逐渐累积垃圾、降尘、溢出物和运输车辆造成的污染物。

街道和公路累积汽车产生的降尘、溢出物垃圾和废物。汽车运行产生了大量污染物：废气的排放，机件的损耗和油料的渗漏，这些污染源将产生铅、橡胶化合物、油和高 COD。

所有种类和各种规模的垃圾都来源于住宅区，它包括从大型的废汽车到大肠肝菌那样小的微生物都有。

§4.4 城市径流对水质的影响

城市水量与水质的关系

① 最近的研究认为，磷可能还有其他化学物质，可以吸附在泥沙颗粒上，而被冲入河流(诺弗特纳等人 1978 年)。

第二章论述了由于在城市区域内不透水地面的增加而导致暴雨径流的增加。在§4.3 中讨论了城市垃圾，本节将简单地讨论洪峰流量的增加和预期的河流水质下降之间的关系。

萨特和博伊德(1977年)分别解释了有关冲刷街道表面的沾染物(城市垃圾)和这些污水汇入河流的机理，其过程如下：(1)街面上有可以移动的沾染物，(2)灰尘垃圾由坡面漫流携带横向穿过地面，进入边沟，(3)平行于路边，把污染物送到暴雨排水沟，(4)污染物通过暴雨排水道。他们进一步指出沾染物的再迁移是由两个似乎是同时发生的机械作用完成的。(1)可溶部分形成溶液，随后雨点提供充分的混合扰动，继续补充"清洁的溶剂"，(2)从沙粒到胶体的颗粒化物质在雨点的冲击下被带走。一经被带动，微粒就会随其他雨点产生的湍动而保持假悬浮状态，正如萨特和博伊德所指出的那样，这些过程可以很容易地进行定性描述，但进一步给出定量的定义，涉及到所有的因素，那将是非常困难的任务。

欧弗顿和米朵(1974年)引用了艾米等人为美国环境保护局所作的研究成果，这一成果得出了脱离街道表面的污染物的百分比(表 4.4)，从表上可以看出，脱离地表的比例达到最大，是对应着最初时间的增量，而以后其比例随着时间的增长而下降，并逐渐趋于稳定，流径草地，沥青地面或其它类型的城市地表径流，由于地面特性的不同会产生不同的水力阻力，所以，面状水流路径是不定的，当它运动时，会与其它带有不同水质成分、浓度的水流混合，它们相互混合、反应，并最终进入一条水道。

关于城市径流对河流水质的影响，以下将讨论因径流流量而可能出现的一些常见现象和易于引起的反应。

迪盖纳等人(1975年)收集的资料可以表明城市径流产生高的 BOD 负荷。同收集其他资料一样，他们在西马萨诸塞州的格林河六个取样站收集了 BOD 资料。图 4-8 显示了干燥和潮湿天气的结果(从左向右站的顺序是向下游方向)。河流沿着 1 号站和 2 号站蜿蜒穿过新英格兰州的天然地貌，并在 3 号站开始，城市地区排

表 4.4 流率/持续时间与污染物迁离街面的百分比

流率（英寸/小时）	持续时间(小时)							
	0.25	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0.1	10.9	20.5	36.0	60.1	74.9	84.1	90.0	90.0
0.2	20.5	36.9	60.1	84.1	>90.0	>90.0	>90.0	
0.3	29.1	49.8	74.9	>90.0				
0.4	36.9	60.1	84.1					
0.5	43.7	68.3	90.0					
0.6	49.8	74.8	>90.0					
0.7	55.3	80.0						
0.8	60.1	84.1						
0.9	64.5	87.4						
1.0	68.3	90.0						

（欧弗顿和米朵，1976年）

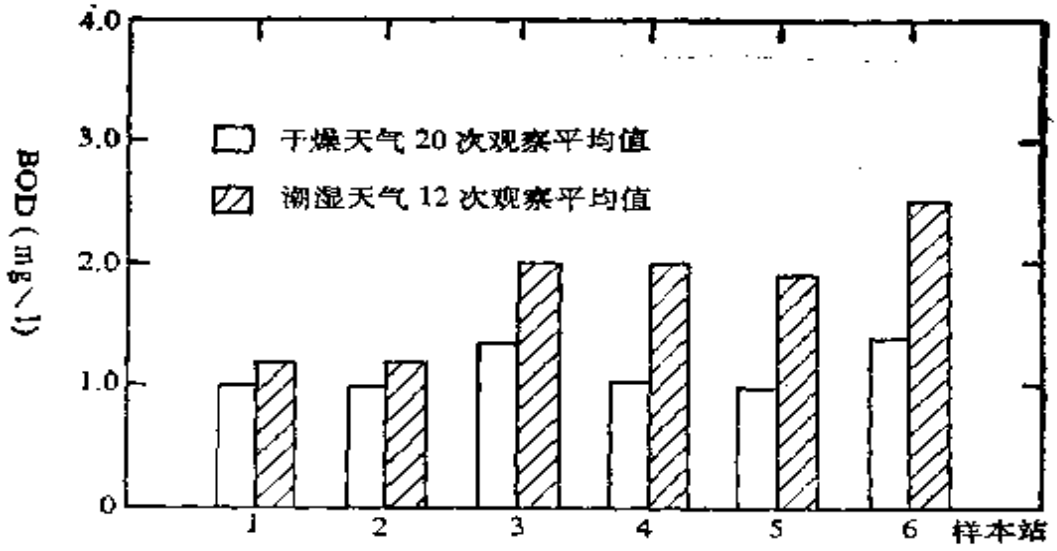


图 4-8 干燥和潮湿天气下的平均BOD值(迪盖纳，1975 年)

水在其后的四个站里，潮湿天气下 BOD浓度在后面四个站显然要高得多，这说明垃圾的浓度对 BOD负荷的影响，以同样的方式研究，湿润天气同样会增加总有机碳(TOC)、总磷(P)、混浊度、油类和脂肪。

城市垃圾的组成在§4.3 中已经论述清楚了。总的来说，随着

垃圾的累积，最终会对所接受河流造成影响，其决定因素是离最近一次下雨以来的持续时间，其它因素是：

(1) 暴雨的强度和历时；

(2) 城市地区内的坡度和土壤情况；

(3) 垃圾中不同生物化学组成的数量和浓度；

(4) 由于降雨把空气中的化学成分带到地面，从而产生的相互作用；

(5) 季节；

(6) 区域气候；

(7) 在暴雨径流时的河流水质。

有一个现象与垃圾的累积有关，垃圾冲入河流被称为"初次冲击效应"。由韦伯等人(1964 年)收集的资料表明(见表 4.5)，不同成分的浓度在降雨刚开始的时候是最高的，其总趋势是随时间而下降。在大多数情况下，初次冲击效应严重影响了接受系统的负荷。

表 4.5 城市地表径流中的平均浓度与时间的关系(毫克/升)

开始降雨后的时间(分) / 项目	0～15	15～30	30～60	60～120	120以上
SS	390	280	190	200	160
VSS	98	69	47	58	38
COD	170	130	110	97	72
BOD	28	26	23	20	12
总氮-N	3.6	3.4	3.1	2.7	2.3
总磷(以PO_4计)	0.99	0.86	0.92	0.83	0.63

(韦伯等人，1964 年)

一些研究(布赖恩，1972 年；韦伯等人，1964 年；布朗列等人，1970 年；联邦水质管理局，1970 年)已经指出，城市径流提供的生

化需氧量的速率，如果不超过也会等于各城市内二级污水处理厂的处理速率。这些处理厂的二级处理水中 BOD 比未处理的污水低得多，然而，某些初次冲击会产生突加的 BOD 负荷，该负荷可能接近未处理污水 BOD。

§4.5 城市径流对河流水质的影响——实例研究

城市径流和水质间关系目前并没有完全弄清楚。事实上，每个城市地区都有独特的自然和文化，从而产生了独具特性的径流。下面将对美国部分城市水质研究的近况作一个简要说明。这里，我们将几篇论文综合起来，作一个概括性的介绍，帮助读者初步了解有关城市径流与水质的关系。

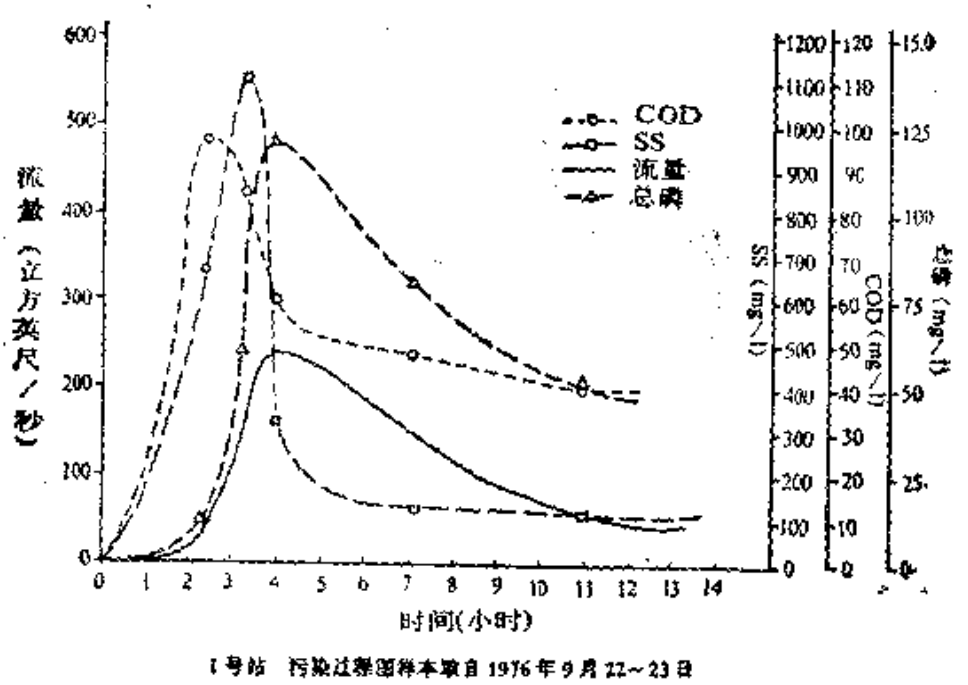
北卡罗莱纳州 德翰和雷列

列莫、内森和雷诺兹(1978 年)进行过一次有关暴雨径流与土地利用的非点源评价研究，研究的区域内约 2000 平方英里(5200 平方公里)，在经过选择的土地利用地点布设了 11 个自动取样站，其中九个站上还设置了自记水位计，雨量站网从五个扩充为六个，于取样位置上还设有六台连续水质监视器控制了整个排水区域，观测项目包括电导率，pH，DO 和水温。土地利用可分为七类，其等级从低活力的农田到商业中心区占主导的城市。

有七个自动取样站布置在流域内一个主要的土地利用类型上，与此有关的是只有很小的汇水面积，只产生很少的基流，每当暴雨径流产生时，大量河流径流由这个单一的土地利用类型上的地表径流汇集而来。

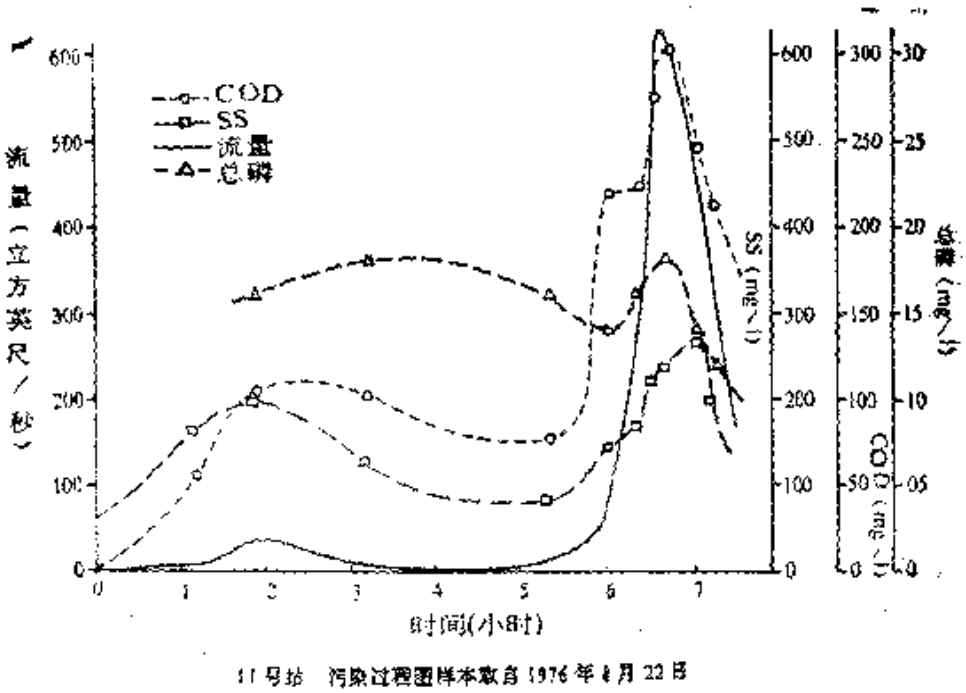
1976 年 9 月 22 日发生了一次持续时间较短暴雨(图 4-9、图 4-10 和图 4-11 表示其中三个站的污染过程线)，其峰值程度为 1.2 英寸/小时(3.0cm/hr)，在此之前，三天内没有记录到降水。

图 4-9 表示(一个天然流域)固体悬浮物和磷负荷与 COD 浓



1号站 污染过程图样本取自1976年9月22~23日

图 4-9 天然地域的污染过程图(列莫,1978年)



11号站 污染过程图样本取自1976年8月22日

图 4-10 高活力住宅区的污染过程图(列莫,1978年)

度一样迅速增加的情形，也可以注意到污染过程线上的峰值超前于流量的峰值。这就指明了初次冲击的效应，图 4-10 说明一个高活力的住宅区的资料(请注意其时间坐标和浓度坐标与前一张图的三条曲线不同)。固体悬浮物有显著上升，但没有农用站那么高，而磷和 COD 的浓度超过了农田站，这四条曲线趋于一致，它反映出不透水下垫面逐渐增加的影响起着主要作用。

图 4-11 显示了其中一个商业中心区的资料，引人注目的是四条曲线都有一段极快的上升时段，所有的峰值都出现在十分钟之内，总磷的水平与农田站差不多，COD 浓度高于其他站，固体悬浮物浓度低于农田和住宅区。

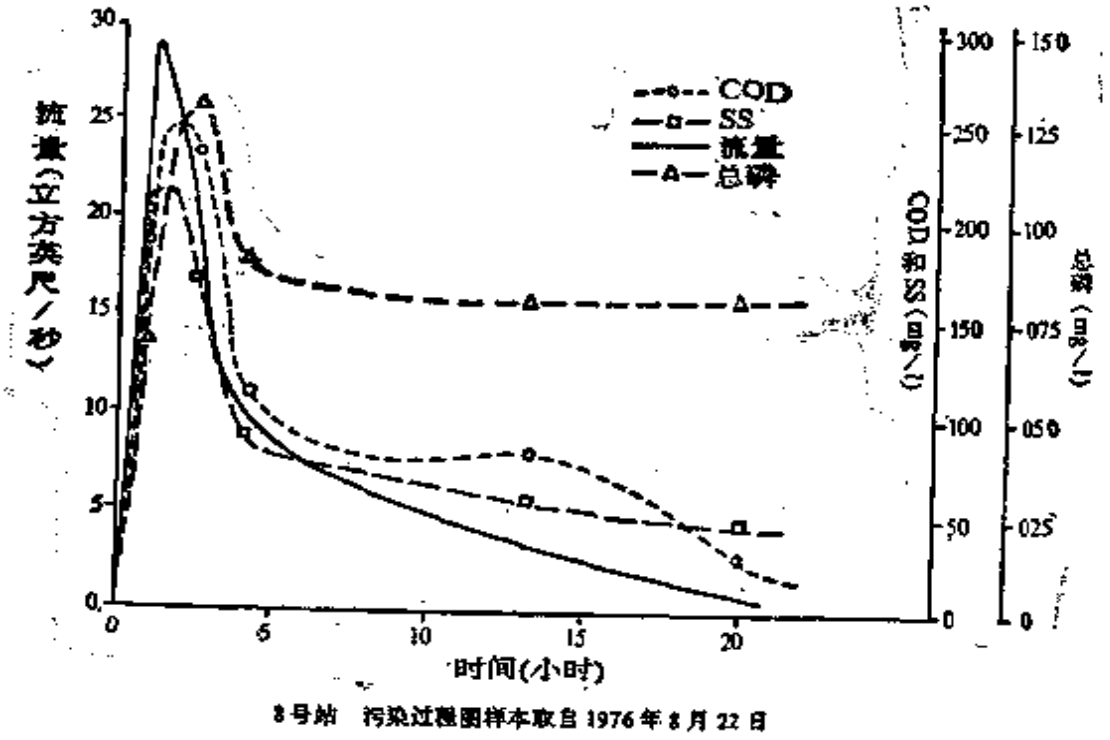


图 4-11 中心商业区的污染过程图(列莫，1978 年)

威斯康星州 密尔沃基

乔库尔(1975 年)选择了两个流域来进行研究，一个是农村，一个是城市。这两个流域的自然地理特征和气候特征相似，相距仅几英里(但其流域没有共同的边界)。城市所属的流域面积为 2.9 平方英里(7.5 平方公里)，农村所属的流域面积为 3.75 平方

英里(9.7 平方公里)，表 4.6 列出了土地利用的有关资料。

表 4.6　流域的土地利用

利用类型	棕　鹿(城市) 总面积7.5平方公里		曲　尼　铁(农村) 总面积9.7平方公里	
	占流域百分比	小计	占流域百分比	小计
住宅区	56.9		5.0	
轻工业	5.7		0.3	
停车场	2.5		0.4	
总建成区		65.1		5.7
未建设区	33.4		94.3	
建筑用地	1.5		0.0	
总未开发区		34.9		94.3

(乔库尔,1975 年)

1974 年 10 月 6 日降了一场 0.87 英寸(2.2cm)暴雨，两条河流在雨前、雨中和雨后均采集了水样。在所研究的二个区域内，各有一个降水监测站，由于没有用自记水位记录，所有的流量测验均由人工完成，其测验次数多于采水样的次数。

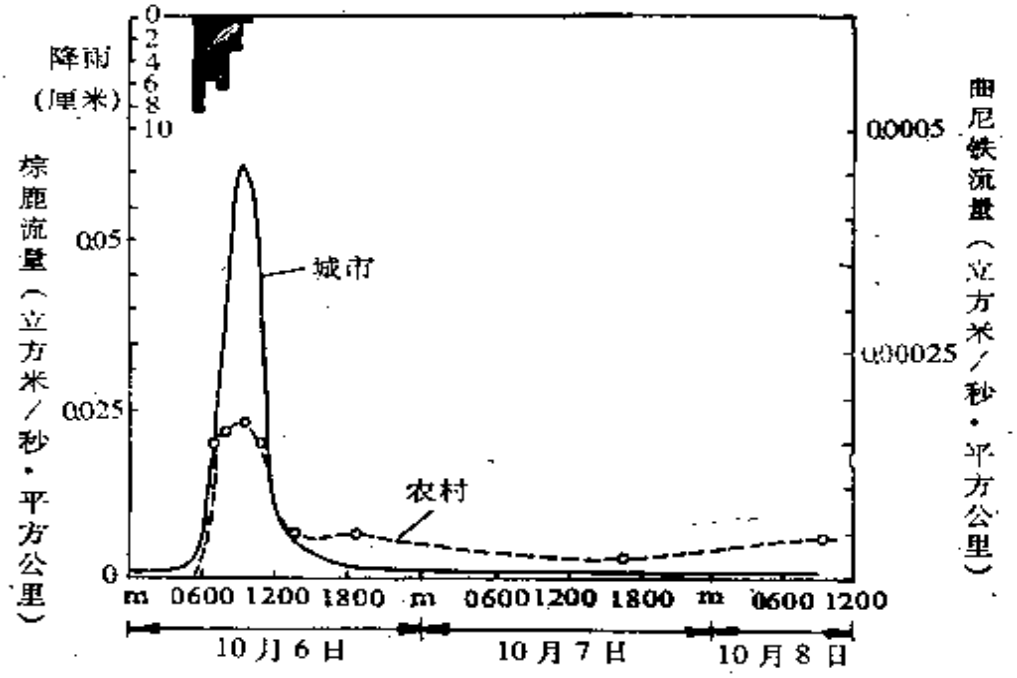


图 4-12　单位流域面积流量过程线和雨量过程图

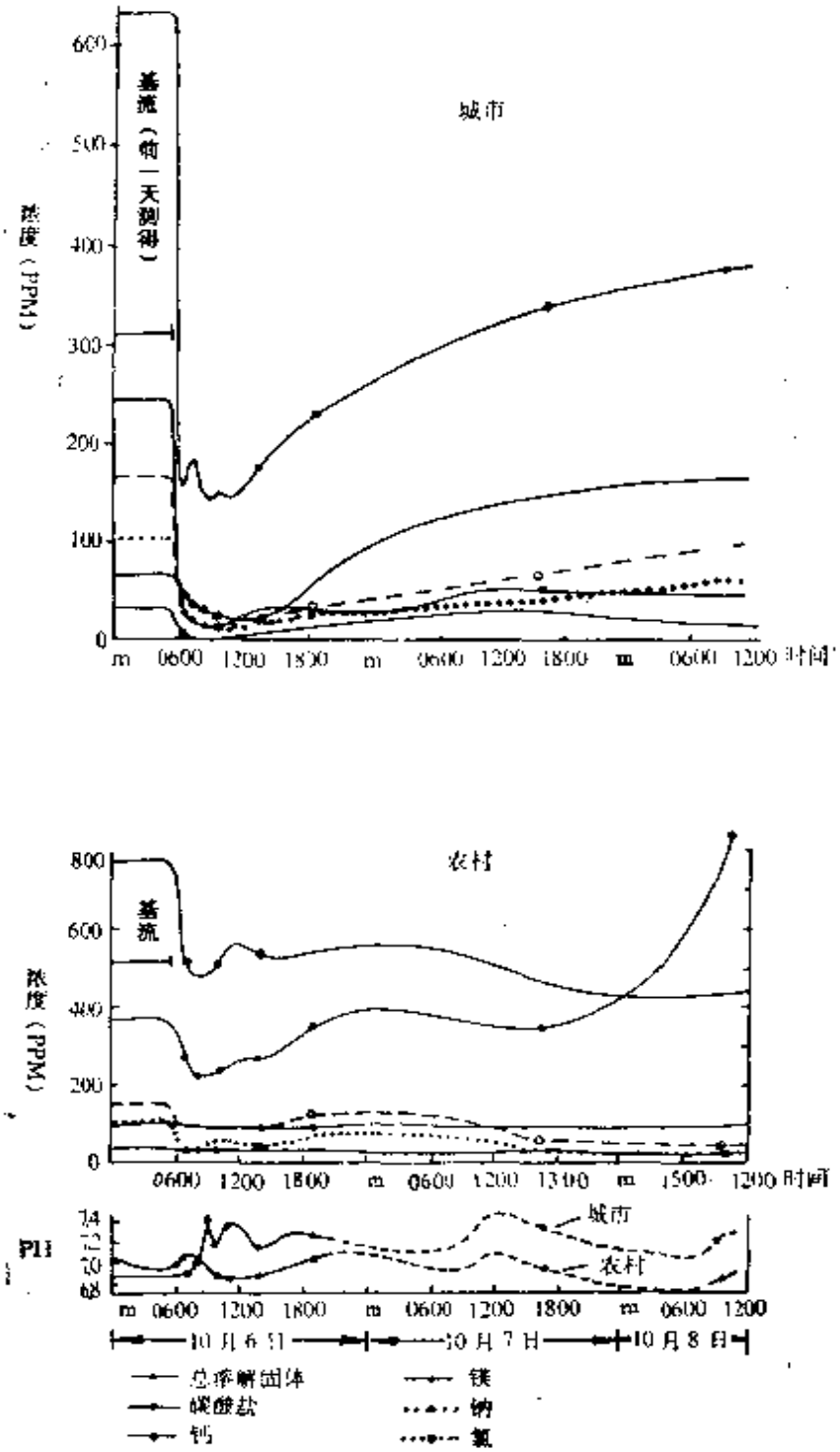


图 4-13　溶解固体和PH的时间分布(乔库尔,1975 年)

乔库尔指出,在暴雨之前,城市流域内有较大的基流，他把这一现象归因于不透水地表所占的比例较高，以及有污水(草地灌溉、街道冲洗的水)输入的缘故。在七天无雨之后，下了一场 0.87

英寸(0.22cm)的暴雨。城市流域观测到的洪峰流量超过农村流域的250倍(图4-12)。

图4-13表明在基流中，农村河流溶解质浓度最高，pH值较低，水温较高，上述结果是基于这样的事实，城市河流有一个可测量到的基流，而农村的河流基流实质上是停滞的，它具有较高的溶解质浓度与蒸发有关；而pH值较低，则是由于较高温度增加了CO_2的溶解度。

暴雨引起的地表径流在两条河流中都产生了稀释溶解质的结果(见图4-13)，乔库尔用下面的公式来确定稀释度，

$$\text{稀释度}=\frac{\text{基流的浓度}-\text{洪峰的浓度}}{\text{基流的浓度}}。$$

表 4.7　1974年10月6日5:30～10月8日9:00单位流域面积带出流域的各种物质的总负荷

物　　质	城市负荷(千克/平方公里)	农村负荷(千克/平方公里)
水	86,200	675
悬浮性泥沙	257	0.8
总溶解固体	199	5.6
钠	25.7	0.6
氯	37.5	0.7
钙	23.7	1.0
镁	11.6	0.2
碳酸氢盐	61.3	3.4

(乔库尔,1975年)

图4-14表明城市的稀释作用大于农村河流。乔库尔指出，这一现象意味着由暴雨产生的城市地表径流具有比农村流域小的离子浓度。由于城市暴雨流动较快，径流与其他物质接触的时间就会少些。这样就产生了有趣的怪事，在高水时期，城市河流的水质(以固体溶解质来说)优于农村河流。

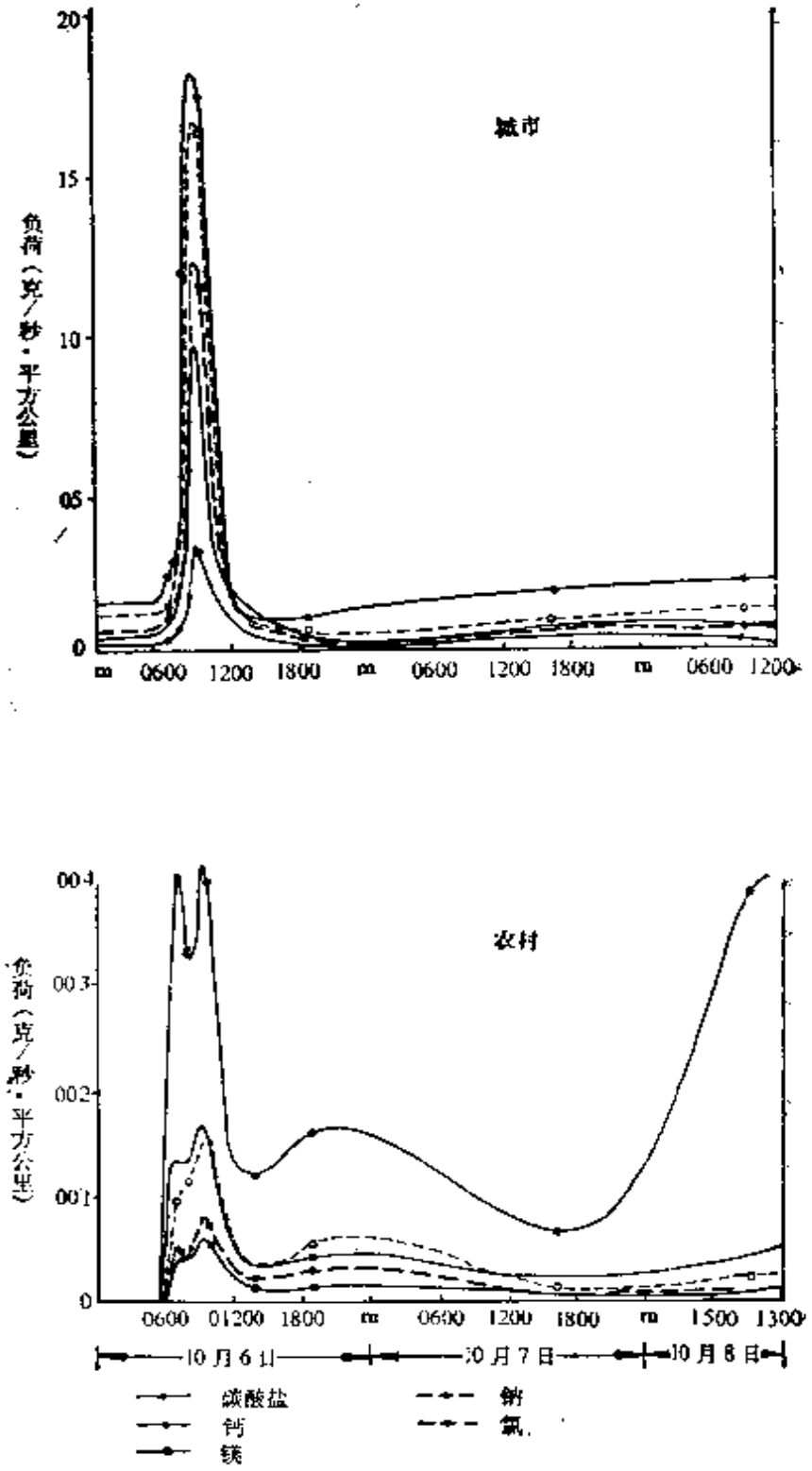


图 4-14　在洪水期间单位面积各种总固体负荷的时间分布（乔库尔，1975 年）

乔库尔指出，除了具有较低的离子浓度之外，城市河流夹带有极多的溶解质(表 4.8)。

表 4.8　北卡罗莱纳州德翰城市流域污染物产生量的估算

项　　目	年产生量(磅)	年产生量(磅/英亩)	年产生量(磅/平方英里)
BOD	90,000	84	54,000
COD	1,110,000	1,040	665,000
总固体	16,900,000	15,900	10,140,000
挥发性总固体	1,850,000	1,730	1,100,000
氯化钠	78,200	73	46,800
四氧化磷	3,600	3.4	2,160
铅	2,000	1.9	1,190

(布赖恩，1972 年)

北卡罗莱纳州　德翰

布赖恩(1972 年)在一个 1067 英亩(4.3km²)的流域进行了污染物产生数量的研究。在这个区域内，有一部分是德翰的商业中心区，一家烟草加工厂，一个公墓，一些教堂，分散的商业设施，公立学校，一大片供娱乐用的开阔地。一个购物中心以及一个人口密度高的住宅区和一个人口密度低的住宅区，该流域内的一条高速公路在研究时期处于收尾阶段。美国地质调查局设置的河流水文站和雨量站也在研究区域内。流域内住宅区约占 60%，商业和工业区约占 20%，其余是公共的、尚未利用的或社会事业性质的区域，水样是人工采集的，包括 14 个月中的 30 次暴雨，有 17 次暴雨的水样采集很完整，并分析出一些很有价值的结果。

表 4.9 列出了在所研究地区收集的资料摘要，其方法与韦伯(1974 年)的相似。布赖恩指出，他搜集的资料所反映的事实表明，污染物的特性与两级污水处理厂的原水相近，表 4.9 列出了达翰的资料及其他研究者所收集一些资料的比较是富有意义的。

布赖恩认为，由暴雨产生的年 BOD总量估算值与经两级处理排放的流域生活污水相当。而 COD 大于同样规模的城市标准住宅区直接排放的生活污水平均值。

俄亥俄州　辛辛那提

韦伯，安德逊和伍德沃德(1964 年)研究了一个 27 英亩(0.11 平方公里)的住宅区和少量商业区的流域。该流域位于华盛顿山，具有分离的下水道系统，该地区的人口密度是每英亩 9 人(2224 人/km^2)，不透水范围占流域的 37%，主要是屋顶，铺砌过的街道和停车场，其余是草地、花园和公园。

在研究范围内设置有一个雨量站，暴雨径流由一个 4 英尺(1.22 米)的矩形堰和自记水位计的记录测定，水样由自动采样器采取。当水流发生时，下水道中一个浮动装置会触发水泵，然后水泵就会把水冲满特制的塑料水样瓶。从 1962 年 7 月至 1963 年 9 月，除了 1 月份和 2 月份外，就是以这种方式收集资料。

表 4.10，列出了收集到的不同参数的平均值和范围，BOD和 COD 的平均值与两级污水处理厂的排放水相当，固体悬浮物平均为 210 毫克/升，这与未经处理的污水浓度相当。挥发性固体悬浮物(VSS)浓度超过污水处理厂的排放水。营养物质，如氮和磷是相当多的，造成混浊和色度，农药也发现相当多。

表 4.11 列出了水样中的微生物数量，粪便中大肠杆菌比其他情况少，关于这一点，作者认为，也许表明粪便的多数是非人类的(例如，狗和猫的)。

以上仅仅是初步的研究结果，这也使得科学家对城市径流的污染程度更加关注，纵然这里研究的资料不能尽快与其他城市地区的资料进行对比，然而他们在比较同一地区的生活污水流量资料时，能产生危机感(表 4.12)，它清楚地表明了城市径流的污染程度。

表 4.9 德翰和其他城市水污染比较

地点 \ 项目		BOD (mg/l)	COD (mg/l)	总固体 (mg/l)	挥发性固体 (mg/l)	固体悬浮物 (mg/l)	总磷 (mg/l)	大肠杆菌 (个/100ml)	氯根 (mg/l)
北卡罗莱纳州德翰	平均	14.5	179	2730	298	—	0.58	30,000	12.6
（城市暴雨）	范围	2->232	40-600	274-13,800	20-1,110	—	0.15-2.50	7000-86,000①	3.0-390
俄亥俄州辛辛那提	平均	17	111	—	—	227	1.1	—	19.8
（城市暴雨）	范围	1-173	20-610	—	—	5-1200	<0.02-7.3	500-76,000	5.0-705
俄亥俄州辛辛那提	平均	—	16	—	—	15	0.24	—	—
（降雨）									
俄亥俄州葛斯克顿	平均	7	79	—	—	313	1.7	—	—
（农村暴雨）	范围	0.5-2.3	30-159	—	—	5-2,074	0.25-3.3	<2-56,000	—
俄亥俄州葛斯克顿	平均	—	9.0	—	—	11.7	0.08	—	—
（降雨）									
密西西比州德曲特								总细菌数MPN法/100ml	
（城市暴雨）	范围	96-234	—	310-914	—	—	—	25,000-930,000	
华盛顿州西塔	平均	10	—	—	—	—	最大值4.3	最大值16,100	
（城市暴雨）									
瑞典斯德哥尔摩	中位数	17	188	300	90	—	—	4,000	
（城市暴雨）	最大值	80	3,100	3,000	580	—	—	200,000	
南非普利特里									
（住宅/公园/学校）		30	29	—	—	—	—	240,000	

（续表）

项目 / 地点		BOD (mg/l)	COD (mg/l)	总固体 (mg/l)	挥发性固体 (mg/l)	固体悬浮物 (mg/l)	总磷 (mg/l)	大肠杆菌 (个/100ml)	氮根 (mg/l)
（商业区和公寓）		34	28	—	—	—	—	230,000	
英格兰奥克斯尼	最大值	100	—	—	—	2,045	—	—	
前苏联列宁格勒	平均	36	—	—	—	14,541	—	—	
前苏联莫斯科	范围	18-285	—	—	—	1,000-3,500	—	—	

① 北卡罗莱纳州德翰的数据是17次暴雨的平均值。

（布赖恩，1972年）

表 4.10　62 年 7 月至 63 年 9 月，辛辛那提采样点城市地表径流的各种成分浓度

项　　目	范　　围	平均值
浊度	30-1000	170
色度	10-380	81
pH	5.3-8.7	7.5
	（毫克/升）	
碱度	10-210	59
钙硬度	24-200	63
镁硬度	2-46	15
总硬度	29-240	78
Cl^-	3-35	12
SS	5-1,200	210
VSS	1-290	53
COD	20-610	99
BOD	2-84	19
NO_2-N	0.02-0.2	0.05
NO_3-N	0.1-1.5	0.4
NH_3-N	0.1-1.9	0.6
有机氮	0.2-4.3	1.7
总磷(以PO_4计)	0.07-4.3	0.8

注：63 年 1,2 月未包括在内。

（韦伯等人，1964 年）

表 4.11　城市区域暴雨径流样本中的细菌数①

	预定样本百分比的数量(水量为 100 亩尺)		
	90%	50%	10%
大肠菌类②	2,900	58,000	460,000
大肠杆菌②	500	10,900	76,000
链球菌③	4,900	20,500	110,000

① 样本取自 1962 年和 1963 年辛辛那提的研究地点。

② 大肠菌类和大肠杆菌在 1962 年完全用 MPN 技术确定，在 1963 年由 MF 技术确定。

③ 链球菌由 KF 链球菌琼脂培养盘测得。

表 4.12 暴雨径流负荷和生活污水负荷

(磅/年·英亩)①

成分	暴雨径流②	生活污水(未处理)③	暴雨径流/生活污水(%)
SS	730	540	140
VSS	160	360	44
COD	240	960	25
BOD	33	540	6
PO_4	2.5	27	9
总氮	8.9	81	11

① 乘以 1.12 得到千克/年·公顷。

② 暴雨径流，资料来自对降雨和随后的水质、水量的完整测量。时间是1962 年 9 月至 12 月，1963 年 3 月至 9 月，所示数据是辛辛那提研究地点的年平均降雨量。

③ 生活污水：资料来自人口密度为 9 人/英亩(22人/公顷)和用水量为100加仑/天·人(0.4 立方米/天·人)。

假定未处理污水为：SS—200 毫克/升，VSS—130 毫克/升，COD—350毫克/升，BOD—200 毫克/升，PO_4—10 毫克/升，总氮—30 毫克/升。

(韦伯等人，1964 年)

§4.6 城市径流对土地侵蚀的影响

泥沙是一个地质的概念，科尔毕(1963 年)作了这样的定义：

——碎屑物质源于岩石的剥蚀，它们在水或空气中输移，悬浮或沉积，或由于其他的天然营力而累积于河床。

霍金逊，菲克和塞顿(1977 年)扩展了该定义，他们写道：河流泥沙源于地表土壤的侵蚀和沟渠的冲刷。河中流水几乎始终夹带泥沙，但最高浓度和最大重量的泥沙是由暴雨径流所携带来的。侵蚀是一个天然过程，世界在不断地被侵蚀，这是自然界的一个巧安排。然而，在城市地区内，暴雨径流产生能量的集中，这就加大了天然的侵蚀力量，并且使侵蚀加速进行①。任何不加保护的地表都可以被轻易冲掉，河流里充满了挟沙水流，其横断面将扩大(哈默，

① 见§7.3 关于流域表面侵蚀的讨论。

1972 年；道迪，1967 年)。对比大多不易觉察的城市径流的化学性质和生物化学组成，悬移质是可以被轻易观察到的，并已有了很多认识。正如沃尔曼和施谦克(1967 年)所注意的：在原来挟带有少量最初的悬浮物的河流中，加入大量泥沙将使河流的物理性质和生物性质产生急剧的变化。这些变化包括淤积成浅滩、河道中的悬浮性泥沙颗粒变粗，以及一些河岸遭到侵蚀河道内则发生沉积、使河道阻碍水流、增加洪峰，并改变河底的形状，由于水体中泥沙使光传导和抗磨性能变化，从而改变了动物区系和植物区系；因鱼类所依赖的动、植物区系产生的变化从而改变了鱼种。

通过上述观察，就能清楚的认识到为什么悬浮物可以被看作是污染物，足够多的悬浮物可以使河流生态遭到严重的破坏。

城市河流中的悬移质浓度很大程度上由许多自然地理因素和气候因素所决定，显然，如果没有植被的裸地遭到暴雨产生的来自不透水地表的城市径流，将产生极高的悬移质浓度。然而如前面所述，城市地区有大量的不透水地面，但却不一定具有易被冲蚀的地面。所以，高浓度的悬移质可能显示出：(1)流域内的地表有变动，(2)垃圾的累积和初次冲击效应，(3)河道自身被冲蚀。第一个因素是下面讨论的两个事例的题目，第二个因素是初次冲击效应，可能取决于污染过程线上所反映的滞后现象，如果滞时比较长，那么被冲蚀的物质的实际重量就可能没有很严重的后果。河道的冲蚀已被一些研究者认为与城市的冲蚀有关，哈默(1971 年)的报告提到城市化对河道扩大的影响，城市土地利用引起河道的被冲刷，基本上是由于洪峰流量的增加，如果一个研究者在一次洪峰中采集到悬移质的水样资料，他将观察到很高的浓度。

这些研究者得出的一致结果是毋容置疑的，在城市化的过程中没有什么时候会比建筑时期造成更严重的侵蚀了①。盖伊(1963 年)也许是这方面的第一个研究者，他发现住宅区下游的河流中，

① 道迪(1967 年)称之为"无常的产沙"，并指出它是不可预见和不可测定的关系。

在住宅区建筑时期，河流含沙量就会急剧升高。沃尔曼和施谦克(1967 年)指出，在马里兰州具有代表性的大小天然地表或森林流域上平均的产沙量可达 200～500 短吨/英里²/年(181～454公吨/英里²/年)。沃尔曼提出已建成的城市地区也能到达此数量。在同一篇论文中，沃尔曼和施谦克指出，小面积地区在建筑时期能产生高达 140000 短吨/英里²/年的产沙量。格拉芙(1975 年)报告过，丹佛郊区的一个小流域，在施工建筑之后的新生洪积平原上，沉积物达到 7544 公吨/英里²/年(即 8315.7 短吨)，这比建筑前泥沙产生的速度增加了 30 倍。不仅使受沙河流结构受影响(沃尔曼，1967 年)，而且，如同前面所讲到的，扰乱了河流生态，巨量的表层土壤，这种有价值的不可再生资源也损失了。

马里兰州　蒙哥马利县

在 1962 年至 1974 年，约克和赫伯(1978 年)在九个支流流域共 32 平方英里的区域内完成了对河川径流和悬移质研究，他们使用的资料来自 9 个河川径流-泥沙站，9 个自记雨量计，大量的普通雨量计，14 套航空照片，三次沿河进行的河道测量。在研究的时段内，三个支流流域依然是农村，同时其他的支流流域正在大力进行城市建设，到 1974 年，各个支流流域城市面积占到流域面积的 0～60%。

有一个面积为 21.1 平方英里(西北支流，安娜克斯提亚河，靠近库列威尔)在研究期间，年平均产沙量为 14800 短吨(13427公吨)，其变化幅度从 1972 年的 31000 短吨(28123 公吨)到 1974 年的5500 短吨(4990 公吨)(前者受到阿格尼丝飓风的巨大影响)，泥沙负荷的主要部分在暴雨时输移的。73%的泥沙集中在一年内 2.2%的时间内输移，95%的泥沙集中在 5.7% 的时间内输移，各次暴雨的产沙量变化是很大的，其负荷量与暴雨径流和洪峰流量密切相关。

泥沙的主要来源是耕地、城市用地和建筑工地。耕地上的悬移质变幅为 0.65～4.3 短吨/英亩(145.8～963 公吨/平方公里)，

而森林和草地估计产生 0.03～0.2 短吨/英亩(6.67～45.5 公吨/平方公里)。城市用地上的产沙量大约在 3.7 短吨/英亩(830 公吨/平方公里)，绝大多数沙量是来自紧靠新建成的住宅区和商业区下游被侵蚀的河道。

城市建筑工地产生最大的年悬移质数量，其变幅是 7～100 短吨/英亩(1569～22416 公吨/平方公里)，平均为 33 短吨/英亩(7397 公吨/平方公里)。

公路建设

在公路的建筑时期，侵蚀虽然一般数量不大，但产生的方式与城市建筑相似，道迪(1967 年)列出的研究结果表明，马里兰州山麓地带的公路产生的泥沙达 3000 短吨/平方英里(1051公吨/平方公里)。鉴于许多公路不但建筑在城市里，而且是为了城市间的交通和发展而建设的。它们对于城市水文学的研究来说是重要的。

弗吉尼亚州　菲尔法克斯的斯葛特·兰河

从 1961～1964 年间，法埃斯、盖伊和弗格逊(1969 年)在一个 4.54 平方英里(11.76 平方公里)的流域内，研究由于郊区公路建筑而引起的泥沙运动。公路建筑占流域的 11%。在这一时期其他类型的建设相对较少，从 1960 年 8 月和 1964 年 9 月的两张航空照片上可以知道，整个流域的森林占地 1960 年为 50%，到 1964年下降为 43%，在公路建筑之前，这里基本上是农村，农地占流域的 25%～30%，但只有少部分农地是用于耕作的，大部分农地被草场所覆盖，用于生产干草和放牧。1961 年 1 月，住宅和工业地区只占流域的 10%，到 1964 年 10 月大约为 12%，作者指出，这些地方只产生很少量的泥沙，因为绝大部分流域地表受衬砌、屋顶和草地保护。

在斯葛特·兰河上有个水文站，提供了连续的河流流量记录，(当流量超过 20 立方英尺/秒时，降水资料由三个相邻的气象台站取得，泥沙输移资料通过 29 次暴雨的计算得到。

在1960～1962年间，流域内建成了五座立交桥和三条双向公路。建筑的高峰时期是1961年冬至1962年春，并于1962年结束。在1964年，又有一小段公路建成，作者报告提到残留的侵蚀作用在1962年底和1963年春迅速下降，但有些作用在1964年8月研究结束时，仍在发生影响。

作者在叙述了这项研究采用的其他一些方法之后，把流域分为低产沙、中产沙和高产沙建筑区。低产沙区产生的泥沙可达到0.03短吨/英亩·年(6.72公吨/平方公里·年)。该地区内有一定的森林面积、草地以及已建成的城市面积，预计其平均产沙量为0.25短吨/英亩·年(56.0公吨/平方公里·年)，耕地或中产沙区大约为13短吨/英亩·年(2914公吨/平方公里·年)。

由于各个地区不同的实际情况和自然地理的原因，建筑区泥沙产量变化是相当大的，有一段时间，公路建筑面积占研究流域面积的1%～10%以上。作者计算出，在研究时期，有33320短吨(30228公吨)的泥沙或占总量85%的泥沙通过了水文站。低产沙区森林仅产沙0.3%，草地和已建城市占3.0%，中产沙区供沙4.1%，其他种类的建筑供沙7.5%，公路建筑地区年平均产沙63短吨/英亩(14,122公吨/平方公里)。

在研究时期内，检查流域泥沙总量结果表明，88次暴雨带走了94%的泥沙负荷总量，5%的泥沙组成河床质，这些是由大颗粒组成的，只能在河床上推移，有时借助于水流，能被举起在水中以悬浮状态移动，剩下的1%的泥沙总量由低流量径流带走，换句话说，88次暴雨只占研究期3%的时间，但带走了泥沙总量的94%。

作者指出，研究时段的降雨量比长期平均值少14%，如果达到平均降雨量，那么产沙量将会有可观的增加。

§4.7 城市交通措施对河流水质的影响

公路撒盐

自1940年以来，许多公路管理机构在冬季采用一种"清雪"的

方法(通过在公路和街道上撒盐防止结冰来达到目的)。在城市里,由于街道的密度和保证大流量的交通车辆安全运行,已经产生了浓度相当大的盐分。在冬季结束时,这些盐仍然保存在水环境之中,最近,一些学者已经完成的研究报告中指出地表水和地下水中氯化物浓度增加,这已使得科学家们对可能产生的环境影响更加警觉。

从1972年11月至1973年4月,伍克维兹和赛利姆(1974年)在伊利诺斯州的东北部377平方英里上研究公路上含盐分径流情况。他们采用的方法是物质平衡的计算,例如,计算出每年氯盐的收支帐,流域内三十个主要居民区的人口在1960～1970年的十年中增加了46%(斯皮克,1970年)。同期,公路里程增加了14%,公路里程增加的绝大多数是住宅区的街道。

从11个不同地点,共收集到612个水样,只要一有可能就在出现大流量之时采样,通常每周两次。在研究期间,有16个污水处理厂,共排放2.1立方米/秒的总流量进入河流,因为氯化物是污水中的一种成分(人们几乎每餐都少不了它),它必须计入最后污染总帐中。

41个公路保养机构中,36个把它们的用盐总量报告给了作者,其总量估计在此期间占公路用盐总量的97.2%。在研究期内,流域内6500公里(4040英里)的道路,共耗用氯化钠20260短吨(18380公吨),氯化钙40短吨(36.29公吨)。

作者使用了公式:

$$L=CQ,$$

其中,L为任一时刻河流氯化物的总负荷量,C为水中氯化物的浓度。

总负荷中公路盐分的部分L_s表示为:

$$L_s=L_o-L_c,$$

其中,L_o为观测到的总负荷,L_c为非公路来源的盐份负荷(Q是河流流量)。L_c必须从本底氯化物的浓度中计算出来,并由每一条河

流的氯化物与流量关系来决定。而 L_s 部分(公路盐分所造成的氯负荷)是由河流从流域上运移来的。其余的,或者留在流域上,或者被潜水所运移。

索特河盆地被分为四个亚区,每个亚区的特征见表4.13,等氯盐线图由伍克维兹和赛利姆完成,试图直观描述研究期间氯化物浓度随河长和时间的变化(图 4-15),十二月和二月的情况表明主要的水质状况,三月的情况表明较次要时期。上述每一个时段记录着对应的主要用盐阶段。由于有两个子支流(其流域范围内至少65%是开阔地,公路和人口的密度均很低)在此点汇入干流,所以河流中心断面稀释作用最大。上游河段氯化物浓度很高,因为有三个居民区集中在 9 、10 和 11 号站地区,这三个区的径流集中向干流汇入。大多数人口位于下游河段,公路在这里用盐也最多,造成盐(氯化物)浓度极高。

表 4.13 索特河盆地的城市特征

城市化项目		亚区1	亚区2	亚区3	亚区4	流域	相关系数①
流域面积,	平方公里	76.9	205.9	44.6	49.2	376.5	
街道面积②,	%	8.7	11.5	16.8	18.1	12.3	0.923
公路密度,	公里/平方公里	14.2	17.4	16.3	22.7	17.5	0.934
人口数③		49,400	166,200	44,300	98,100	358,000	
人口密度,	人/平方公里	642	807	993	1,994	951	0.936
氯化物,	吨/平方公里	30.6	30.6	33.3	41.2	32.4	0.909
氯化物迁移	%	55.5	61.4	64.5	71.9	62.4	

① 与氯化物迁移作的相关。
② 来自东北伊利诺斯计划署(1970 年,未公开资料)。
③ 人口取自 30 个主要社区 1970 年的人口调查,而不是亚区的全部人口。

(伍克维兹和赛利姆,1974 年)

作者指出,每一个主要水质变化阶段都有两个氯化物浓度极大值。第一个极大值是由于盐使用,开始融化,产生的含盐径流引起的,以后的低浓度是由于雪融化后冲淡了公路盐分的浓度,接着温度降到 -10℃以下,径流减少了(氯化钠)在 -10℃以下就失

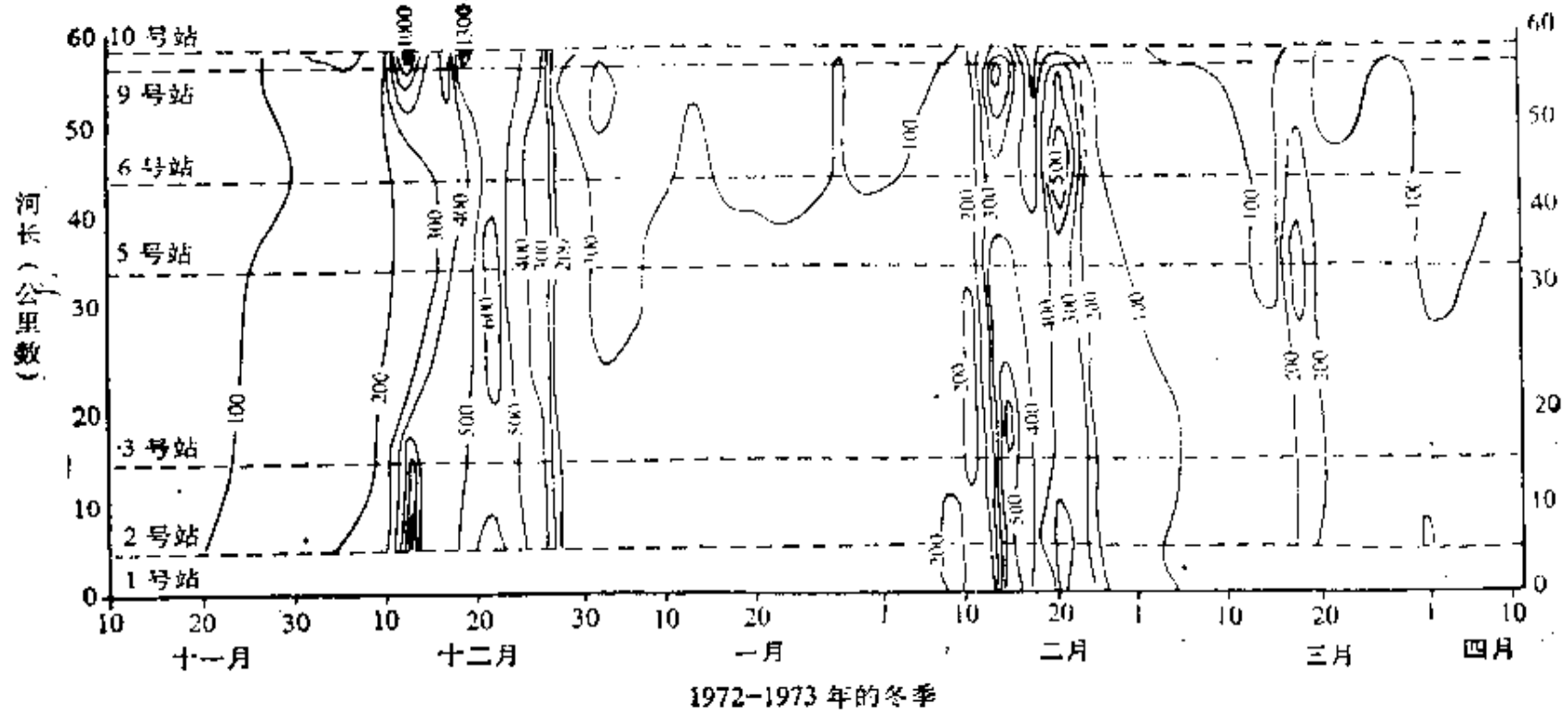


图 4-15　索特河等氯盐线图(伍克维兹和赛利姆,1974 年)

去了作用)。在暴雨过后,残留的雪又逐渐融化,并把路面上的盐冲进河流,从而产生了第二次极大值。

在上述过程之后,河流中氯化物的浓度就会下降,这是因为降水和融雪径流的稀释作用,在主要的用盐期以后,融雪期的长短和降水强度会影响下降的速度,现在这一曲线的下降率由降水的强烈程度所控制,四年一遇的十二月洪水造成氯度急剧下降,二月份正常融雪,三月份有短暂的降雨,从而氯度值平缓下降。

在六个月的研究期内,作者计算出各个亚区迁移率大约在55～72%之间,区域平均为62.4%(表4.14)。每个亚区的城市化程度,与氯化物的迁移数量密切相关,相关系数在0.9以上,这一结论与美国公共事业协会(1969年)发表的报告一致。报告认为,在不透水地面上,可能100%的公路用氯盐被暴雨冲进河流。

表 4.14 美国不同区域公路年用盐量

研究区域	年度	用盐量(吨)	氯迁移量(%)	参考资料
伊利诺斯州 索特河①	1972～1973	20,260	62.4	拉扎罗
纽约州 爱伦特克	1971～1972	68,900	68.0(44)	德蒙等人(1973年)
纽约州 爱伦特克	1970～1971	72,900	48.0(37)	德蒙等人(1973年)
纽约州 爱伦特克	1969～1970	77,000	41.0(29)	德蒙等人(1971年)
波士顿地区	1969～1970	15,1000	65.0	胡林和荷洛齐(1972年)
佛蒙特州 土利普河	1969～1970	67～100	60～89②	库克(1971年)
伊利诺斯州 芝加哥③	1967～1968	46.1	100.0	美国公共工程协会(1969年)

括号内的数字是该研究早期工作中相同时期公路氯盐迁移量的估计值。
① 该数值是开始用盐六个月的结论。
② 平均值为74%。
③ 该预算以一个半月时间计。

有关公路用盐的情况摘要见表4.15。一个有趣的结果值得一提是,流域的北部氯化物浓度最高,但其公路盐分的迁移却是最低的,作者如实描述了这一事实,即小河的这部分稀释能力有限。

作者估计,公路氯盐剩余的37%中的10%将在研究阶段以后

的六个月中由地表径流携离路面，其余部分或者将由地下径流携离迁移，或者由于滞后作用而留在流域内。

表 4.15　1972 年 11 月至 1973 年 4 月索特河公路用盐量摘要

亚区	观测的氯负荷量(吨)	计算的氯背景负荷(吨)	用氯盐量(吨)	由河流转移的氯(%)
1	2,774	1,468	2,354	55.5
2	11,860	7,997	6,394	61.4
3	2,100	1,141	1,485	64.5
4	1,395		1,940	71.9
流域	18,203①	10,606	12,176①	62.4

① 该数据包括河流其他所属地区的 170 吨氯化钠。

（伍克维兹和赛利姆，1974 年）

铅

牛顿、谢泼德和科尔曼(1974 年)观察到：

"铅是一种汽车排放的初次沾染物，并有停留在短距离路面上的趋势。"由于在城市地区有高密度的汽车，铅累积了相当数量，汽车释放铅的速率接近于 0.11 克/英里(0.07 克/公里)，牛顿等在俄克拉荷马城统计了由汽车排放的铅达 143000 克/天(315磅)，并估计大约有50%汇入河流(铅与路面的吸附能力很有限，但却能很快与土壤结合)。就像对人有毒一样，铅对鱼也是有毒的，城市地区铅污染盛行，它流入河流，并产生越来越严重的后果。

奥塔瓦　奥特里欧

奥利弗、米尔纳和拉布雷(1974 年)研究了铅在城市积雪中的累积，他们每周从 11 个雪堆上采集雪样，并定期从穿越城市的公路和街道上采集雪样。水样每周采自奥塔瓦暴雨下水道里，并在 1972 年 2 月 21 日至 3 月 24 日每天采集污水处理厂的水样。在奥塔瓦及郊区的人口约 50 万，因而估计出每天进入市中心有16万辆汽车。

城市公路积雪中的铅含量大致与交通量成正比。在取样点积雪中，铅含量的平均值为 4.8mg/l，但各个采样点含量的差别较大，这反映了采雪街道的铅浓度不同。分析两个城市的屋顶上的雪，发现有十次以上不含铅，这说明街边积雪显然是被汽车废气严重污染了①。

作者注意到绝大多数的铅与微粒有关，因为微粒表面吸附作用和化学反应相当大，铅似乎吸附在微粒上，而不是化合。作者提出，这些微粒可能含碳酸钙，这似乎是一种良好的吸附媒介，这就表明，铅能轻易地被悬移泥沙携带入河流，并在那儿沉淀积累。

在积雪堆中，铅在雪融化以后仍保留下来，并在逐渐集中。作者估计 1971 年～1972 年奥塔瓦的冬天雪堆可能有 2387000 立方码，由此推算共累积了 10800 磅(4.90 公吨)的铅。如果这些雪倾倒入本地水源，我们可能想象到环境后果的严重。但幸运的是，这些雪堆离每条河流的距离在 100 英尺(30.5 米)以上，这就估计出每条河的铅将降为原来的 2%，含铅的土壤剖面也证实了雪堆中有残留的铅。作者经过计算，确定通过暴雨废水输移的铅有16000 磅(合 7.264 公吨)，另外大约 9000 磅(4.08 公吨)在所研究的那年里以废水的形式进入径流，他们估计雪堆(距水源 100 英尺)的消融可以使进入河流的铅减少 30%。

① 奥利弗等人提出的汽车用的汽油中每加仑含 1.5～3.6 克铅，一般是四甲铅或四乙铅。

第五章　城市水量和水质模型

§5.1　数学模型的建立

斯尼德和斯托(1965年)对模型定义如下：用简单的符号形式来表示的自然规律，但它是一个具有极端重要特性的等式或公式。它由有关的物理原理出发，通过逻辑推理得出，并经过实验鉴定和清晰的直感进行修正。

安乔斯和麦考郎(1976 年)在后来的描述中加以扩展。认为，数学模型是一种把数学应用到客观事物中去的艺术，一个好的模型能通过选择适宜的假设来认识问题的最贴切的面貌，并有一个含义明确的数学结构，从中可得出实际需要的数量。

罗伯特(1976 年)介绍了建立数学模型的四个环节。(1)通过归纳使实际资料转化为概念化的模型。例如，一条普通的定律是在若干观察资料的基础上猜测出来的。(2)通过推理完成模型的预测。结论是产生于周密的设想和众所周知的推理规则。(3)把预测与实际资料作一个对比，从而确定其准确性如何，正如罗伯特指出的，既然模型要有实用意义才有价值，那么，这一步就需要模型设计者进行严格的审定。(4)把模型的结论与实际资料进行检验，并进一步完善模型的预测。

图 5-1 说明了建立模型的过程①：(1)观察客观事物，(2)离析问题并提出恰当的概念，(3)建立数学模型结构，(4)检验模型，选配曲线，使最优化等等，(5)应用检验，作出若干预报，并进一步校正、确证、或精细调谐模型的参数(改进灵敏度)。

---

① 有关模型和系统的综合讨论，见乔迪和肯尼迪(1971年)。

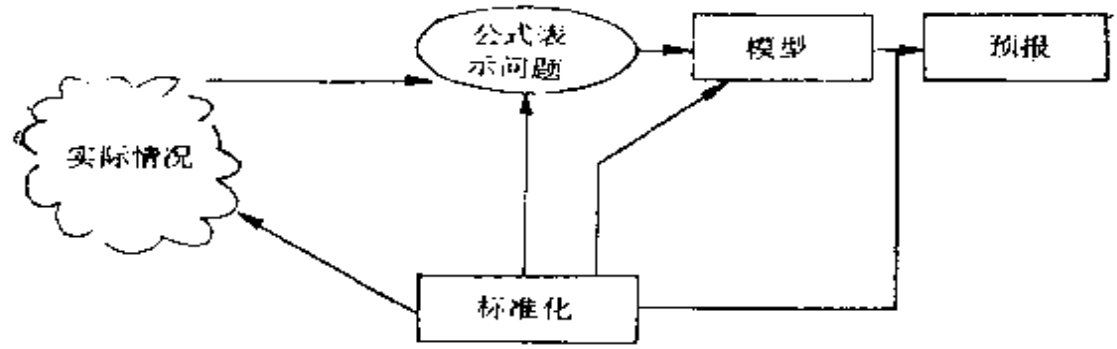


图 5-1　建立模型的过程

线性模型的建立

实际问题：一个能装 100 加仑的金属圆桶直接安放在汇集一小片屋顶雨水的一个水落管下面，附近有一个雨量计，每一次暴雨之后桶里都会有一些水，这个系统的数学模型结构可以这样确定①。

第一步，问题公式化。输入是降雨，输出是屋顶上收集来并归置于桶里的水。

第二步，模型结构。为了建立水的流入和桶里的水增加的关系，我们将点成一个散布图。观察了几次暴雨，在仔细地读出雨量计刻度和量出水增加的体积之后，我们把这些资料点成了图 5-2。斯皮德(1975年)论证了最小二乘法，这个方法我们能用来找出拟合这些点据的曲线，图 5-2 应用了这个方法，绘出了最佳拟合线。

由于在这个事件中降雨与水量增加的关系表现为一条直线，并且图上 x 坐标和 y 坐标也是线性增加的，那么，我们能假定降雨与水量之间存在着线性关系，这一数学模型必定属于这一类的：

$$y=a+bx,$$

可写成

$$R=a+bV。$$

① 道格(1968年)定义系统如下：任何现实或抽象的结构、计划、方案或过程，其各部分在给定的时间内相互联系，相互作用，物质、能量和信息的一个输入(问题或刺激)，它就有信息、能量和物质的一个输出响应。

其中：R 为观测到的降雨量(自变量)，V 为观测到的水量增加数(因变量)，以加仑表示，a 为常数，b 为直线的斜率。

应用斯皮德 (1975 年) 讨论的方法，我们得到公式和系数如下：

$$R=a+10V(a=0\text{且}b=10),$$

和

$$R=10V,$$

即 1 英寸的降雨产生 10 加仑的水。

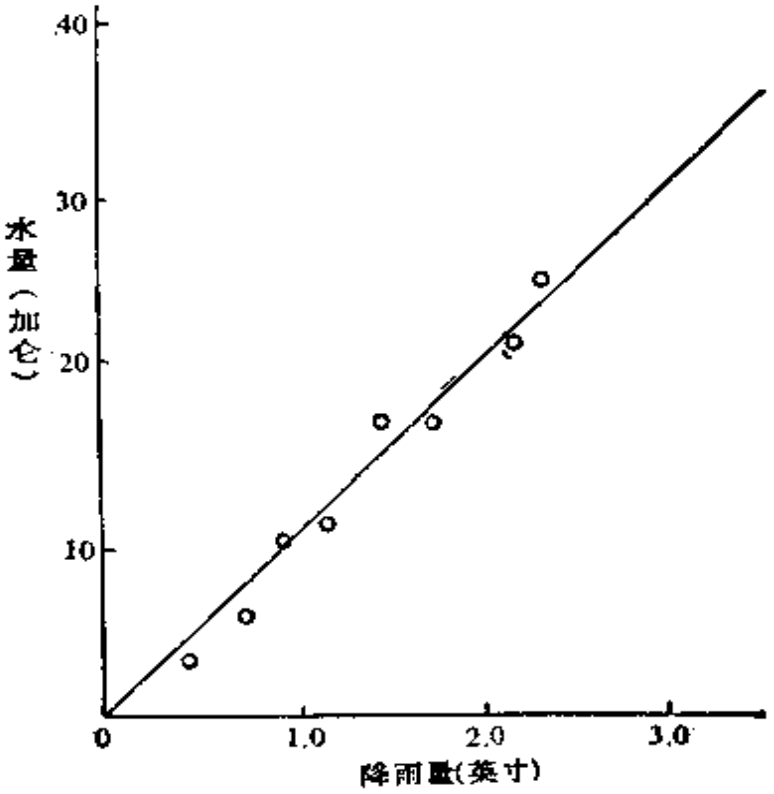


图 5-2　水桶模型的数据图

第三步，模型检验和曲线拟合①。在一次暴雨之后，我们读出雨量计读数为0.5英寸。根据图5-2，我们预测桶里会增加 5 加仑水，然而，在观测桶里水的体积后，我们发现只增加了 3.8 加仑水，如果我们把这个点点在图上，我们就会发现这是落在回归直线以

① 在已知的条件下要校正模型是不可能的，因为没有其他(更准确的)资料可以应用，一个符合标准的流域，一般是把模型的预测与测量数据相比较，并且修正模型的输出值，使之更接近于实际数据。

下的第三个点。或者，换句话说，实测数据显示出该模型在降水1英寸以下似乎存在着非线性关系。这里我们可以改变系数 b，使它比10更大些，如换成13，来使这些点升高（与曲线更接近），如果我们将3.8乘以13.2，就得到5.02加仑，这一点就是高于曲线一点点。

观察了几次暴雨，我们可以发现其他的非线性现象，这也能够通过曲线拟合（优化）使之更接近曲线，后面的这些点可以称为非常点，产生非常值的原因可能是由于屋顶很热，在径流产生以前已蒸发了一部分降水。如果进一步研究其它的非常点，我们将很可能为它们的非线性现象找到其它气象方面的解释。

在公式 $R=10V$ 中，常数"a"可以是一个确定的数，而"b"对于不同大小和强度的降水，可取不同的数值，"a"和"b"等数值可以按照降水变幅列成表格。

建模方法的讨论

上述模型可以称为一个简单的（参数）降雨——径流（水量）回归模型（皮尔格雷姆，1975年），它本质上是一个"黑箱模型"，其输出与输入是函数关系（杜宁，1975年①）。

各种不同的降雨和径流过程是由屋顶的不透水性，排水网络的水力效用，暴雨的强度和分布所决定的，我们试图用数学来进行描述和预测，这种新的模型，我们可称为"确定性的模型。"欧弗顿和米朵（1976年）把模型分为三种类型：（1）确定性的，（2）参数的，（3）完全随机的。如图5-3，一个确定性系统是没有机遇因素的，所以，给定一个输入，其输出就能预报。一个随机模型涉及的输出可能是随机的。确定性模型和参数模型的差别在于程度不同，欧弗顿和米朵说得很清楚。

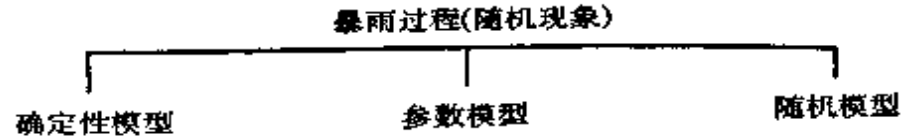


图 5-3　建立模型的方法

① 参见克拉克（1973年）关于水文模型及分类的详细讨论。

参数方法力求确定水力特性与集水区的形状特征和土地利用性质之间的函数关系。确定性方法着重于综合地(数学地)描述不同过程，以求非常准确地反应天然水文系统。

§5.2 天然流域模型

水文学家建立了特定流域的地表水和地下水的水文循环过程的模型(道格，1968年)。图 5-4 的框图说明了流域作为一个封闭系统的不同组成部分。从概念和定性的角度看，这个系统及其内部过程可以描述得相当简单。然而，建立精确的数学模型，至少有一个重要因素是很复杂的。与很多实际系统的性质一样，水文系统是非线性的①。就像阿摩罗切(1963年，1967年a，1967年b)和普拉萨道(1965 年)所指出的。阿摩罗切(1967 年)认为非线性预报问题有如下的分类：

(1) 流域随时间的变化，

(2) 水文系统的输入在时间和空间分布某些方面的不确定性，

(3) 组成水文循环的物质和能量迁移的非线性过程。

时间变化可以由下述事实来说明，一个天然流域在地质年代中是持续不断地变化的。所以，在某一个特定时间的输入与其以后相似的输入并不会产生同样的输出，我们关心的是预报这种相对简短时间内的输入-输出关系，但我们基本上被同样的问题所困扰，这些问题能分为季节变化例如树叶，一种在温暖气候中可渗透，而冬季又不可渗透的地面，降水是液体或固体形式等等，这些因素使任一给定的汇流时间不同，其结果不可预测。另外，流域的变动还有滞后现象，例如，一次大洪水的影响在相当一段时间内，还可以

① 贝考斯吉夫(1958年)有关非线性系统的讨论，这些讨论同线性系统一样的精辟。

沿河道看出来，这影响取决于洪水事件的大小和区域地质条件(伍曼和米勒，1960年；裘塔和福克斯，1974年)。这些地貌变化将改变这段时间里降水所造成流域的响应和输出(加上非线性因素)。

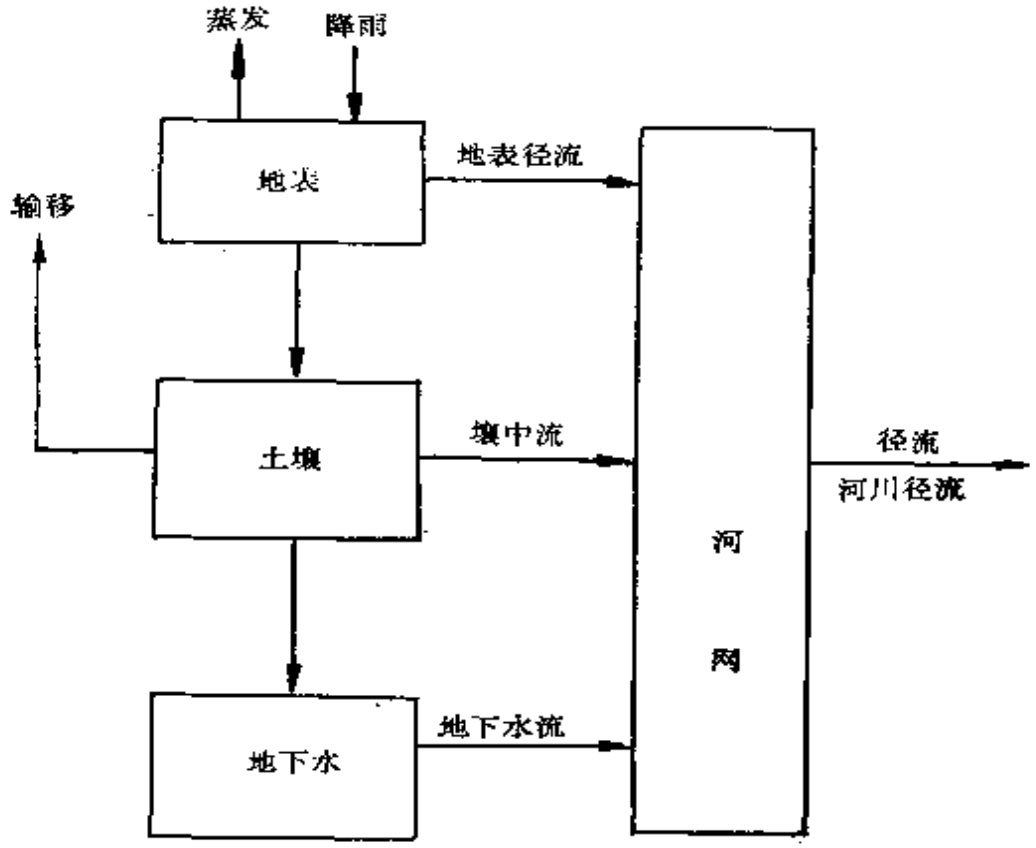


图 5-4 封闭系统的流域

与输入输出的时空分布相关的系统不确定性，主要是因为现代资料收集方法太落后。例如，我们都知道，任一时刻的降水量在流域内的分布是不均匀的。雨量计是最准确的测量工具。然而这种方法还有很多有待改进的地方，它们测定点雨量，并能很准确地估计周围极小一片地方的雨量，而留下一大片未设站的暴雨空间。土壤含水量及其深层测定也是如此。简单地说，图 5-2 中子系统的资料增加了它们自身效果的非线性因素。

第三点，在组成水文循环的物质、能量输移中固有的非线性过程，本质上与前面所叙述的情况相似，但起点不同，其规模可以扩大到全球。

因此，给定输入，要求预报天然流域的输出的问题是一个复杂的问题，水文学家试图通过一些假设来清除这些障碍，正如道格(1968年)报告的，对于天然的系统如果不作假设，那么预测的问题事实上是不能解决的。系统的假设越多，解决问题就越容易，但我们的模型系统(准确地)反映原型失败的风险也越大。

今天使用的流域模型是非常多的，其中有些模型作了如下的假设：(1)时间不变性，(2)线性的水文子系统，(3)集总参数，也就是假定了降雨，下渗、壤中流等等参数来反应整个流域内各有关过程的"平均状况"或净效应(胡金斯和孟克，1968年)。

有些模拟试图对不同的精度采用不同的(创新的)办法来解决预报问题，里德、约翰逊和福斯(1975)尝试引进变动的时间滞后，把相同时段的一组有效降雨量的要素输入其模型，以解决非线性的问题，每一个这种要素的分布都随着水文过程变化，而产生一个单元的径流深度。

吉和比特勒(1969年)提出，因下渗而产生的非线性可以从降雨-径流关系中剔除出来。从而产生一个线性系统(他们引进了一个"线性"的时间变化模型的概念)，他们提出输入应当是有效降雨(在地表饱和后产生的降雨)，不要用观测到的降雨资料。他们还提出在一条单位线中必须把基流从总径流量中去除。吉和汪(1970年)进一步修正这些概念，设计出一个非线性的时间变化模型。

胡金斯和孟克(1968年)建立了一种模型，它避免使用集总参数，而是利用一组细小的，相互独立的要素来描述流域。用这种方式，坡度、入渗率等一些重要的自然水文参数中可以更精确地计算了。这个模型的主要问题是它所需要输入的资料不容易得到。

每一种方法各有其利弊。

§5.3 降雨-径流模型

现在使用的模型中，可以直接(或经过简单的变换后)应用于

预测城市径流的模型，可能超过一百个，不管这些模型看上去多么复杂，他们都有一个或多个"基本建设单元"或者在它的结构内有几个组成部分(道迪，1969年)结合在一起，通常它们的区别在于一个或多个单元综合性描述和处置的不同。本节将简要讨论这些组成部分，并且给出可能要碰到的径流模型的限制条件。

幸和帕色(1977年)叙述道：降雨和径流的关系是水文学中最重要的问题之一，它也是最难以解决的问题之一。降雨-径流关系是定量表示所描述流域特征的响应函数。响应函数是大量的复杂和互相联系的降雨转变为径流过程的结果。这种转变过程实际上完全是在水分循环范围之内完成的，这种变换过程全部实现的特性在相当大的程度上反映了降雨-径流关系的复杂性。这种复杂性如同它们的相互影响一样，由于水文气象条件的时空变化和流域自然地理状况不同而大大增加了。

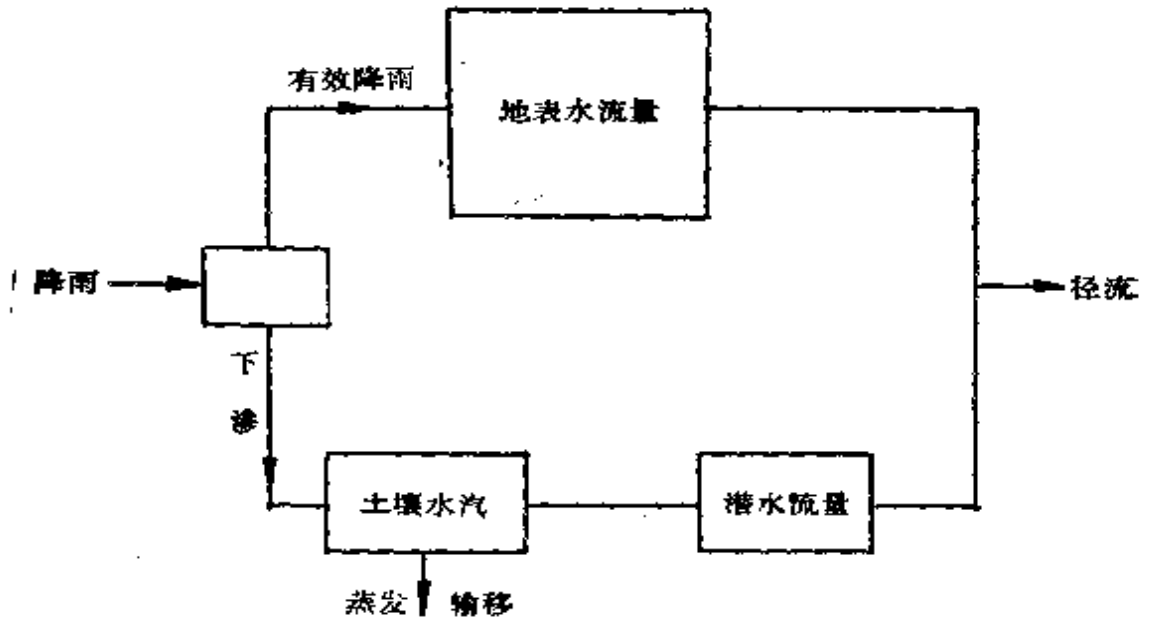


图 5-5　暴雨径流关系的三个子系统

在图 5-5 中，暴雨降水和洪水径流的关系分解为三个响应子系统(道格 1968 年)。梅和拉森(1973年)曾报告，美国大陆年降水量的70%以上是通过下渗进入土壤的。虽然这一现象可能是非常

准确的，但许多模型设计者仍然忽视壤中流、土壤含水量和地下径流的影响，而只以数学方式模拟地表径流的响应。这样的模型大体上是合理的，因为下渗的水分要经过较长时间才能到达河流，并且一般不会对只涉及较短时间的暴雨水文过程线产生影响。这种模型特别适合于城市集水区域。因为在下水道系统的设计中，工程师考虑的是将暴雨形成的高洪峰迅速安全地排泄出去，潜水几乎没有影响。

降雨-径流模型的目的，是确定有效降雨的数量和历时，有效降雨的定义是在地表滞留量满足后的降水，用数学方法来确定净降水量(其变换过程就是前面辛和帕色描述过的)是非常困难的。然而，许多模型试图去描述这些过程。

下渗

下渗理论探讨了水在重力场中从地表进入土壤的运动。下渗过程涉及到土壤母质空隙中的气态水的迁移，水的运动大多发生在非饱和的土壤中(弗莱明和迈尔斯，1975年)。

虽然下渗的原理可以相当简单地加以解释，但它的数学定义已有更多的研究。

格林和阿姆特(1911年)研究了下渗过程，并提出了一些直到今天还在普遍应用的公式。其中一个公式因常数必须由实验确定而应用有困难。摩弗尔、西托克斯、哈吉(1974年)建议公式中的两个常数可以根据土壤的性质进行推算。他们应用了格林和阿姆特公式的一种形式：

$$I=K(H+Zf+Hf)/Zf=A+(b/Zf),$$

式中：I 为下渗率(L/T)，其中 L 是水位高度，T 是时间单位；K为饱和水力导水率，即水充满孔隙时的导水率(L/T)；H 为地表以上池水的高度；Zf 为饱水带的垂直厚度；Hf 为水位高度 L 的毛管水压力。

赫顿(1940年)介绍了一个确定下渗的方法，该方法已经被广泛使用在降雨-径流模拟中，与别的广泛应用于确定下渗的公式一

样，赫顿的公式也列入了表5.1。阿摩罗切(1967 年 a)指出：这些方程中没有可一目了然地确定整个流域上的下渗。他断言的基础是预测的不确定性。即：全流域内的土壤是不均一的，并且现在的资料收集方法(见§5.1)只能估算测量点的土壤情况。他建议综合各要素并应用分段降雨输入(以一定的降雨速率瞬时输入)。在结论中，他指出这种方法也有"预测不确定性"问题。

表 5.1 确定下渗的方法

	赫顿	考斯塔科夫	赫坦-奥弗顿	菲利浦	自然条件
公式的引出	经验	经验	经验	分析	
概要的流场					
土壤平均状况	相对均匀	相对均匀	相对均匀	均匀	均匀

表 5.1 揭示了在自然条件下，下渗流是复杂的三维现象。准确确定下渗流的方向，速率和水量的所有尝试本质上都只能粗略地估计。因为土壤性质、土壤的致密度和温度是不均匀的。

填洼量

如果降雨强度超过了土壤的下渗率，雨水就会开始充填坑洼。米切尔和琼斯(1976年)研究了 5 种计算填洼量的方法 和 15 种 填洼深度模型，并得出地表填洼量函数的通用最佳模型是：

$$S=aD^b,$$

式中，S 为贮水量(英寸)，D 为在地表上最低点的深度(英寸)，a,b 为方程的参数。他们更精确地提出一平方英寸面积增加 0.1 英寸深度的计算模型，这方法就是：

$$Sr=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}(Hr-Ha),$$

式中：Sr 为在某一个参照高度以下的地表贮水量(立方英寸)，i,j 为观测点的行列序号，Hr 为参照高度(英寸)，Ha 为观测在地 表以上的高度(英寸)。

坡面漫流

罗伯逊等人(1966年)给出了坡面漫流问题的本质，他们指出："坡面漫流在时间上是不稳定的，在空间上是变化的，因为它是由降雨供给和下渗损失而形成。而两者在时间上和空间上肯定不是常数。"

在他们论文的后面部分，罗伯逊等人试图通过生成模拟降雨来除去所提到的一个限制因素。他们还谈到需要附加的简化条件。

辛和沃尔海色(1976年)认为地表径流一般是个非线性过程。并且，他们也说明了不同的研究者所使用的两类方法，即系统方法(阿摩罗切和奥罗拔，1961 年；彼得威，1971 年)和水动力方法(周文德和本威，1973 年；沃尔海色和莱吉脱，1967 年)。

系统方法研究输入-输出关系时，对系统内部结构不作任何明确的假定。水动力方法需要应用物理方面的一般原理作为假定，并且还需要对实际现象作几何形状的抽象。

辛和沃尔海色在他们的论文中深入探讨了一个径流问题水动力方法，他们认识到一个天然流域具有非常复杂的地表结构。于是他们试图回答这个问题："一个简单的几何图形能恰当描述地表径流动力学的部分重要方面吗？"图 5.6 是一个天然流域的示意图。

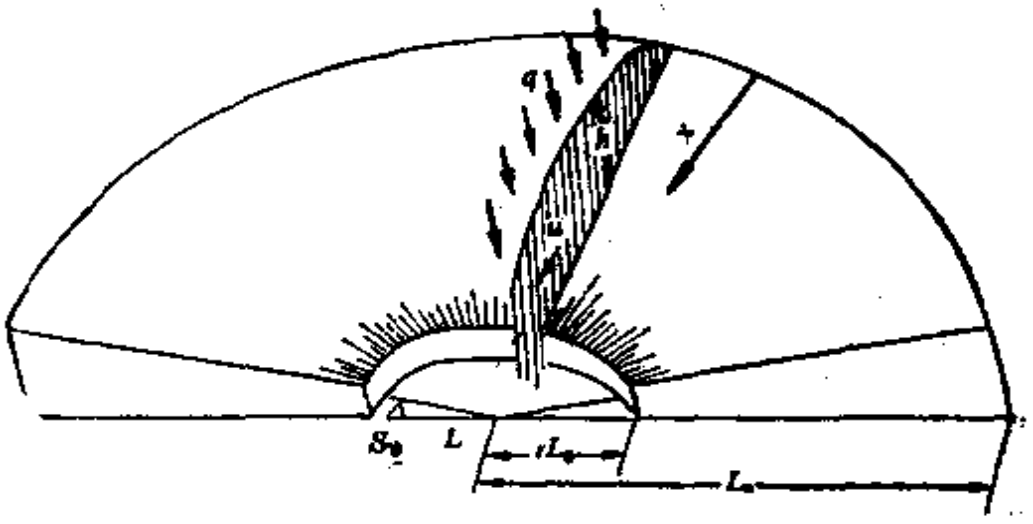


图 5-6　坡面漫流的汇聚模型(辛和巴本，1977年)

就像作者所讨论的，汇流断面的几何图形具有一些有趣的特征：

1. 它的离散模拟体是不相等的非线性梯级水库(这是一个系统观点)组成的系统。

2. 它对一连串规模减小平地的响应是相似的。

3. 在汇聚处可以计算天然流域出口的径流率。

为了描述该流域的动力响应，他们应用运动波理论，该理论包括连续的差分方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t}+u\frac{\partial h}{\partial x}+h\frac{\partial n}{\partial x}=q(x,t)+\frac{uh}{L_0-x}$$

和一个近似的动量方程：

$$Q=ah^n \text{或} u=ah^{n-1},$$

式中，L 为断面的长度，h 为当地的水流深度，u 为当地的平均流速，Q 为单位宽度出流的流量，$q(x,t)$ 为侧向入流的流量，x 为空间坐标，t 为时间坐标，n，a 为运动波摩擦关系参数。

通过"标准化"过程，参数的数目减少到可应用的格式，并引进数量"标准"化，使其在本质上替代变量并使模型更加简单明了。然而有些假定的引进可能会削弱模型的结构。

正如作者提出的那样，地表径流模型是复杂的，人们试图对实际过程描述越贴切，模型就变得越复杂。就因为在许多情况下，模型越复杂，要解出各个要素所需要的计算时间就越多，处理费用也就增加。有些时候，既要从模型中获得满足研究需要的资料，又要使收集资料花费合理，研究者必须在两者中妥协。

§5.4 城市集水区模型

在以上三节中，我们了解了模型的定义和发展，以及在天然流域中遇到的模型制作问题。城市径流不但由于洪峰和径流总量的增加而改变了河道形态(见§3.8)；而且多数情况下在城市地下设

置下水道会产生一系列的人工闭合河道。在下水道设计中要应用模型，下水道安装后，建成进一步模拟必须考虑下水道系统的排水能力。

下水道系统有三种基本类型：(1)生活污水、工业废水的下水道，(2)为迅速和安全的截留暴雨径流的暴雨下水道，(3)综合下水道，即一个系统中有二类下水道。我们将开始讨论带有简单生活污水下水道设计的城市流域模型。在本节的其余部分将讨论暴雨下水道和用于暴雨下水道设计的通用模型——推理公式和单位线。

哈默(1975年)定义下水道是："由重力流动把废水从城市区域输送到处理地点的地下防渗管道就是下水道。"而康(1975年)认为，下水道是基本的社会清洁设施，在人们与他们的伙伴组成的聚集地，在人们关系密切的社会结构中，在行人摩肩擦踵的城市区，下水道保证了清洁。下水道使人口稠密的城市有可能排除对健康、舒适，安全和美好生活的威胁。输送社区废水仅仅是城市卫生总规划的一部分，清洁的全部方面就是从城市环境中清除现存的垃圾。

康提到，下水道的建设可以追溯到公元前3700年，在中世纪(也就是灾害和鼠疫流行的年代)由于各种原因而停止了，到18世纪又重新开始建设。有些很古老的污水工程，即使以今天的标准来看，也会对人类的创造力感叹不已。在过去的三个世纪中，当人们对预防疫病的知识已经不断增加的时候，污水工程已经成为一种必需的，城市结构中不可缺少的组成部分。城市预算的一个主要部分是用于安装和维修排水工程系统。设计这样的污水系统已发展成一门科学，同时也是一门艺术。"任何'书本'都无法代替一个充满智慧的设计者——咨询工程师或一个市政设计工程师。"

基本下水道的设计

在1969年ASCE和WPCF联合委员会会议后，将排水工程开发分为四个阶段：(1)预备或调查阶段，即为决策和最终设计提

供一个概括的技术和经济基础，(2)设计，(3)施工，(4)运行。我们将简要讨论前面两个阶段。

第一阶段，预备或调查阶段是极其重要的，本阶段的最后成果是输入量，也是排水工程设计阶段的基本内容。在这一阶段，要估算人口的增长和迁移，初步确定工厂位置，预测社区通常需要的排水工程设施。为了取得基本资料，可以进行踏勘，应用各种人口增长公式，需要更多的直感设想和计划，要研究下水道网络可能配置成本估算和筹措资金的方法，本阶段的最后成果主要是定性的，而非下水道工程建设的设计或计划。然而，最后的工程报告，仍然是设计阶段决定性的输入，在 ASCE 和WPCF的联合委员会会议之后，报告将包括这些项目：

1. 问题说明和客观条件回顾；

2. 为设计阶段提供所需要的容量和条件；

3. 取得所需容量和条件的方法；

4. 所推荐系统的一般布局；

5. 建立适用的工程标准和设计的基本规模，为准备施工、可行性决策和财政计划提供一个可靠的基础，以及相当准确地运行费用估算，并考虑解决的方案；

6. 各种可采用的筹措资金的方法及其对工程的适用性。

设计阶段(第二阶段)的目的是提供有关进行投标和完成工作的基础的文件，它以下水道网络的布局开始，然后确定设计水量(菲希尔等人，1971年)。在布局时，对这些物理因素诸如建筑物在下水管线以上的高度，土壤的类型和基岩的深度，冰冻线的深度，街道的位置，以及接通电源数目和土地利用类型等文化因素都必须仔细地了解。

许多城市土地利用的典型设计流量标准，由联合委员会报告提供(见表 5.2 和表 5.3)，康(1975 年)提出一份类似的摘要，水量可以根据这些数据的恰当倍数估算。近年来，估算工业负荷变得更加复杂，因为公法 92-500 的规定和其他环境法规已在大多数情

况下使企业尽量循环用水或改变排水方法。康提出了"棒球场法"估算少量几种经过选择的工业预期排水量。

对下水道系统内流量可能具有比较重要影响的因素，是常态曲线(康，1975年)，例如，如果监测居住区一天排放污水量，就会发现流量变化会呈现一种典型的规律，从夜间的最小值开始逐渐增加，在晚餐时间达到峰值。这种类似的曲线也可以在工业区或商业区观测到，各种土地利用本质上在一天中的特定时间里对下水道系统都会有一个较高的要求，工程最终设计必须考虑到流量的这些变化。

康指出了两个基本的设计原则：

1. 在所谓的"正常"流量阶段，下水道设计的流量绝不应大于二分之一满流水平。

2. 所有下水管线应当依据合适的过水能力来设计管线，不能超载(即，溢流和壅水)或产生摩擦损失(损坏管壁)，后者将损害管线的过水能力。

表 5.2 商业区的平均排水量

建筑物类型	平均排水量(加仑/天·人)
商店、办公室和小商业区	12～25
旅馆	50～150
汽车旅馆	50～125
汽车露天影院(每车3人)	8～10
学校(无淋浴)8小时/天	8～35
学校(有淋浴)8小时/天	17～25
旅行者和拖车宿营	80～120
休养和夏令营	20～25

注：1加仑×3.785＝1升，

来源：水质污染控制协会和美国土木工程师学会联合委员会(1969年)。

有几个公式工程师们可以用来确定流量和所需要管道的尺寸，所有的流量公式和图表通常都与过水能力、水力坡度、管内阻力或摩擦系数和管道的尺寸有关。其区别只在于各种数据的重要性不同(康，1975年)，下面是三个基本的公式。

1. 满宁公式(变动"n"值适用于明渠或暗渠水流)

$$V=\frac{1.486}{n}R^{2/3}S^{1/2},$$

2. 科特公式(适用于重力流条件)

$$V=\frac{\frac{1.81}{n}+41.67+\frac{0.0028}{S}}{1+\frac{n}{\sqrt{R}}\left(41.67+\frac{0.0028}{S}\right)}\sqrt{RS},$$

3. 海森和威廉姆公式(适用于暗渠，或有压污水管)

$$V=1.318CR^{0.63}S^{0.54}。$$

公式中，V 为流速(英尺/秒)，R 为水力半径(英寸)，S 为水力坡度(英尺/英尺)，n 为管道的糙率系数，C 为与管道材料和使用期有关的系数。

暴雨下水道设计

预报任何时候的生活污水流量可以很有把握，因为输入的变量可以准确地监测或计算。然而，暴雨下水道设计却不那么容易完成，因为在这种情况下，设计者面对的是由降雨分布和地表径流造成的不确定的非线性响应。另外，一个不容易预测的因素是不断增加的不透水地面对径流的影响。

在暴雨下水道设计中，输入的流量由气象和文化变量(即，人们改变了城市地表的特性)所决定。有些模型被工程师用以确定暴雨下水道需要的尺寸。最流行的是推理方法。近年来，单位线已赢得人们的青睐。这两种方法将在下面详细探讨。

推理公式

表 5.3 几个典型设计排水量

城　　市	年份和资料来源	平均耗水量(加仑/天·人)	人口数(千人)	平均排水量(加仑/天·人)	排水量设计系数(加仑/天·人)	备　　注
马里兰州 巴尔的摩	…	160	1,300	100	135×因数	因数2到4
加利福尼亚洲 伯克利	…	76	113	60	92	
明尼苏达州 波士顿	…	145	801	140	150	流量为全负荷的一半
俄亥俄州 克利夫兰	1946(6)	…	…	100	…	
罗德岛 克兰斯顿	1943(6)	…	…	179	167	
衣阿华州 德斯茅芮斯	1949(6)	…	…	100	200	
密西西比州 格兰德拉比斯	…	178	200	190	200	
南卡罗莱纳州 格林威尔县	1959	110	200	150	300	服务范围包括格林威尔，下水管径24吋，较小设计为全负荷300加仑/天·人的一半，较大下水管径超过24吋，并设计有一英尺的余地
马里兰州 霍金斯唐	…	100	38	100	250	
阿拉巴马州 杰弗逊县	…	102	500	100	300	
肯萨斯州 约翰逊县	1958					
密逊唐谢茂主要排水区		70	70	60	1,350	大多数房屋的地下室带有外部排水设施
印帝安克里克主要排水区		70	30	60	675	大多数房屋的地下室带有内部排水设施

（续表）

城　　市	年份和资料来源	平均耗水量（加仑/天·人）	人口数（千人）	平均排水量（加仑/天·人）	排水量设计基数（加仑/天·人）	备　　注
俄亥俄州 辛尼斯威尔	1947(6)	…	…	125	600	包括下渗和屋顶汇水
南达科他州 拉比德城	…	122	40	121	125	
纽约州 罗切斯特	1946(6)	…	…	…	250	纽约州健康标准协会
加利福尼亚州 圣塔莫尼卡	…	137	75	92	92	
路易斯安娜州 谢弗波特	1961	125	165	…	…	设计排水量为150加仑/天·人，加600加仑/天·英亩的下渗，下水道管径超过24英寸，设计有一英尺的余地
密苏里州 圣乔斯夫	1960	…	85	125	450	主要下水道
					350	截污管道
明尼苏达州 斯必灵菲尔德	1949(5)	…	…	…	200	特殊规划工程需要150加仑/天·人
俄亥俄州 塔列多	1946(5)	…	…	…	160	
华盛顿特区 郊区生活区	1946(5)	…	…	100	2至3.3×平均值	
密西西比州 怀俄明	1960	150	50	82①	400	① 计算实际民用污水量，不包括下渗或工业用水量

注：1加仑×3.785＝1升，1加仑/天·英亩×0.00925＝1立方米/天·公顷，1英尺÷0.3＝1米，1英寸÷2.54＝1厘米。

推理方法由克内曲林(1889年)引入的。它已经成为在城市排水设备设计中估计洪峰流量(面积小于五平方英里)的应用最广泛的方法(夏克等人,1967年),推理公式如下:

$$Q=CIA,$$

式中,Q 为设计洪峰流量(英尺^3/秒),C 为径流系数(无量纲),I 为重要时段 t_c 的平均降雨强度(英寸/小时),t_c 为集流时段,A 为排水区面积(英亩)。

维萨姆等人(1977年)指出:"推理方法的概念就是一场强度稳定且均匀分布的降雨在全流域产流时,设计点将形成最大流量。"在经过时间 t_c 之后,这个条件可以满足,t_c 通常是指水从排水区域最远的部分流到出口的时间。

确定 C 的值是困难的,因为该系数取决于很多水力、自然地理和气候要素的变化(见§5.2的非线性化)。表 5.4 列出了联合委员会报告所推荐的一些数据。

降雨强度 I 涉及下列因素:(1)平均的发生频率,(2)降雨的强度历时特性,(3)集流时间 t_c(根据联合委员会报告)。降雨频率是下水道设计的决定性因素,是下水道系统提供防护的程度,联合委员会报告中列出了几个工程局提供的数据,并用于设计:

1. 住宅区的暴雨下水道设计为二年至十五年一遇,平均为五年一遇。

2. 商业区或黄金地区的暴雨下水道依其经济价值,一般为十年至五十年一遇。

3. 防洪设施,取五十年一遇或五十年以上一遇。

图 5-7 列出了马萨诸塞州波士顿市的降雨强度-历时曲线。利用荷曲菲尔德(1961年)提供的资料可以得到美国其他部分的类似曲线。

t_c (集流时间)的估算包括入口时间加上水流在下水道内从排水区的最远点到设计点的时间。地表径流受上面描述的确定"C"值的因素的影响,当暴雨降水一旦进入下水道,流量就可以用满宁

公式，科特公式或其他公式准确地计算。

表 5.4 径流系数表(表内对支流的一般性质分类采用报告中的分类方法)

地区分类	经流系数	地区分类	经流系数
商业区		公　　寓	0.50～0.70
下城区	0.70～0.95	工 业 区	
邻近区	0.50～0.70	轻	0.50～0.80
住宅区		重	0.60～0.90
独居家庭	0.30～0.50	公园、公墓	0.10～0.25
多个家庭，分居	0.40～0.60	游 乐 场	0.20～0.35
多个家庭集居	0.60～0.75	铁路场地	0.20～0.35
郊区住宅区	0.25～0.40	未建设的	0.10～0.30

经常使用的一种合乎需要的综合径流系数，是根据汇流地区中不同类型的地表，所占的百分比进行计算的，这种过程经常以典型"样本"的形式，作为总地区径流系数的选择向导，考虑地表类型的径流系数通常用：

地表特征	径流系数	地表特征	径流系数
铺筑过的		屋　　顶	0.75～0.95
沥青，混凝土	0.70～0.95	草地，粘土	
砖	0.70～0.85	平坦的2%	0.13～0.17
草地，砂土		平均的2-7%	0.18～0.22
平坦的，坡度为2%	0.05～0.10	陡坡>7%	0.25～0.35
平均的，坡度为2-7%	0.10～0.15		
陡坡，坡度>7%	0.15～0.20		

这两方面的径流系数一般适用于5～10年频率的暴雨。低频率、高强度的暴雨需要用大的径流系数，因为下渗和其他损失在径流中所占的相应小一些。径流系数是建立在这样的假定上：即当地面冻结时，设计暴雨不会发生。

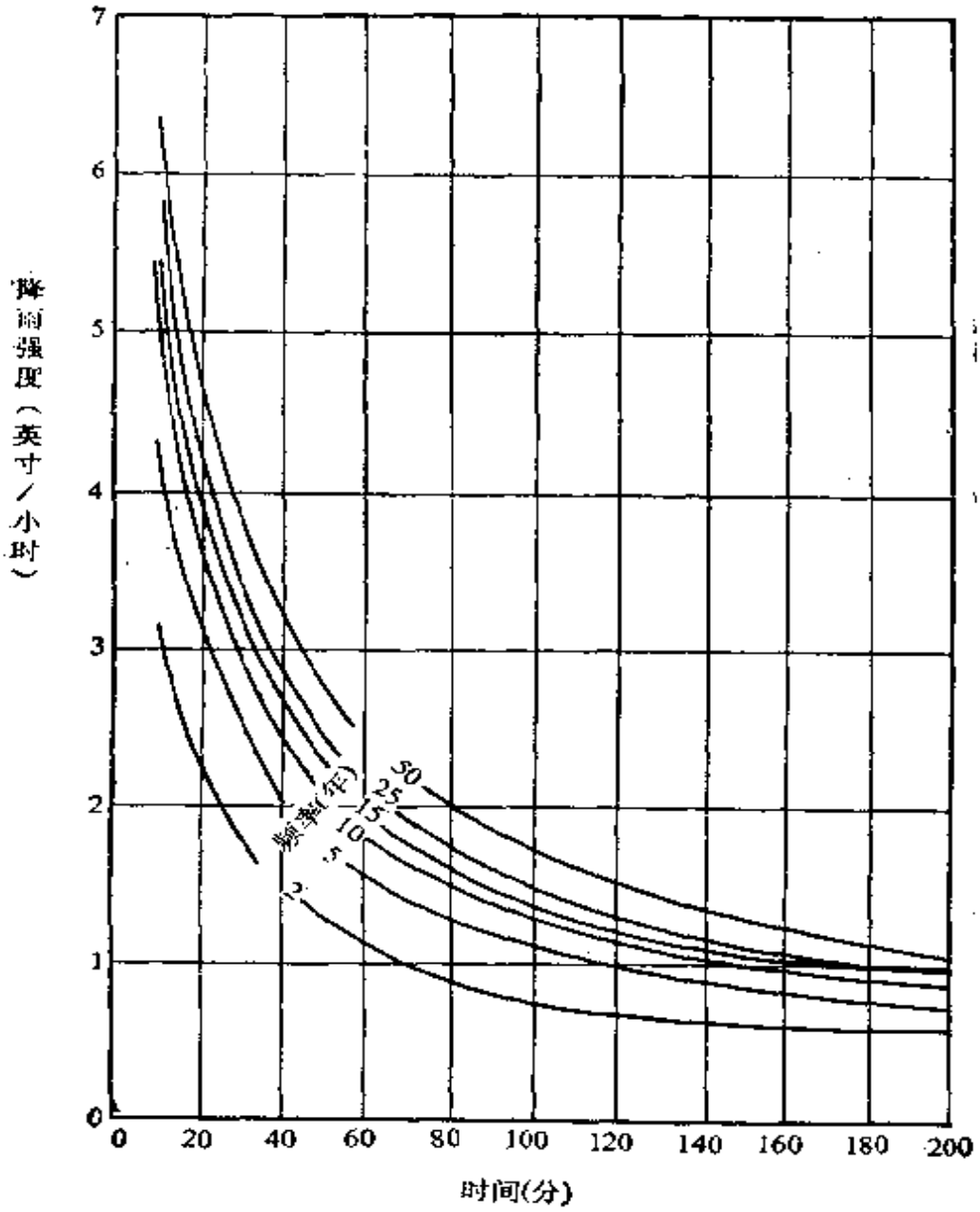


图 5-7　马里兰州波士顿的降雨强度-历时曲线
（ASCE 和 WPCF 联合委员会，1969年）

排水面积 A 能精确测定，可以通过研究航测象片、测量或其他合适的手段完成。

在过去的几年中，推理方法曾受到怀疑，夏克等人(1967年)测试了推理方法中一个含糊的假定，即计算的设计洪峰流量发生同

设计者选择的降雨强度频率是一致的，他们研究了马里兰州巴尔的摩 20 块面积的下水道和入口处资料，面积范围从0.2英亩至150英亩。作者归纳了他们的成果，提出上述假定是基本准确的，然而他们警告说，这些研究仅涉及到一个城市，它的结论并不能认为是普遍适用的。

由于推理公式只估计洪峰流量，而不计算流量过程的形状(巴巴达克斯和波尔，1973年)，也不考虑坡度和流域形状以及其他因素的影响，就有人试图修正并希望改进模型(格里高利和阿诺德，1932年)。尽管如此，推理公式及其基本概念已经并继续在一般工程实际中应用。

单位过程线(参见§2.1)

单位线是舒尔曼(1932 年)建立的一个"线 性"模 型①(纳 须，1959年)，格雷和威格汉(1970年)定义单位线(或单位过 程 线)为"在特定时段中，均匀发生在一个汇流流域上的一英寸直接 径 流(有效降雨)所产生的流量过程线"。

摩根和约翰逊(1962年)提出单位线的基本概念可以归纳为下面一些原则：

1. 对于一定的排水区域，相同历时，相似暴雨产生的地表径流过程线的时间底长是相同的，与降雨强度无关。

2. 对于一定的排水区域，相同历时，相似暴雨产生的地表径流过程线的纵坐标与地表径流总量成正比。

3. 对于一定的排水区域，在特定的暴雨时段产生的地表径流的时间分布与其他暴雨时段产生的地表径流是相互独立的。

图 5-8 证明了这三个前提。过程线：(1)由一英寸的有 效 降雨在一个单位时段产生的；(2)示出二英寸的降雨过程线历 时 与(1)相等。(该过程线证明了原则一和原则二，即叠加原则)(麦考梅厄和拉逊森，1968年)；(3)说明了原则三，即降在排水区域上的

① 非线性的单位过程线在过去二十年里已经作了很多研 究(辛，1964年；道格，1959年)。

一次连续暴雨在单位时段中分别降了一英寸、二英寸和0.5英寸的单位过程线。

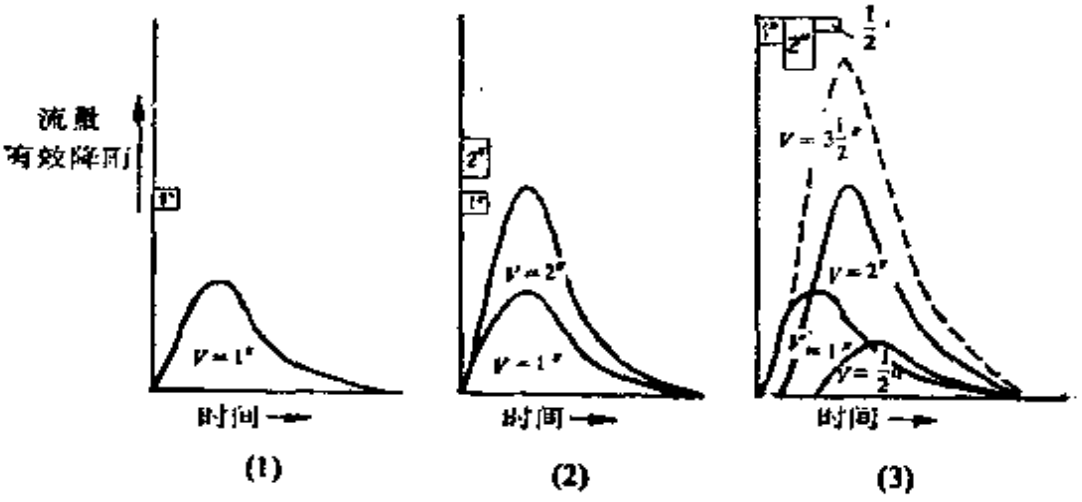


图 5-8 (1)单位过程线，(2)增加2英寸有效降雨产生的单位线过程，(3)一次暴雨产生的单位线过程(摩根和约翰逊，1962年)

实际上，要找到一场能呈现所需的线性响应的暴雨是困难的。维萨姆等人(1977年)提出对特定流域上导出单位过程线，必须选择(1)独立产生的暴雨(简单的暴雨结构)，(2)降雨过程均匀分布的暴雨，(3)空间均匀分布的暴雨。这类的气象现象只能发生在有限规模的流域上。虽然发生在2000平方英里以上的暴雨已经被应用过，作者还是建议上限取1000平方英里，而作为一种经验，下限取1000英亩。

埃斯佩，奥特姆和格拉弗斯(1977年)指出单位时段最好稍小于流域汇流时间。舒尔曼(1949年)建议排水面积大于1000平方英里，采用12小时为单位应比以24小时为单位更好。面积为100至1000平方英里，用6、8或12小时为单位，面积为20平方英里，采用2小时为单位，对于更小的面积，采用三分之一或四分之一左右的汇流时间作单位。

在单位时段选定后，暴雨必须产生0.5至1.75英寸的直接径流。最好能检验流域内5个合适的暴雨事件，从而得到一个平均

的纵坐标值。为了使每次暴雨相当于1英寸直接径流，应当缩小各个暴雨直接径流的纵坐标，最终单位线是从所选暴雨事件的平均纵坐标并修正为1英寸的直接径流推导得到。

由于城市研究区域通常从几英亩到100平方英里，相对来说面积较小，所以汇流时间较短的单位线也已经建立。埃斯佩等人(1977年)利用美国各地的41个小流域的降雨-径流资料求出了以10分钟单位过程线和它的形状影响因素(泰勒和斯曲 华 芝，1952年；伊格逊，1962年。在他们的分析中采用了有些类似的方法)。他们研究的目的在于考察一种描述小流域的径流水动力过程更确定的方法，这时可以采用推理方法，但其他时候单位过程线占有较大的优势。

埃斯佩等人发现有五个自然地理要素是最重要的指标：

(A) 流域排水面积(平方英里)；

(L) 从设计点向上游至流域分水岭干流的总长度(英尺)；

(S) 干流的坡度(英尺/英尺)定义为 $H/(0.8L)$，这里 L 是上面确定干流长度，H 为所选两个点 A 和 B 的高度差(A 点位于流域分水岭往下游 $0.2L$ 距离的河底，B 是设计点的河底)；

(I) 排水区内不透水面积的范围(以百分比表示)；

(Φ) 流域集水系统的过水能力。

埃斯佩等人注意到，早期研究(1965年)中，因素"I"在描述某些城市流域的径流特征时效果不好。因此，就需要一个更综合性的指标，从而引进了 Φ，Φ 可以分为 Φ_1 和 Φ_2，其中 Φ_1 是水道特征(埃斯佩等人1965年)，即水道改建的数量和二级排水的类型，Φ_2 是水道中阻水植物的数量。

10分钟单位过程线的经验公式见表5.6，以及图5-9。作者告诫大家，Φ 值难以被引入具有非典型排水特征的流域中。

同推理公式一样，单位过程线也可以考虑某些基本非线性响应的问题，这些问题已是许多研究的主题。然而，也许这些问题的总体要求和一般概念对城市流域来说已被接受，虽然有缺点，但

从广义上说，它们还是对城市流域降雨-径流响应作了描述。

表 5.5 流域排水系统分类

Φ_1	
0.6	与输水道系统相连的大量改建河道和暴雨下水道系统
0.8	扩建并清理的现有河道，部分河道经过改建以及暴雨下水道系统
1.0	天然河道状况
Φ_2	
0.0	河道内没有植被
0.1	河道内有少量植物
0.2	河道内有中等量的植物
0.3	河道内有大量的植物

$\Phi=\Phi_1+\Phi_2$

（埃斯佩等人，1977年）

表 5.6 十分钟单位线的方程式

方 程 式	总方差贡献
$T_R=3.1L^{0.23}S^{-0.5}I^{-0.18}\Phi^{1.57}$	0.802
$Q=31.62\times10^3A^{0.96}T_R^{-1.07}$	0.936
$T_B=125.89\times10^3AQ^{-0.95}$	0.844
$W_{50}=16.22\times10^3A^{0.93}Q^{-0.92}$	0.943
$W_{75}=3.24\times10^3A^{0.79}Q^{-0.78}$	0.834

L——从设计点至由流域上边界的主河道总长度(英尺)。

S——主河道坡度(英尺/英尺)，定义为 $H/0.8L$，这里 L 是主河道长度。H 是 A 和 B 两点的高度差。A 位于从流域上边界以下 $0.2L$ 处的河底。B 位于下游设计点的河底。

I——流域内不透水地区的百分比。

Φ——无流域输水因素(前文中已描述，无量纲)。

A——流域汇水面积(平方英里)。

T_R——单位过程线上升历时(分)。

Q——单位过程线的洪峰流量(立方英尺)。

T_B——单位过程线的时间底长(分)。

W_{50}——50%洪峰流量时的单位线宽度(分)。

W_{75}——75%洪峰流量时的单位线宽度(分)。

（埃斯佩、奥特姆和格拉弗斯，1977年）

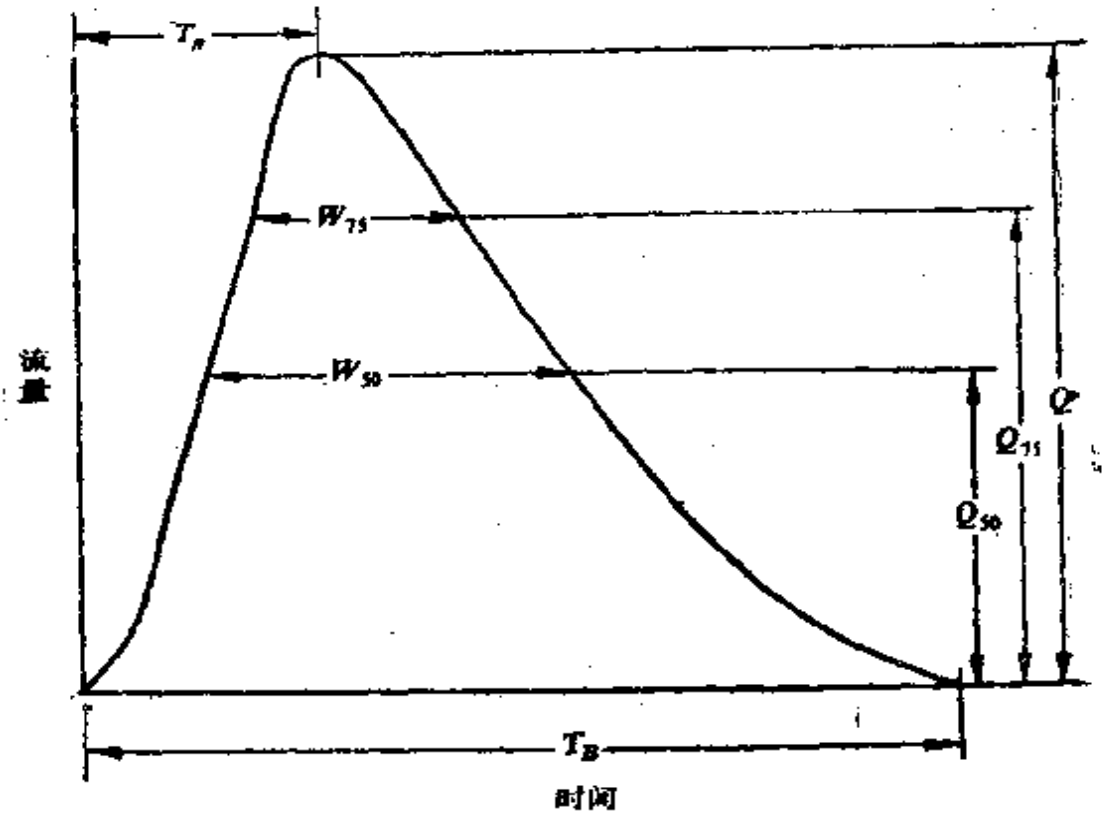


图 5-9　单位过程线参数的定义(伊斯帕等人，1977 年)

§5.5　城市集水区模型——水量模型

有时候，推理方法和单位过程线被应用来估算城市流域内的径流量，这些程序可以简单地进行手算，随着高速模拟和数字计算机的引入，打开了一扇进入应用复杂费时的数学方法的大门。这些方法可以充分地接近降水和径流的自然过程。这种模拟方法由弗莱明(1975年)创立，叙述如下：

模拟模型是把有些现象的物理概念用数学方法表示出来。水循环模拟模型的发展涉及到利用许多数学函数来表示包含在许多过程中的相互关系。

拉森(1972年)扼要指出，感谢数值程序的发展，解决了非恒定流的偏差分方程并使快速计算变得很容易，这些方法现可以应用于一个全流域产流的水文过程。

杰姆斯(1965年)也许是第一个看出数字计算机在估算城市发展对洪峰影响方面的潜在能力的人。从那以后，城市暴雨模型的数量，实质上是成倍增加。大多数城市径流模型的基本组成见图5-10。模型可以为满足特殊的课题而构造(迈克菲尔逊和斯曲尼德，1974年)，在§5.4我们认为，(1)推理公式用于确定流量过程线的峰值远好于过程线的形状(巴巴达克斯和波尔，1973年)(2)单位过程线可以估计过程线的峰值和形状。在本节中，我们将提供几个模拟模型，用来更综合地估计到达受水河道的暴雨过程线。

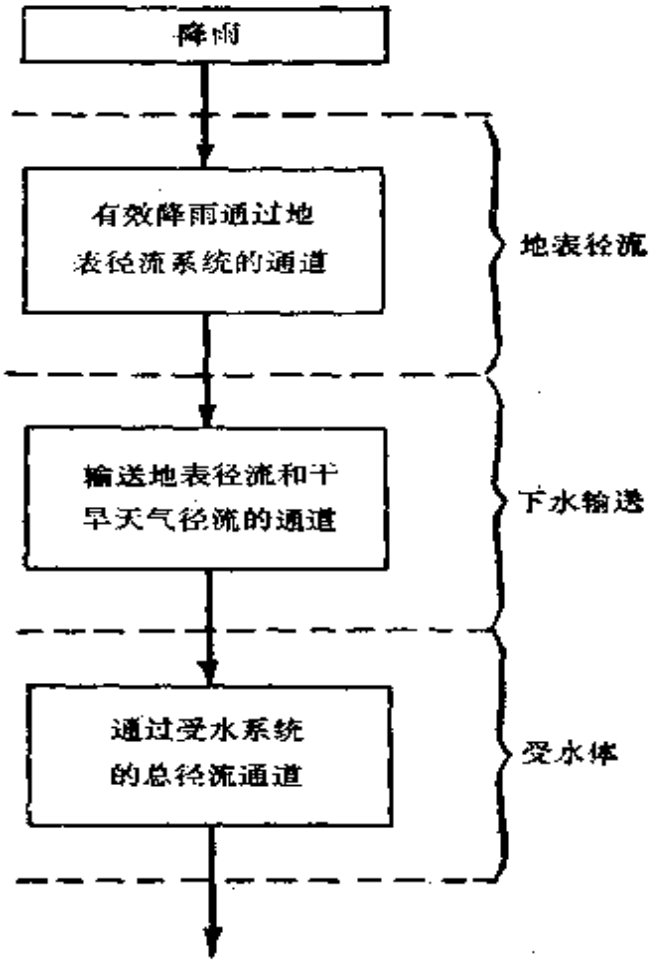


图 5-10　大多数城市径流模型的基本组成

任何城市暴雨-径流模型的目的，都在于尽可能贴切地再现给定暴雨情况下的地表径流过程线。为了达到目的，每个模型必须估算出一个数量(x)，并把该估值置于恰当的时间构架(y)内。一

组有限数量的点据将产生一条模拟的暴雨过程。每一个模型都根据其采用的确定各个数量和计时的方法而变化。一定时间的暴雨地表径流量和计时主要与下列因素有关：(1)降雨特征，(2)地表的不透水程度，(3)地表坡度，(4)流域面积。许多模型试图确定有效雨量(这发生在地面蓄水饱和以后，或发生降雨率超过地表下渗速率时)，为此，下渗、地表滞留、坡度和暴雨降水特性(即历时和强度)都必须加以计算。

数量和计时直接与所研究的排水面积有关。如果在每个排水区域可得到无数非常详尽的自然特性的资料，那么这些资料输入就能十分精确地估算径流过程。事实上，这种资料是得不到的(并且利用这种资料所需计算时间的费用是非常高的)。因此，绝大多数模型不得不采取适当的细分(离散化)程序。离散化包括把流域细分成最理想的离散子流域面积，这样大小的面积能有效地利用可取得的资料以产生满意的模拟结论，并且使计算机的机时费用不至于太高。

水量模型

维萨姆(1966年)认为，如果研究者能更好地了解各个集水区域的水文特征。那么模拟一个大(多个集水面积)区域的水文过程将是一个简单的程序。因为大的流域是由许多小的集水面积组成的。正如他所描述的：这种研究基于一种假定，小城市(从小于一英亩至几英亩大小)排水区域能看成一个线性的贮水器，如果这种假定可以相信的话，那么，实现以经过改进并且较简单的程序来预测高度开发地区的暴雨集水系统产生径流的希望已为期不远了。因为大多数综合的城市排水区域能分解为更小面积的子集合，一般是小支流汇入雨水集水口的集水面积，所以这些小区域的水文过程就极其重要的。

维萨姆完成了线性水库模型，其贮水量 S 为：

$$S=KQ, \qquad (1)$$

式中，S 为贮水量，与径流成正比；K 为(滞后时间)水库常数或贮

水系数，具有时间单位(在该模型中是分钟)；Q 为出流量或径流率。

连续性方程是：　　$$I-Q=ds/dt, \tag{2}$$

式中，I 为贮水器的入流量(有效降水)。

如果我们把公式(2)代入(1)中，并假定在 $t=0$ 时，$Q=0$，我们就得到方程

$$Q=I(1-e^{-t/k})。 \tag{3}$$

假定有效降雨在径流开始后的 t_1 时刻停止了，那么任一时刻 $t>t_1$ 的出流量由下式得出

$$Q=Q_1e^{-\tau/k}, \tag{4}$$

式中，$\tau=t-t_1$，为降雨停止后的时段。

维萨姆采用的降雨以 1 分钟增量，并且发展了 1 分钟单位过程线，它可由上面公式 C 和 D 描述，在公式 C 和 D 中以 1 分钟代替 t 值，并且以 Q_{max} 取代公式 D 中的 Q_1，我们得到：

$$Q_{max}=I(1-e^{1/k}),$$
$$Q_\tau=Q_{max}e^{-\tau/k}, \tag{5}$$

式中，$\tau=t-1$。

这两个公式就是维萨姆模型，其他论文(维萨姆 1968 年；维萨姆、基廷和凯列尼萨，1970年)进一步发展和改进了这些概念。

由于有效降雨或净雨理论上必须等于径流总量，损失必须从降雨总量中扣除，维萨姆指出，这些损失在天然流域中同样存在。即截留、填洼和下渗。然而，对于不透水的集水区域，基本的损失是填洼，它呈现指数衰减型函数。

填洼是通过从最初的几分钟降雨中扣除专门的水量来计算的，如果径流量仍然减退，达不到调整后的降雨量，那未要扣除剩余暴雨一个固定的降雨比例。这种过程类似于早期由威尔克(1964年)采用的Φ-指标方法。为了有效地利用这一过程，必须基于：(1)对于不透水地区，一些填洼的知识是有用的，(2)要有处理前期情况对数量影响的方法。根据维萨姆(1966 年)对四个地区的研

究，平均的损失范围从0.04英寸/每场暴雨至0.14英寸/每场暴雨。威尔克(1964年)建立了所研究的区域每场暴雨的损失量与平均排水区域坡度的关系：

$$L=0.162-0.0395S,$$

式中，L 为每场暴雨损失量(英寸)；S 为坡度以百分比表示。

模拟的程序包括：

1. 从降雨模式中扣除这些损失，
2. 确定公式(3)，(4)和(5)中的 K 值，
3. 在合适的时间结构中，将这些数值代入公式(5)，
4. 在图中标上这一点，
5. 重复步骤1至步骤4得到下一点，
6. 继续步骤1至步骤5直到得出暴雨过程线。

维萨姆(1966年)利用该模型得出30条暴雨过程线。将这些综合过程线与实际过程相比较，发现这些峰值的绝对误差从0.4%到30%(有些超过，有些不足)，其平均值为9.0%，这个精度被认为是满意的。虽然不透水集水区域实际贮存性质具有一点非线性，作者还是断定由线性造成的偏差不足以证明较复杂的非线性分析就来得更好。

维萨姆(1968年)进一步改进 K 值(滞后时间)以完善模型，最适当的 K 平均值($\overline{K}$)定义为：

$$\overline{K}=0.015(nL_2/0.015\sqrt{\overline{S}})^{0.66},$$

式中，n 为满宁糙率系数，L_2 为明沟水流的最大距离或径流长度，S 为明沟的平均坡度(英尺/英尺)。

维萨姆等人(1970年)利用该模型预测一个(多进水口)23英亩的住宅区的水文过程线，并代入(1)一个简单的Φ指标，(2)扣除与Φ指标有关的初期填洼量，(3)呈指数衰减的函数(赫顿模型)。他们发现那儿采用简单的Φ指标，就出现过高预测过程线上升段，而低估退水段的趋势。采用第二步的减水模型改善了整个过程线(给出最好的结果)，而指数衰减函数的应用通常可以相当好的拟合峰

值部分，但在可靠的重现过程线的前面部分通常是失败的。一般来说，利用这个模型得到的结果是满意的。

在暴雨的最初几分钟，城市径流主要来自于不透水地表。在这篇论文中，作者们试图确定以透水地面产生径流为主时候的转换点，他们发现没有正确的结论能得出转换点的概念。

陈和圣比斯基(1971年)建立了一种城市暴雨径流模型，现在将简要地加以讨论。流域按照几何图形离散化的程序划分为矩形的子流域，它们具有适度均一的流域特征，如地表覆盖和地面坡度是基本均一的，这些子流域并不需要相同的面积，它们构成明沟和管道的集合，加强了径流的连通性。

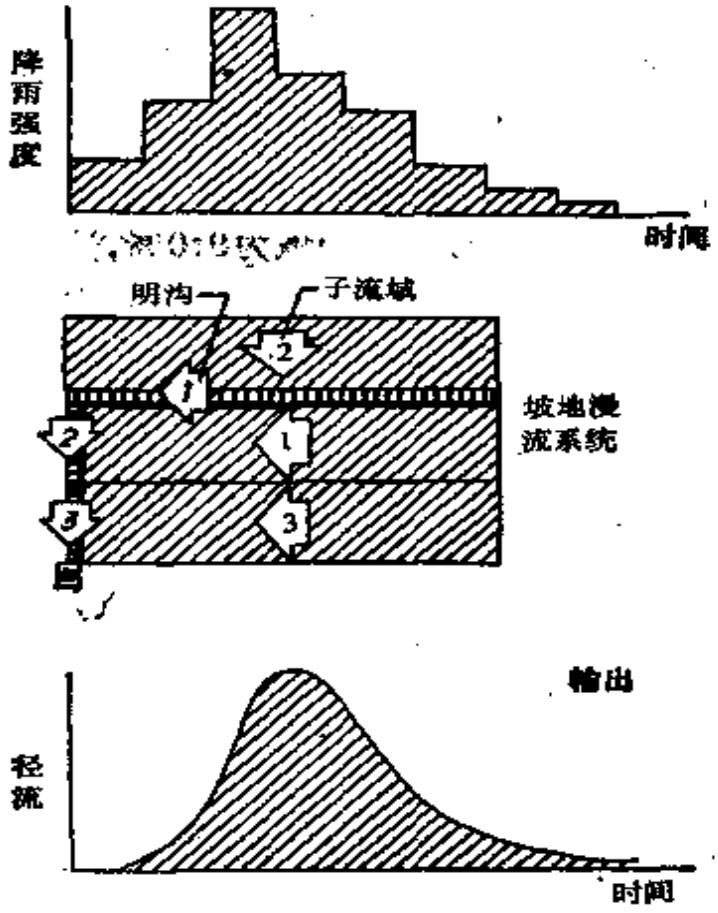


图 5-11　排水系统的定义(陈和圣比斯基,1971年)

图 5-11 中间的略图显示了径流的累积，径流从子流域 2 进入明沟 1，在拐角上与子流域 1 的径流汇合等等。模型的下一步是

表示这些径流的水力性质[即地表面积、宽度、地面坡度、满宁糙率系数，滞留深度(填洼量)和下渗速率]。图可以用来确定这些特征中的一部分，而表格和曲线则用来估算地表的糙度和下渗率。对于不透水区域，滞流深度取 0.0625 英寸；而对透水地区，取 0.25 英寸。后面这些数据是根据克劳福德、林思里(1966年)、ASCE 和 WPCF 联合会联合委员会(1969年)完成的研究得到的。

图 5-12 是该模型的程序框图，每一步骤的解释如下(陈和圣比斯基)：

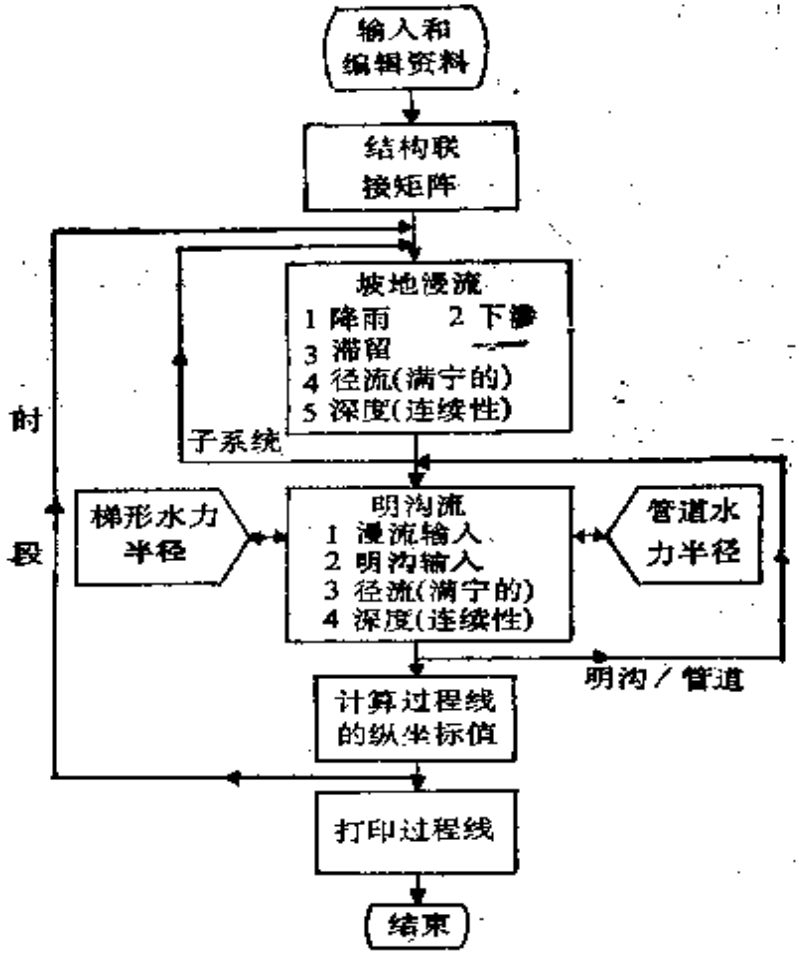


图 5-12 水文过程线计算程序框图(陈和圣比斯基，1971年)

第一步：加在子流域上的降雨由下式计算

$$D_1 = D_t + R_t \Delta t,$$

式中，D_1 为降雨后的水深，D_t 为子流域在 t 时刻的水深，R_t

为Δt时段中的降雨强度。

第二步：按赫顿的指数函数计算下渗率(I_t)

$$I_t=f_0+(f_1+f_0)e^{-\alpha t}$$

并减去现有在子流域上的水深，

$$D_2=D_1-I_t\Delta t,$$

式中，f_0为在时间t接近无穷大时的最小下渗率，f_1为在时间为零时的最大下渗率，α为衰减系数，D_2为下渗后的水深。

第三步：如果子流域上的水深D_2大于特定的滞留深度D_d，那么出流量可以用满宁公式计算：

$$V=\frac{1.49}{n}(D_2-D_d)^{2/3}S^{1/2},$$

$$Q_w=VW(D_2-D_d),$$

式中，V为流速，n为满宁糙率系数，S为地面坡度，W为宽度，Q_w为出流量。

第四步：子流域的水深由连续性方程确定，从前面的步骤中可以得到，

$$D_{t+\Delta t}=D_2-\frac{Q_w}{A}\Delta t,$$

式中，A为子流域的地表面积。

第五步：重复第一步至第四步通过所有的子流域都完成计算为止。

第六步：明沟的入流量(Q_{in})是各支流流域的出流量($Q_{w,i}$)及上游明沟的直接流量($Q_{g,i}$)之和

$$Q_{in}=\sum Q_{w,i}+\sum Q_{g,i}.$$

第七步：入流量增加了明沟的现有水深(按照其几何形状)

$$Y_1=Y_t+\frac{Q_{in}}{As}\Delta t,$$

式中，Y_1和Y_t为明沟的水深，A_s为在Y_1和Y_t之间的平均水表面面积。

第八步：明沟的出流计算，采用满宁公式

$$V=\frac{1.49}{n}R^{2/3}S_i^{1/2},$$

$$Q_g=VA_c,$$

式中，R 为水力半径，S_i 为沟府坡度，A_c 为水深在 Y_1 时的过水面积。

第九步：求解连续性方程的解，确定明沟同时有出入流量时的水深，那么：

$$Y_i+\Delta t=Y_1+(Q_{in}-Q_g)\frac{\Delta t}{As}。$$

第十步：重复第六步至第九步直到所有的明沟都计算完毕。

第十一步：把到达设计点的径流沿时间轴加上去，水文过程线一个纵坐标值就产生了。

第十二步：在连续的时段内重复第一步至第十一步直到完整的过程线都计算出来为止。

瓦特和凯特(1975年)提出了皇后大学城市径流模型(QUURM)并称，除了在校正野外观测的地方有点复杂以外，该模型避免了过多的复杂性。模型可以分解为两个部分：(1)确定各个进水口的水文过程线，(2)组合这些过程线并通过下水道演算到出水口。

在第一部分，全流域再划分为多个进水口的子流域，每个子流域进一步划分为四种类型的下垫面区域：(1)房前的不透水下垫面——铺砌的街道、停车场、人行道和有暴雨下水通道的屋顶，(2)房前的透水下垫面——草坪，铺草林荫道和车道，(3)房后透水和不透水下垫面——后草坪和雨水流进后草坪的屋顶，(4)比邻近暴雨下水道进水口更低的不产流面积。

每个进水口水文过程线应用下述与陆地水分循环相对应的模型来建立。

下渗采用赫顿公式：

$$f_{cap}(t)=f_c+(f_0-f_c)\exp(-K_f t) \qquad (A)$$

式中 $f_{cap}(t)$、f_0 和 f_c 分别是时间为 t、0 和 ∞ 时的下渗能力，而 K_f 是衰减常数，从 $t=0$ 降雨开始和整个暴雨过程中，降雨强度 $r(t)$ 超过 t 时的下渗强度 $f_{cap}(t)$ 的时段，使用公式(A)。而在降雨强度小于下渗强度 $f_{cap}(t)$ 的地方，该模型根据帕托勒(1957年)的建议，修改为

$$f_{cap}(t)=f_0-K_f(F(t)-f_c t)。$$

填洼量模型

每个区域的填洼总水量，以覆盖整个区域的平均深度 D 表示，假定 D 为一个常数，只有在降雨强度超过下渗强度时才能产生填洼的水量。因此，有效降雨强度 $i(t)$ 为

$$i(t)=r(t)-f(t)-d(t),$$

式中，$d(t)$ 为填洼率，$f(t)$ 为下渗率，$r(t)$ 为降雨强度。

地表径流模型

进水口的流量过程线是通过一个净雨输入(1分钟间隔)结合1分钟的脉冲响应而建立起来的。脉冲响应 u 由下式给出

$$u(0,t)=t_0\exp(-t/t_0),$$

式中，t_0 为滞后时间。而1分钟的脉冲响应为

$$u(1,t)=\int_{t-1}^{t} u(0,\tau)d\tau。$$

进水口过程线的纵坐标(y值)为

$$q(t)=\int_0^t i(t-\tau)u(1,\tau)d\tau。$$

由此可知，每类子流域面积 A_i 时，总进水口流量过程线如下：

$$Q(t)=\sum_1^3 qi(t)A_i,$$

式中，A_i 为第 i 类型子流域的面积。

下水管线

在下水管线演算过程中，作者采用单纯平移滞后演算法。在已知整个暴雨过程线的远处进水口开始估算一个有代表性的流

量。该径流就定为发生在该过程线中间50%的地方的平均径流。然后，应用满宁公式，计算紧靠进水口下游管道的代表流速，公式中的坡度项采用管道的坡度，而"n"值就是刊布的管道"n"值。管道的长度根据代表流速提供的单纯平移滞后来划分。

瓦特和凯特把 QUURM模型应用到 10 次暴雨事件中，这是暴雨发生在安大略州的金斯顿市一个低密度住宅区的 1972 年、1973 年夏季，下垫面类型(如前所述)是 1、2 和 3 型。面积分别为25.1，27.7和 34.2 平方英亩。为了进行比较，美国环境保护局的暴雨径流管理模型(SWMM)也被应用来模拟，图 5-13 是同一次暴雨的结果。作者指出，他们的目的并不在于比较 QUURM 和 SWMM 的细节。不过 QUURM 模拟实际暴雨过程线至少不比标准化的 SWMM 差。

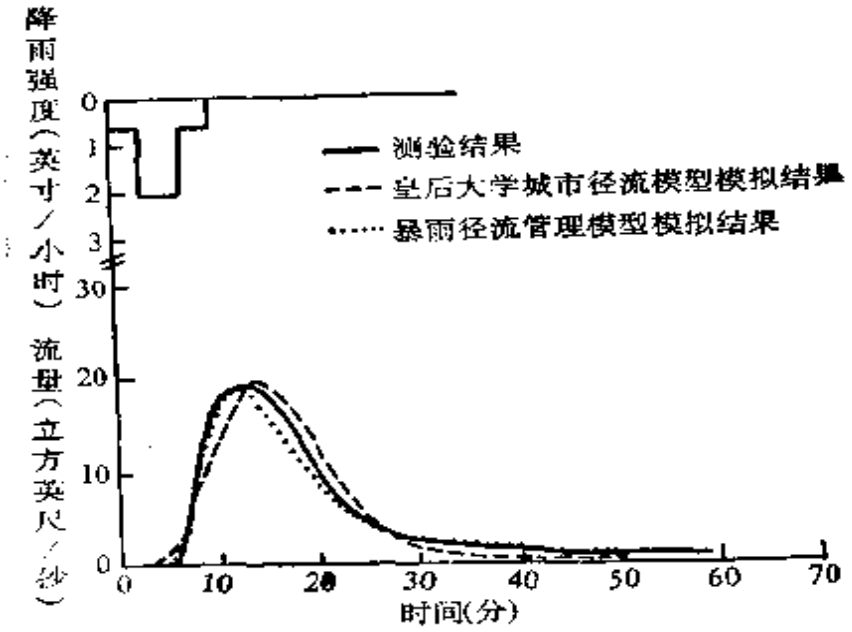


图 5-13 测验并模拟科夫英公园流域 1972 年 8 月 23 日的暴雨径流过程线(瓦特和凯特 1975 年)

§5.6 城市集水区模型——水质模型

模型的实质

维萨姆等人(1977年)指出："水质模型是一个用数学描述或是一组许多因素造成在同一点上相同水质的描述。一般来说，水质模型要设计：(1)接受输入，即进入系统各点的成分浓度随时间的变化，(2)模拟系统的混和反馈运动学，(3)合成系统出口的时间分布输出。"

这三点基本上概述了城市水质模拟的主要问题。水质直接与第一点有关，而第二点对水质有重要影响。①

城市地表在一给定时刻的糙率、不透水性、坡度和温度直接影响暴雨径流的流速和总量，这些径流水携带和输送城市垃圾和废物的能力直接与径流的流速和总量有关。与此类似，在废物中有机部分和无机部分在径流水中发生相互反应，每一个反应都受到径流水的流速和总量的影响。

所有这些因素可以相当容易地加以定性和概念性地描述②。然而，它们的定量预报和边界条件必须花费更多的研究和计算时间，本节为了讨论上述维萨姆的三点。我们要：(1)提出一种建立城市地表径流水质模型的方法；(2)讨论河流中的反馈运动学，以及提出模拟工作的研究工作；(3)提出一个完整过程的概念化模型。

地表径流水质模型

MUNP(城市非点源污染管理)模型是由苏瑟兰和迈克可恩提出的，模型的流程框图见图5-14。正如作者指出的，这个模型在结构上与美国陆军工程兵团的水文工程中心(1976年)的贮水、处理、

① 见彼特和菲尔德(1977年)对水质-水量关系的进一步讨论。
② 见麦克埃列等人(1976年)对这些因素的讨论。

溢流、径流模型(STORM)相当。

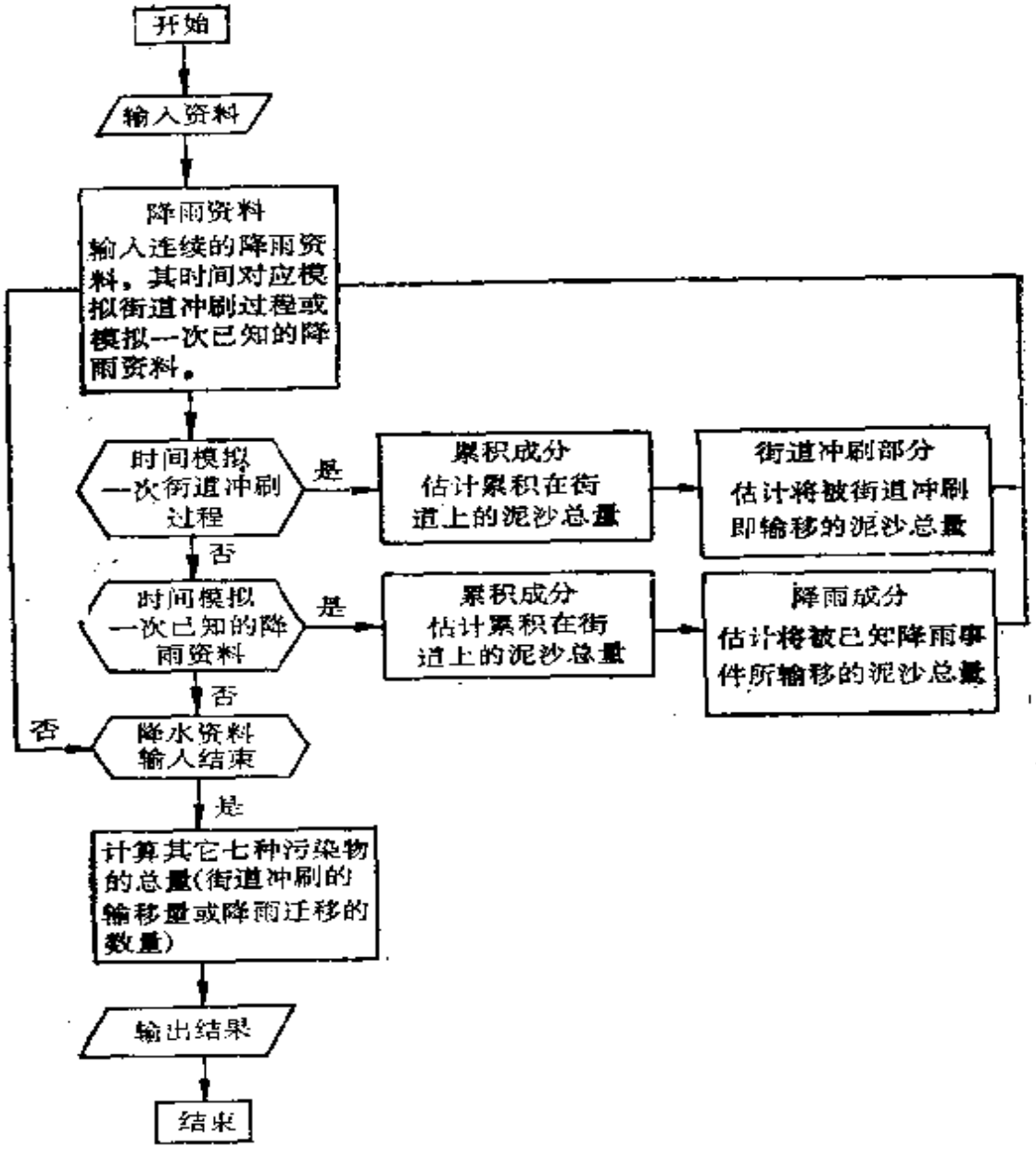


图 5-14 MUNP 模型的基本结构框图(苏瑟兰和麦克绅，1978年)

在街道表面已累积污染物的估值以累积部分计算。模型的这部分是建立在萨特和博伊德(1972年)工作的基础上的，该成分是土地利用(如住宅区、商业区和工业区)，铺砌的类型和条件、货运量、人口密度和街道清扫或降雨以来的时间长度等的函数。对每

一种体现上述各种变量的土地利用建立了方程式(表 5.7)。下一步，必须对各种定性的变化定量，例如重型与轻型货运的运量对比，铺砌情况的对比等等。对独立住宅和集居的多个家庭公寓导出最后的累积方程，而商业和工业用地作为铺砌情况和货运量的函数。

表 5.7　累积成分的基本公式

土地利用	相关系数	标准差(磅/路边英里)	公　式
工业区	0.91	194	$P_I=1388(1-e^{-0.19t})$
商业区	0.71	165	$P_C=500(1-e^{-0.335t})$
住宅区	0.49	268	$P_R=1087t/(1.0+1.3t)$

t 为降雨或冲刷后的时间
P 为积累的总泥沙量(磅/路边英里)

降雨部分除了雅林提出的公式以外，后来萨特和博伊德(1972年)也讨论了。雅林假定泥沙运动将在超过临界上举力的时候开始。萨特和博伊德确定大约88%的累积总固体负荷将位于路边的12英寸以内。运用这些方法，苏瑟兰和迈克可恩简化了该面积内的污染物迁移模型，并且假定是浅的边沟水流使物质迁移。为了准确地预测边沟水流的水力半径，应用罗根和卢特(1974年)建立的进水口基本水文过程模型(BIHM)与修改后的雅林公式。

考虑到土壤颗粒的迁移速率，颗粒大小是最重要的变量之一。萨特和博伊德规定了六个粒径范围并应用在该模型中，另一个被考虑的因素是每条边沟中最初可能输移的物质量，当地表径流达到模型要求的流速，它就开始输移一定大小的颗粒，这个范围的粒径在进一步的考虑中被自动除去，且径流提高了输移剩余物质的挟沙能力，径流水的挟沙能力明显地与坡度和不透水性等因素有关。

从累积部分中获得了最初的总固体负荷之后，降雨部分对六个粒径范围内每个部分的迁移百分比估计可望在降雨总量为 0.5

英寸时得到。如果实际降雨不是0.5英寸，那么用 K_j 值通过下列公式进行调整：

$$TS_j=K_j(TS_i),$$

式中，TS_j 为对应于总降水量 j(英寸)的某一个粒径范围占总含沙量的百分比；TS_i 为对应于总降雨量0.5英寸的某一个特定粒径范围占总含沙量的百分比；K_j 为与 TS_j,TS_i 有关的因素。

由街道清扫机清除的累积污染物的数值从街道清扫部分得到。街道清扫的效果与下列因素有关。(1)污染物的粒径范围，(2)清扫机的类型(机动清扫或真空吸尘)，(3)街道清扫机前进的速度(4)铺砌的类型。这个组成部分的操作与累积部分无关。街道清扫的部分是建立在李等人(1959年)和克拉克等人(1963年)的研究基础上的。

在这篇论文的摘要中，苏瑟兰和迈克可恩主张 MUNP 模型能模拟下述污染物：总固体量或类似泥沙的物质、挥发性固体、5天生化需氧量、化学需氧量、凯氏氮、硝酸盐、磷酸盐和重金属总量。在论文中，该模型模拟了华盛顿特区街道清扫机的效率。图5-15和图5-16说明了四个假定地区的模拟结果。街道清扫的频率对清扫效率具有最大的影响。真空吸尘似乎比机动清扫机的效率高5%，清扫机以3英里/小时操作，大约比4英里/小时操作提高效率约3%左右。对于四个地区最有效的街道清扫方法是真空吸尘机每隔2天，以3英里/小时的速度进行吸尘。

河流水质模型

在上面概述了水的总量和流速两个因素对地表径流(无机-有机)水质因素的影响之后，混合的水进入河道系统，并且以同样的方式，带来相似的水量-水质相互反应。维萨姆(1969年)指出："一个时间短、峰值高的悬移质地表径流过程对受水体的影响，要比一个泄放同样多悬移质而延伸较长时间的过程线明显。

他在论文的后面部分探讨某些研究提出一条河流的化学质量的数据与流量相关：

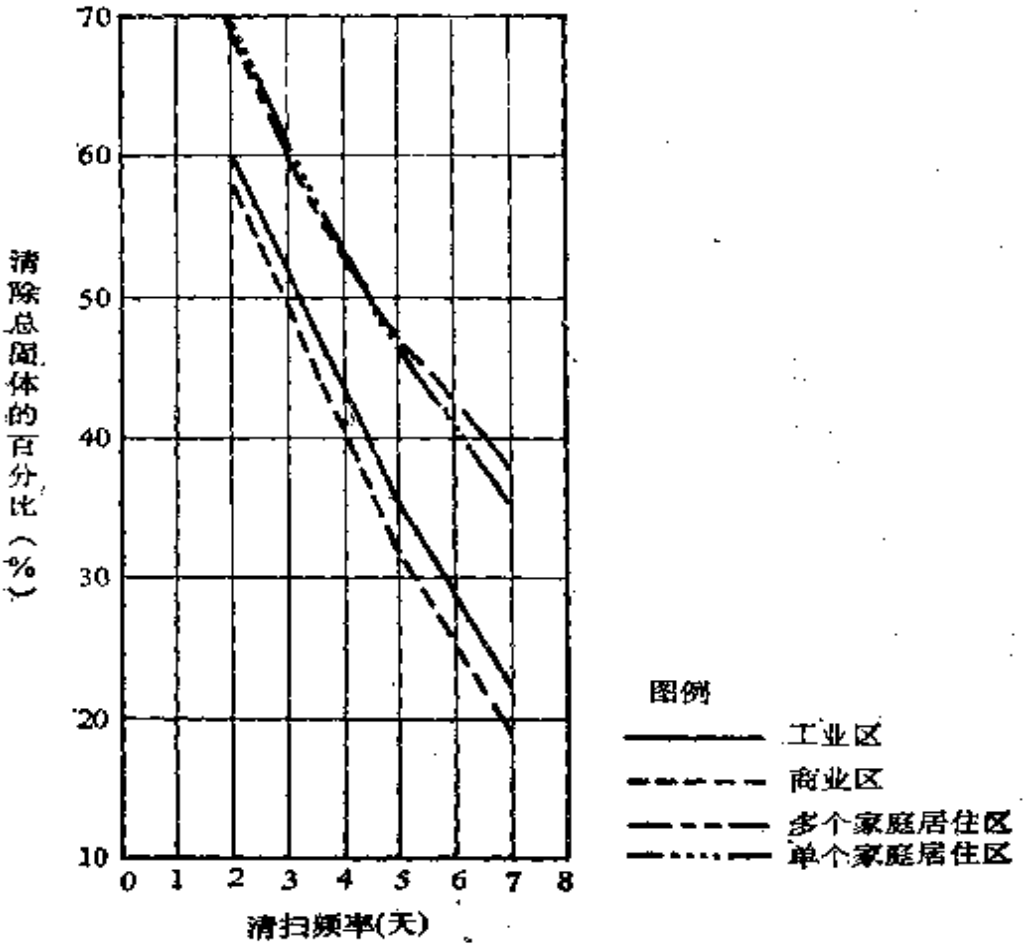


图 5-15　真空吸尘以3英里/小时行进的街道清扫在不同土地利用类型上清除总固体效率(苏瑟兰和麦克绅,1978年)

$$C=KQ^n, \tag{1}$$

式中,C 为成分的浓度,Q 为河川径流量,K，n 为回归参数。

列德培特和格洛尼尔(1964年)发表了这个公式的散布图，公式中 C 相当于无机物的浓度(氯化物)。他们建议在预报时可以作重大改进,即以变量 b 替在公式中的常数,

$$b=PQ^m, \tag{2}$$

式中,b 为公式(1)中的指数 n,P、m为回归参数。

列德培特和格洛尼尔对此作了进一步归纳，指出:"河川径流的无机质量可以根据径流量来估算,其相关关系有双曲线形式,具有常量指数的对数形式，或具有变量指数的对数形式等。"上述公

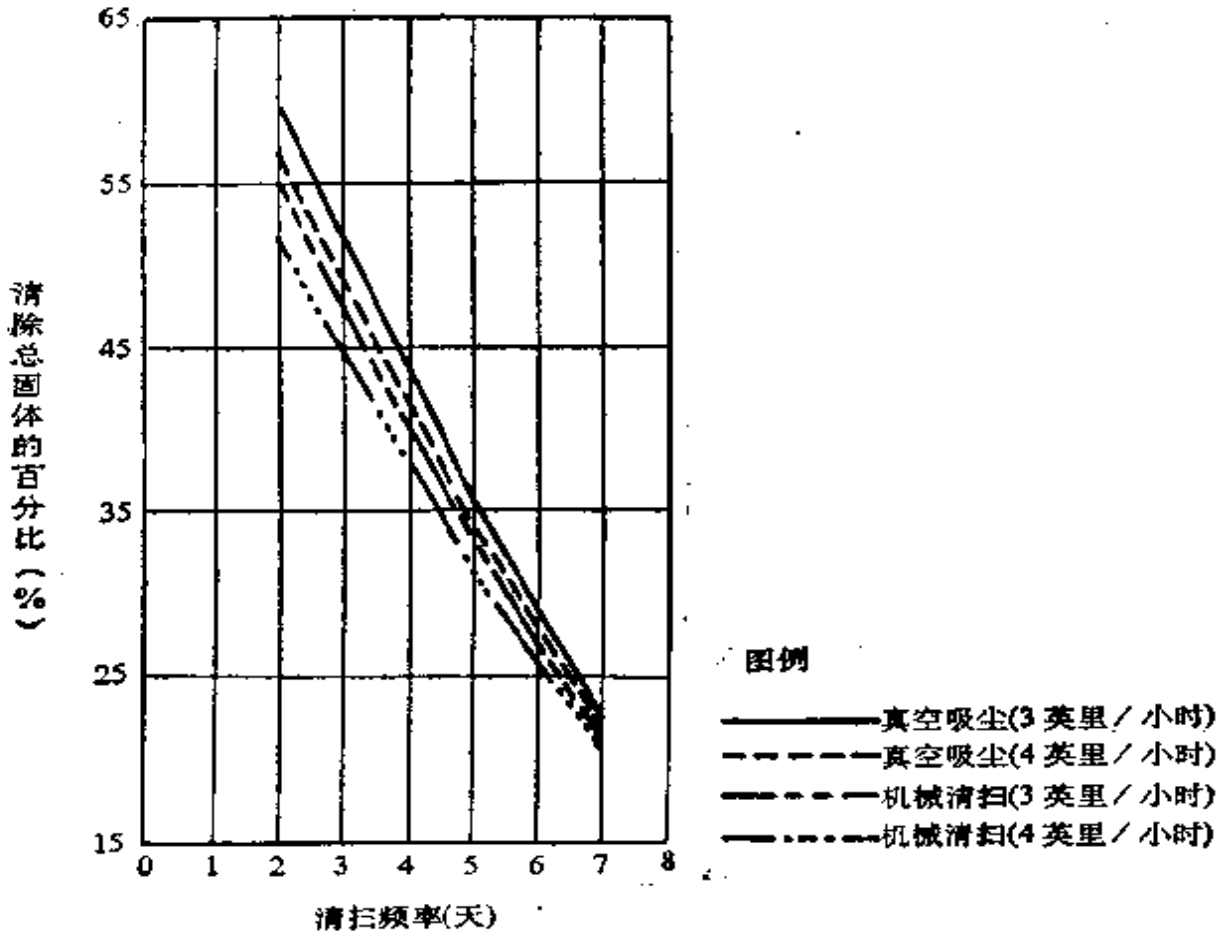


图 5-16　在工业区不同清扫方式清除总固体的效率(苏瑟兰和麦克绅,1978年)

式对预测河流的稀释能力提出了一个合乎逻辑的论据，现在让我们对发生在河流中的实际混合现象进行更详尽的研究。

模拟无机水流是河流水质建模问题的一部分，其余的主要问题是模拟有机部分。无机成分由于随着时间无明显衰减，而被称为"稳定的"，而另一方面，有机成分的需氧量由于其随时间而衰减被划为不稳定成分①。

评价任一时刻的不稳定成分显然由于污染物的时间变化特性而变得复杂了。

海斯和克伦刻尔(1968 年)从理论上讨论了河流的混合现 象，

① 见维萨姆等人(1977年)有关稳定和不稳定成分的简要讨论。

他们提出河流中稳定示踪物输移的连续方程，可由下列微分方程表示：

$$\frac{\partial C}{\partial A}=\frac{\partial}{\partial x}\left(D^{mt}\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(D^{mt}\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(D^{mt}\frac{\partial C}{\partial z}\right)$$
$$-\frac{\partial(V_xC)}{\partial x}-\frac{\partial(V_yC)}{\partial y}-\frac{\partial(V_zC)}{\partial z}$$

式中，C 为示踪物浓度，x、y、z 为各坐标方向，相应的速度为 V_x、V_y、V_z，D^{mt} 为包含分子和紊流扩散能力的影响，可以是 x、y 和 z 的函数。

不用说，这个方程（正如作者承认的那样）是难以应用的，并且由于涉及到工程和自然科学中的许多其他公式，必须作一定的假设以减少特殊的公式，使之具有更常见和更实用的形式，作者指出早期的研究者选择简单的管道几何形状以集中它的作用，并发展成下面的输送方程：

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}rD^{mt}\frac{\partial C}{\partial r}+D^{mt}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\cdot V_x\frac{\partial C}{\partial x},$$

式中，r 为（管道的）半径坐标。为了提供便于应用的公式，该方程的约束条件必须采用折衷方案。即(1)在半径和角度的方向是有零角速度，(2)半径方向上没有浓度梯度。

研究者泰勒(1954年)进一步简化了后面这个公式，他借助研究过水断面平均浓度并运用速度经验公式表达流速和雷诺相似性来确定 V_x、D^m 和 r 的变化。这个公式是一维分散流模型：

$$\frac{\partial C}{\partial t}=D_L\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}-\bar{u}\frac{\partial C}{\partial x},$$

式中，D_L 为纵向混和系数，$\bar{u}$ 为平均流速（由海斯和克伦刻尔定义）。

该模型及其演变已被许多研究者应用于建立河流水质模型中①。

---

① 约舒克拉和萨拉(1976年)提出应用二维混合公式。

另一个有根据的模型被广泛使用，其概念是质量和动量守恒，公式为(奥洛林 1975 年)

$$\frac{\partial V_i}{\partial t}=(I-O)_i+S_i。$$

式中，V_i 为指标变量，欲研究的物质浓度；$(I-O)_i$ 为质量输入率和输出率之差，包括对流和扩散作用；S_i 为除去内部增加或减少以外的质量净输入率。

因此，我们已研究了很多模型的基本概念。现在我们将介绍一个实际河流模型。

威列斯、安德逊和达拉克普(1975 年)建立了 EDI-Qual-I 模型。他们把该模型应用于加利福尼亚和内华达州的恰基-卡瑟河流流域中，作者指出，在一个河流系统组成物质的迁移是通过对流和扩散作用完成的，并可用下列公式表示这些概念。

$$A\frac{\partial C}{\partial A}=\frac{\partial\left(AD_L\frac{\partial C}{\partial x}\right)}{\partial x}\cdot\frac{\partial(A\bar{u}C)}{\partial x}\pm AS$$

式中，D_L 为纵向混合系数，$\bar{u}$ 为平均流速，A 为断面面积，C 为所研究成分的浓度，t 为某一时刻，x为河流纵轴(x-轴)方向上的某一点，S 为增加或减少的不稳定成分。

模拟过程包括：(1)把河流分段(各段具有基本稳定的水文和水质条件)，(2)演算每一河段的控制方程，(3)确定每一河段的稳定和不稳定成分的初始浓度。

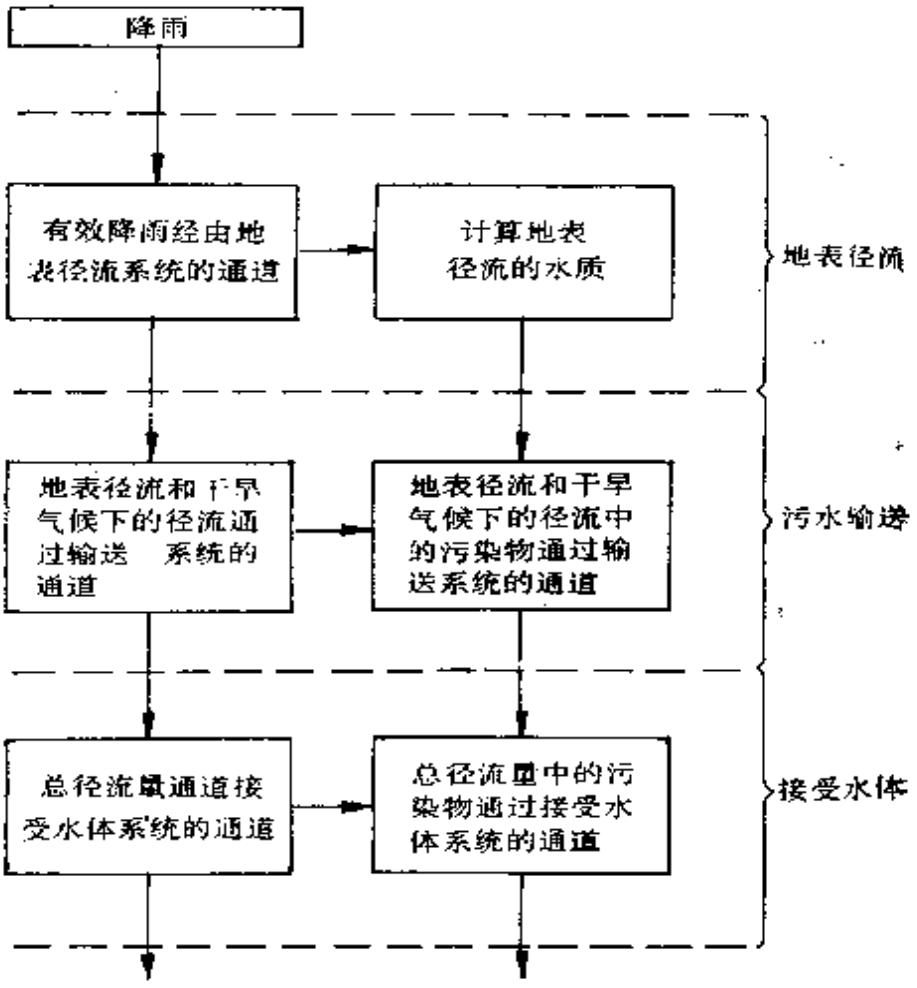
稳定和不稳定物质[如 DO，BOD，磷，大肠菌类(总的和粪便的)、氨、亚硝酸盐、硝酸盐和叶绿素a]都可以通过EDI-QUAL-I模型进行模拟。正如藻类(浮游植物和水底的浮游植物)提供了氧一样，氧的消耗要考虑硝化作用(氨分解为亚硝酸根并继续分解为硝酸根)。各河段高程和温度资料要考虑。

作者们认为该模型建立得很好，然而，他们告诫道："模型只能和输入的资料同样地完美，并建议读者在画出任一模拟曲线之前，仔细核对储存在输入数据文件内的数据。"

当然，这一考虑对任何模型都是准确的。该模型的系统方程几乎占了整整两页，这里将不再叙述了。

模拟城市水质的概化模型

麦克菲尔逊(1978年)把城市径流模型划分为三个组成部分：地表径流、污水输送和受水体(图5-17)。他认为该图描绘了"绝大部分综合城市径流模型的基本功能组成。"他进一步指出：无论多么大范围的城市径流规划，是否都应当使用这类综合模型，这还是一个观点问题，是一个有争论的问题。然而，"地表径流"和"接受水体"水质和水量的说明是任何范围内评价的要素，而说明的详尽程度应当结合需要作充分的考虑，仔细权衡。



城市径流模型的组成

图 5-17　城市径流模型的组成(麦克菲尔逊,1978年)

第六章　非工程措施

§6.1 规划和规划委员会

规划

西蒙等(1950年)把规划① 定义为："规划是一种活动，它参与未来的计划、评价不同的方案以及可以达到这些过程所采用的方法等。规划是合理而适度的设想，它应用于未来，规划者或有关的管理组织者们根据这个设想，就可以使发展的蓝图具体化。"

埃温(1969年)指出："规划这个名词由来已久，自人类开始考虑当今行为对未来的意义以来，就有了许许多多种说法。"他认为："在过去，规划可能被认为是一种奢侈，只是一个有用的附属品，是领导者用以探索所发生变化的工具库。但是，今天我们似乎不再这样看了。企业、城市、公共服务机构、军队组织、州政府以至整个国家、全体人民都将有赖于领导者们的意志和规划的能力。工业革命、人口激增以及涉及进步和变化的某种西方价值观已经使规划更为必要，这是因为组织者在很大程度上要彼此互相依赖、大行政管理区、大型劳动组合、大型农业、大型商业和大型卫生福利业等机构一旦互相依存，一旦他们划分出许多下设机构，而且彼此形成网络，那末，规划就成为一个存在的条件，规划中的大问题就不单是证明其合理性，而是以什么程度和采用什么手段实施的问题了。"

克莱尔(1973 年)注意到 1960 年在美国有 91000 多个行政管

---

① 西莱(1962年)和沃克(1950年)提出了"规划"这个词的明确含义，不仅引起了读者的兴趣，而且为读者提供了相当完善的概念。

理单元，其中三分之二是单一职能的单元，如生活行政区、校务委员会等。自那时以来，他估计这种单元的数目已发展到十万个以上。有3049个县政府，35000多个乡和村政府，还有其它类型的当地行政管理机构，如给水管理站、房管局等，这些单位虽然不可能有正规的规划委员会，但35000多个单位中大多作过这种或那种正规的规划。

规划委员会

莱威士(1949年)报告中指出，纽约和新泽西是美国首先采用立法授权指定规划委员会的城市。当时是1913年。纽约在1926年开始行使城市条令着手综合规划。从那以后，其它的州采用了类似条令，大量的规划委员会就建立起来了。

本克脱(1973年)报告中指出，基础规划的费用相当于主要支出的0.5～1.5%。对于过去已作过规划或已有机构开展专业工作的社区，这个费用是恰当的，但对没有长期规划或缺乏规划能力的社区来说，则还需要化费更多的精力和资金。

为规划提供资金的来源有多方面。当地行政单位通常提供大量金钱，还有各种联邦机构，如房屋和城市发展部门(1954年房屋条令)、运输部门、健康、教育、福利部门，环境保护机构，法律实施助理局，或其它相当的市府基金，或付给规划服务的报酬和赞助费等。但无论如何，规划的代价与一般因缺乏规划而长期浪费的费用相比是很小的。

规划委员会结构

本克脱(1973年)认为："一个规划机构的组织要随城市的规模而变化，稍小的城市(1万人口以下)通常没有规划机构的编制，一个中等城市(人口在1万～10万)，可以有一名规划指导员和很少的几个职工，而大城市(人口在10万以上)可以有一名行政官员、一名规划指导员，一名公共关系官员和一名预算官员。"

规划委员会的结构(规划厅、规划局、市民委员会、市民行动委员会)通常是由政府授权建立的规划组制订的(见图6-1)。克莱尔

(1973年)在报告中写道：规划委员会通常是由市长指定并被城市委员会所确认，它提供常规服务而无须市民付费。许多小社区还有这样一个包括有关市民在内的工作小组，这些规划委员会不雇用专职规划员。

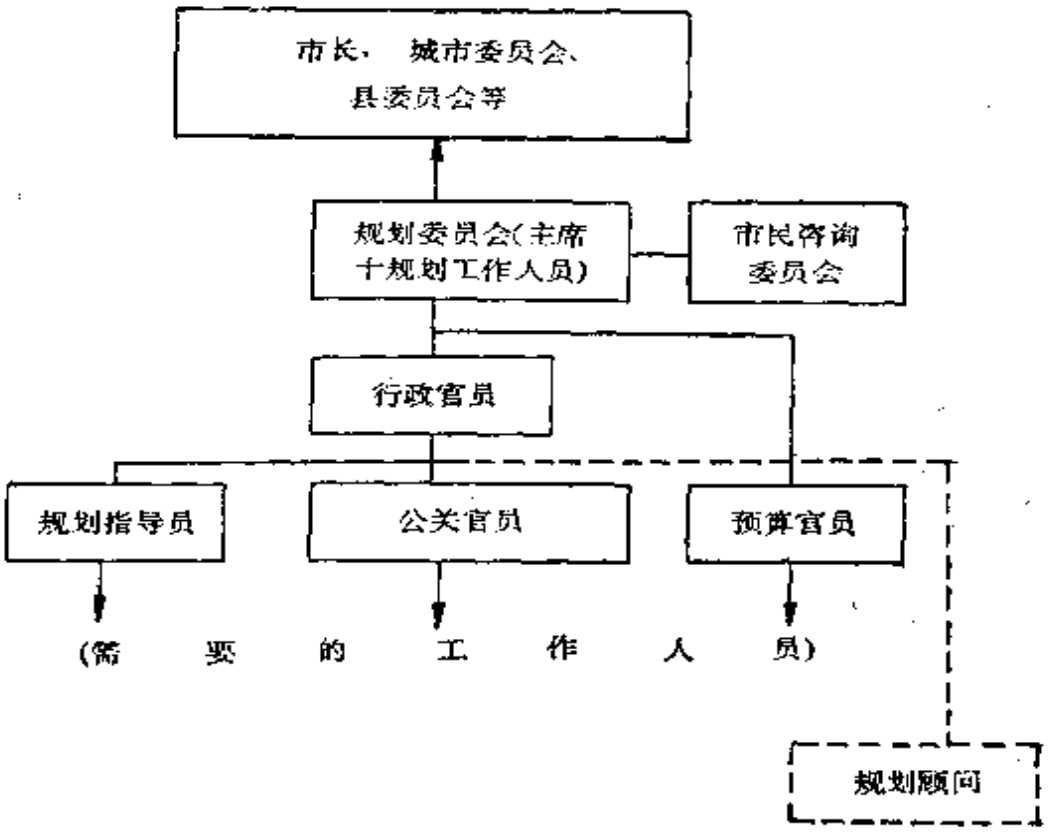


图 6-1 规划机构的组织结构(克莱尔,1973年)

为较大社区服务的规划委员会除保留以当地市民为代表的基本核心外，还需要增加一个专业的规划人员，他将处理日常事务(如接受委托团体的咨询等)，并向委员会建议或接受委员会的建议等。

一些较大社区和地区的经验是，办事机构不宜过于庞大，为了应付日常事务，设置一个规划执行委员会就可满足要求了，该委员会的组成成员专业化程度要较上面已提到过的规划委员会高，规划手段也更专业化，本克脱(1973年)认为，规划机构行政会议的成员将是对整个社区具有高度代表性的人员，要有杰出的专业资历，

在机构工作中几乎能投入100%的精力，而且完全没有派性。但这种理想化的人是永远不会有的。

委员会也希望其组成成员能代表各种阶层和委托社区中的少数派，而实际上大多数规划委员会不可能拥有代表社会整个领域的各阶层成员，他们通常只能代表领导阶层。

地区规划委员会

地区规划机构(RPA)一般为几个县或几个城镇(政府机关)服务。其中心实体(常称作委员会)由委托地区的政治和非专职代表组成。RPA有一个专业的规划参谋机构，它为当地规划委员会提供咨询，并对专门的规划给予帮助。这个专业的规划机构将从当地规划委员会成员中选举或挑选出成员，选出一个12人左右的执行委员会，定期(一月一次)讨论并得出当月规划的决策。从本质上说，RPA主要为许多社区提供专门的规划帮助，因为这些社区没有能力单独维持一个专业的规划参谋机构。

规划委员会的职能

博伦在描述规划委员会的职能时写道："规划委员会(带有专业参谋机构的)是一个咨询实体，它帮助政府系统地表达政策。这个概念可以理解为，没有一个社区的发展问题是超出其责任范围的，也可以理解为规划委员会是整体公共利益的卫护者，而不是哪一个个别特殊利益的卫护者。"

规划委员会是政府的咨询机构，它服务于政治集团的意愿。它可以负担如下责任：评价、采纳或拒绝地方上的请求，颁发许可证或其它类似的职责。但在任何情况下都要由政治集团最后拍板，政府可以推翻规划委员会的建议。

地区规划委员会通常充当A-95情报交流所的角色。A-95有一定的考察程序，这个程序由经费预算局(BOB)制定。通过考察程序，决定地区正在进行的基本建设和工程开发与现有规划是否存在矛盾。一般情况下，这些基建和工程都是政府基金资助的，RPA的A-95考察不认可，就意味着政府的投资被否决。在这种

意义上可以说明，A-95 考察程序给予地区规划局相当广泛的权力，用以监督地区规划的正常执行。

另一方面，地区规划委员会和 RPA 应赋有三大重要职能：(1)技术帮助，(2)申请经费和对委托社区的基金考察，(3)制定分区条例并解释计划的进程。技术帮助由规划参谋机构提供，它可以包含多种知识领域的帮助：从污水问题到老年病学问题的信息。这是一种社区服务，为了组织和改善社区服务职能，规划员在社区和公共组织的咨询活动中，分别负责各自的专业问题。

许多规划员执掌着最新的政府拨款或获取贷款申请的大权。如果一个社区想购买一部救火车、建立一个医务护理小组、更新一个设备或施工一个新的下水道系统等，完全可以通过规划员和当地派出代表共同协商完成申请，几百万、几千万美元的巨款就这样投入了社区的建设。如果没有规划员的帮助，这些申请绝大多数不能得到批准。规划机构实施的有价值服务实际上就是基金考察。

第三个主要职能(制定分区条例并解释计划的进程方面的技术帮助)特别重要。许多社区就是在这点上失去了政府的拨款，因为他们不符申请基金的基本规则。联邦政府的许多基金申请需要社区有分区条例或合理的计划①，而这些要求并不过分，因为政府不愿把钱给一个发展规划不合逻辑的社区。简而言之，在这类社区中，市民们对规划发展所作的委托是失败的。因为一些社区以前很厌烦采用规划和分区条例，事实上他们是无意识地忽视了政府对于拨款程序的考虑。

专业的规划参谋机构

当社区和规划委员会的规模扩大时，专业的规划参谋机构就发挥作用了。在小的社区里，规划员可以是兼职的，如建筑检查员、分区条例管理员或类似水平的半专业人员等。在这种情况下，

① 见美国规划研究所对合理规划的讨论(1973年)。

规划员有点万能博士(什么都能干的三脚猫)的味道。然而，在大一些的社区里，有能力维持一个大型的专业规划参谋机构，规划员就成为开展专业规划的专职人员，如少数民族住宅问题规划员等。

规划参谋机构可以分成管理和规划两部分。管理部分包括一名规划主任，几名副主任和一名秘书。本克脱于1973年建议，规划主任或行政主任应当有五年左右的实践经验，最理想的是一位专业工程师。拉扎罗发现，实际上许多规划主任虽然有有关领域的学位，但并无规划方面的学历，有的是退役的高级军官，有的是历史或经济学教授，当然也有专业的规划人员。但规定，规划委员会对主任的任命不能有分歧意见，就是，必须一致通过才能当主任。

事实上，许多规划主任的地位是十分牢固的。因为这个人如果持相反观点的话就不得不担心丢失工作，于是他(她)们就不如成为一个没用的、唯唯诺诺的应声虫，这样，规划主任就能保住他的地位，充满安全感。但是这个主任不再会坚持原则纠正不良行为。一个规划主任做错了事①，要撤换他(她)的工作需要由规划委员会多数投票通过；而实际上要多数通过是很困难的，因为，规划委员会会议出席人数通常达不到多数。许多委员在投票时意见分歧，一半委员不喜欢另一半委员，这种情况下，一半人将投票反对另一半人的提案，选举将被折衷。由此可见，规划主任一般无须操心其地位的安全与否。

规划者

阿什沃思(1973年)给规划者下的定义是："规划者是一个广泛应用的名词，它没有专门的法定定义。有经济规划者、交通规划者、地区规划者等等。他们甚至不需要专业的或技术的训练。然

① 规划主任在其岗位上如提出十分合理且构思绝妙的提案，而规划委员会和政治集团予以拒绝，这时主任的位置就保不住了。

而，在土地规划的范畴内，规划者稍稍有点特殊性，一般情况下，他必须是一个组成生活网络、覆盖社会、经济和自然因素的全方位的人，并且，他还应是一个力图为未来需求作准备的人。"今天，许多专业规划员已具有规划或有关领域的学历。然而，由于他们的实际工作性质，并不需要规划方面的学历，如上已述及的，规划员们不断地跟着政府调拨基金的部门转，虽然可以称他们为规划者，但他们为了胜任这个岗位，可能更需要刑事审判、老年病或土木工程方面的学历。通常，规划员工作需要具有实践经验的硕士来担任，低级规划员要有学士或硕士学历。

规划员的地位并没有规划主任那样牢固。规划员由规划委员会和规划主任协商聘用，但在大多数情况下，他们将直接受雇于主任，主任在任何时候都可以解雇规划员。如碰到这个规划员是个专业工作者，并且他想要保持规划员这个工作的话，那么想解雇他就常常要进行彻底的工作检查才行。如果规划主任很坏，下属的规划员就要承受这个暴君的工作恶果。当主任与规划委员会或各种政治集团意见相左而告失败的时候，就会找一个下属规划人员作他的替罪羊。莱文在 1976 年称一名规划主任为"职业流氓"时写道："有些规划员被监督者推着走，他们很不喜欢而且很害怕；而另一些规划员则在他们憎恶的环境中继续工作。"

规划员与规划主任的意见如果完全相同，则他们即使被否定也可共同寻找新的对策。反之，如与规划主任闹别扭，那他将处处碰壁。总之，规划员的工作是困难的，如果他(她)是一个诚实、善良的人，他向政治集团提出合理和慎重的建议而遭异议的话，这规划员就要遭受失败，要倒霉，最终成为一个失败者。莱文(1976年)写道："在工作中混日子，只领工资而无所事事。有些规划员可以用在职业中学到的窍门，使自己舒舒服服。但这大多是自欺欺人的，就象军队中一些无能官僚在明的或暗的休养一样，太多的规划员就在这最有价值的事业中被束缚住了。"

§6.2 规划和规划过程

布莱克(1975 年)对综合规划的定义为："规划是当地政府采用的一份官方公开文件，它作为决定社区有关实体发展的政策指导。"

综合规划(也称主体规划)应当在社区分区、版图、权益等问题明确之前制订。后者是法规的专门和细则部分，该法规用来执行综合规划的总体建议。

综合规划的目的是指导决议的，这决议关系到现在和未来公共服务结构和其它土地利用的规则。

规划的基本特征是综合、通用和长期。"综合"的意思是指规划包含社区的全部地域和与社区实际开发有关的全部职能要素。"通用"的意思是指规划概括了政策和方案，而不表示特殊地区或明细法则。"长期"的意思是指规划超越当前，描述 20 年至 30 年之后的未来可能性(拉扎罗，1977年)。

布莱克(1975 年)提出综合规划的要求时写道："当地政府不可避免地要卷在实体开发的问题中……，当地政府，尤其是由外行市民组成的立法团体，在作出实体开发的决议时需要技术指导，这些指导可由专业的城市规划员提供。……权宜的、特别是匆促上马的研究课题是没有保证的，下个月的决议将否定今天的行为。为了协调、统一社区的实体开发，当地政府需要有一个建立长期、整体、通用的政策手段，这手段能连续决定每个星期的开发成果。综合规划就是这样一个手段。"文件本身可以有不同的篇幅和形式，可以有许多大纲，我们不在本书中着力描述这些特色。下面的规划过程将列出规划发展的基本阶段。

规划过程

普里斯科利(1975年)把规划定义为："规划是达到目的的一个活动的发展计划过程。"利奇菲尔德、凯特和怀特布雷德(1975 年)

把规划过程定义为："规划过程是想要高度理解一些问题本质的活动性过程，需要检查各种方案可能得出的结果以及这些方案有关的优缺点。"从概念描述这个过程是很容易的。拉扎罗提出了规划过程的示意模型：

第一阶段——目标。规划员和当地规划咨询小组一起作出清晰简明的规划宗旨；

第二阶段——研究。收集有关资料，编写规划区问题的说明书，了解各种要求；

第三阶段——分析和综合。与当地规划委员会或咨询小组协同工作，规划员明确所在地的需要并构成其建议的基础；

第四阶段——建议。开展论证和要求，现在对未来的活动过程要以建议的形式摆到桌面上来；

第五阶段——采纳。向政治集团提出建议，以供验收和落实；

第六阶段——执行。政治集团决议一个明确的操作过程，以确保建议的执行；

第七阶段——最新信息。一个规划区并非一成不变而是随时间变化的，规划必须以定期的最新信息来反映未来发展变化的特性。

规划过程是决定规划效果最关键的部分。下面将以一个实例研究来说明规划过程。这个实例虽然只是一份简要的技术报告，它不如一份正式规划① 那样详尽。之所以要选中它，是因为简单并且能说明问题。

实例研究：比弗登河洪水防护

本实例是研究弗吉尼亚州西南的一个小的天然的社区，这是个拥有大约 1200 人口的快乐的小村庄，它座落在一个狭长的河谷内，周围是陡峭的丘陵地带。很久以前，农民在富饶的洪泛平原上

① 见美国规划研究院(1975)"一份优秀的综合规划过程概要"。

耕种，改变着地表的结构。当一条铁路支线延伸到这个村镇时，交通的方便刺激了它的发展。许多农业种植面积被房屋占用，洪水的灾害增加了。

第一阶段——目标，洪水防治。拉扎罗（当时是地区规划机构的规划员）被镇议会邀请研究比弗登河沿线的洪水问题，并作出洪水防治建议；

第二阶段——研究：大约有 20 个机构位于洪泛区内，影响最大的区域是默凯德路的莫克街和沃脱路的土地（图 6-2）1901、1940、1955 和 1957 年（T.V.A.1957 年）发生了严重的洪水灾害。而较小的洪水发生得更多，这些洪水遍及全区，是需要进行研究的。

第三阶段——分析和综合：分析的依据是伍曼（1967年）、拉扎罗（1976年）的研究工作和马多克（1976年）的讨论。洪泛区的居民们说，洪水的宣泄路径始终是固定的，洪水在靠近铁路桥和堤防的最低点开始漫溢。

根据进一步调查可以观察到，洪泛平原沿河的下垫面已被人类活动大范围地改变了。图 6.3 示出，河流的西边，由于堤岸束窄了河流的横断面，而河流东边有一个较高的、改变较少的洪泛平原。因为只有一个很小的洪泛平原滞留暴雨水流，河流调节漫滩水流的能力在这儿就大大降低了。

此外，作者发现河槽内的泛滥情况由于人工建筑而加重了。河东面有一座铁路桥和一垛砖石墙，河西面有一根砾石斜撑。桥桩对暴雨水流是一个障碍，因为碎石遇到桥桩可能会悬浮。桥不能为洪水提供足够的净空，因为它只高于河床 8 英尺。当洪水超过这个高度时，桥就似一个次生坝，增加水的拦蓄，加大堤防以上的溢流水量。

况且，水一旦被拦蓄，流速就减低，泥沙就沉积，桥上游大量拦门沙堆积就是这个原因。拦门沙也严重地减少河流的横断面积。在水位逐渐抬高的情况下，洪水的位能增加，它的潜在破坏能力就

越益加重。利波德等(1964 年)估算，一条天然河流每 1.5 年要发生一次漫滩流量。但在上述河段，漫滩的频率将大大增加，因为河流西部的洪泛平原已被居民占用，漫滩水流一发生，就造成灾害。

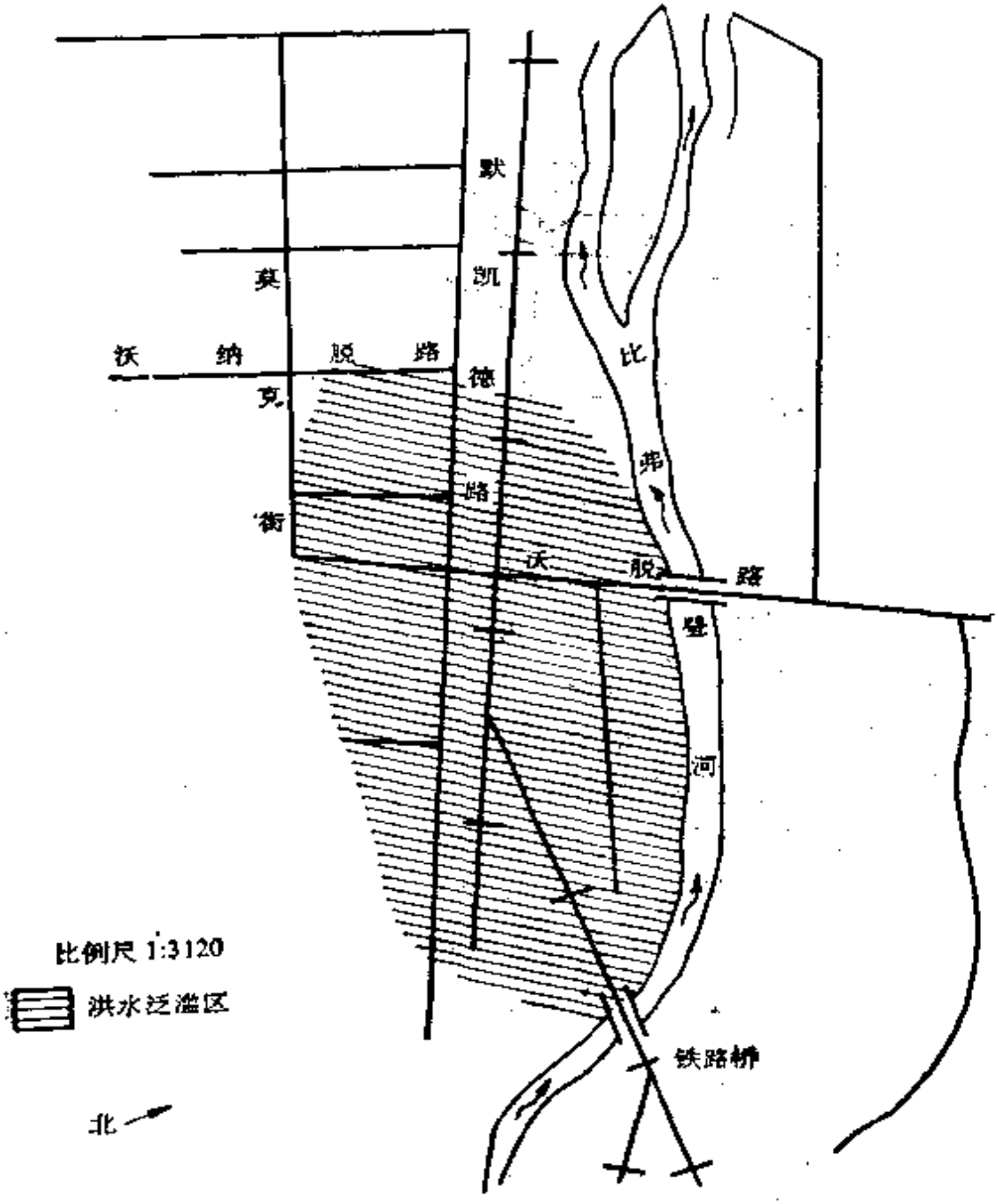


图 6-2　洪水泛滥区(拉扎罗,1978年)

第四阶段——建议。代博(1976 年)提到，许多地方政治集团

不懂专业，不能准确理解技术研究，而规划是一个向当地镇议会提出的具有技术性的报告，所以应当对报告的洪水防治方法详尽地作出精确的解释。拉扎罗为此而写出了条理清晰而详细的书面报告(1977年)。

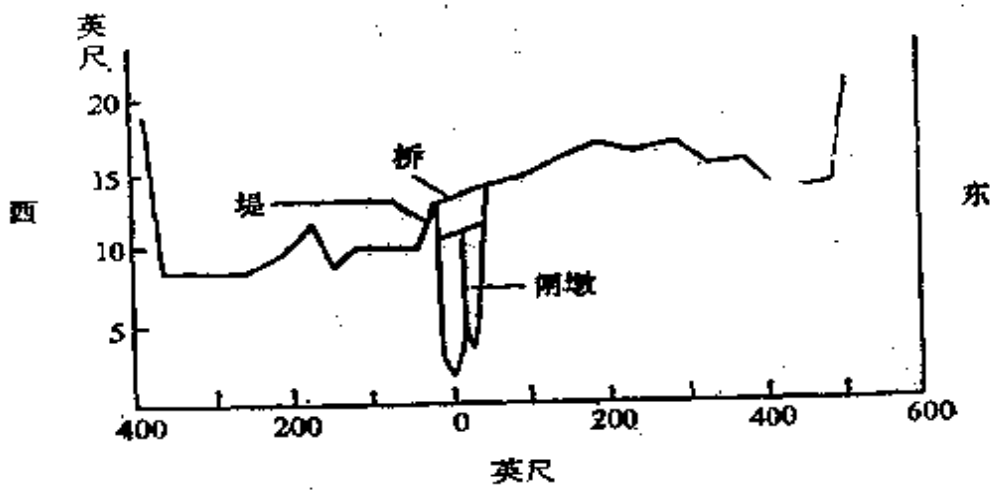


图 6-3　比弗登河铁路桥断面(拉扎罗，1978年)

向镇议会递呈建议与埃斯却和莫纳哈(1975年)所提出的程序是相类似的。在这种情况下，可以采用形象的辅助设备——35 毫米幻灯片。给每一个议会成员放映河流横断面、列出全部建议的条目以及说明洪水泛滥的成因。一开始，展示出森林背景中的比肯登河铁路桥上游一英里的河流，用以说明以往人为改变天然河流(一条保持均衡的河流，或一条环境平衡状况下的河流)的情况，然后，放映与此对照的幻灯片——当前铁路桥地区，示范出一条处于不均衡的河流(一条因人类活动导致流域下垫面改变河流)情况。每一条建议都借助幻灯片打出，并对议员作出明确的阐述。

按照提出时间的先后说明下列建议：

1. 迁移铁路桥。因为铁路桥已有好几年不使用了(铁路支线在过桥几百英尺处终止)。建议迁移铁路桥并清除淤泥。这样，河流横断面可以相当接近天然情况，甚至还可扩大一些，洪水泛滥的机会就将大大减少，预算费用为 $2500。

2. 挖隧道通过河西堤岸并清除泥沙。在西岸铁路线下通一

隧道并清除西岸泥沙，可以增加槽蓄量，从而减轻这个地方的洪水灾害。根据这个方案，必须定期清除淤泥才能保持效果，这意味着镇政府将周期性地支付费用，费用超过$2500。

3. 渠化。渠化包括拓宽和加深河槽，改变河流结构，所以费用高、代价大。但经初步调研表明，由于住宅建筑群靠近河流，且河床基岩出露，渠化的费用就有可能不会太大，估计不到$50000。

4. 购买、更换洪水易泛滥区域并移作它用。关于这点建议，必须对目前的地形有个清醒的认识，被较高大堤围住的西部洪泛平原，今后仍将继续作为镇上的默凯德路区，这儿仍易出现洪灾。因此，对这个区域的洪水问题尚无治理良策。以上所有建议都是大幅度减小洪水频率的缓解措施，它们并不能完全消除洪灾。从长远来看可以证明，采用上述任一建议或全部建议都要比镇上购买洪泛侵占地、拆迁工程、变换土地用途(如作停车场)以减少洪灾损失的费用贵而效益低。该方案的预算费用不超过 $50000。

第五阶段——采用。镇议会并未选用上述任一建议。约一个月后，他们聘请了当地的一位承包人用一辆推土机清理河床中松散的岩屑和小粒泥沙就完事了(盖伊，1976年)。

拉扎罗一开始不能理解为何采取这样的行动。因为它只是暂时的治表对策，即使在一场小洪水以后，也需要再次整治。经过进一步的调查，他了解了采取这个行动的初步原因。洪泛区的选民相信，清除河床碎屑，洪水泛滥就会停止。当时正值当地选举年的九月份，镇议会敏感地向选民的意愿转向，而如采用第一方案拆迁铁路桥，即使其所需费用不高，但需要较多的时间才能完成，不能立竿见影，为了获取选票，让这座桥留置不动，而采取了一个象征性的措施。

规划员作为政策的工具

上面这个实例证实了学者们在规划过程中的一个体会，即规划与政治的界面的相互渗透性。此实例研究仅化费了一整个月的时间，因而规划过程的所有侧面并不能得到恰如其分的反映。换言

之，一个规划员所能采用的各种具有说服力的工具尚不足以成功地影响舆论以修正正在作出的政治决议。市民的参与是一个有力的工具，这点将在下面详细讨论。

在上述实例研究中，规划员只是一个工具，他的作用是引导大家实现政治集团的意图。换句话说，无论规划员如何提议都不会认作是结果。

拉扎罗在几个不同的研究中获得这些体会，他观察到其它规划员也起类似的作用，在这方面，上述的实例研究并非是独一无二的，这类情况经常发生。另一方面必须指出，仅有的几例成功经验（即：政治集团利用规划员来实现一个目标，正好使规划员发迹）已成为规划员们的进身之阶。然而，不论是正面的还是反面的例子，真正的规划过程总不能有效地开展，规划不一定是最终决议的主体部分。

规划与正在作出的政治决议

摆在我们面前的二个问题是，一个规划员如何能影响正在作出的决议？加强规划过程的手段是什么？理解正在作出的政治决议，可以使一个有效的策略合法化。

凯脱尼斯(1974年)讨论了由伊斯坦(1965年)所从事的模拟政策过程的方法。图 6-4 示出，输入到政治系统转换机制中去的主要政治参数有两个，支持和要求。特殊重要的集团和关键的个体产生要求，规划机构和其它的正规机构也可产生需求，凯脱尼斯指出，对任一个或任一组要求都要有一套相应的支持，该支持可以持不同程度的肯定、否定或中立的态度。

政治系统接收了这些要求和支持后，对其进行权衡并直接采取行动或不采取行动。决议就是这些要求和支持的答复。行动的程序是某种约束，通常通过资源分配来适应决议。为了确保稳定性和变更性两个方面，政治过程中的反馈回路是非常必需的。正如凯脱尼斯所写："一个不带反馈回路的政治系统产生的决议使社会产生反感，其结果将导致系统的毁坏和取代。"

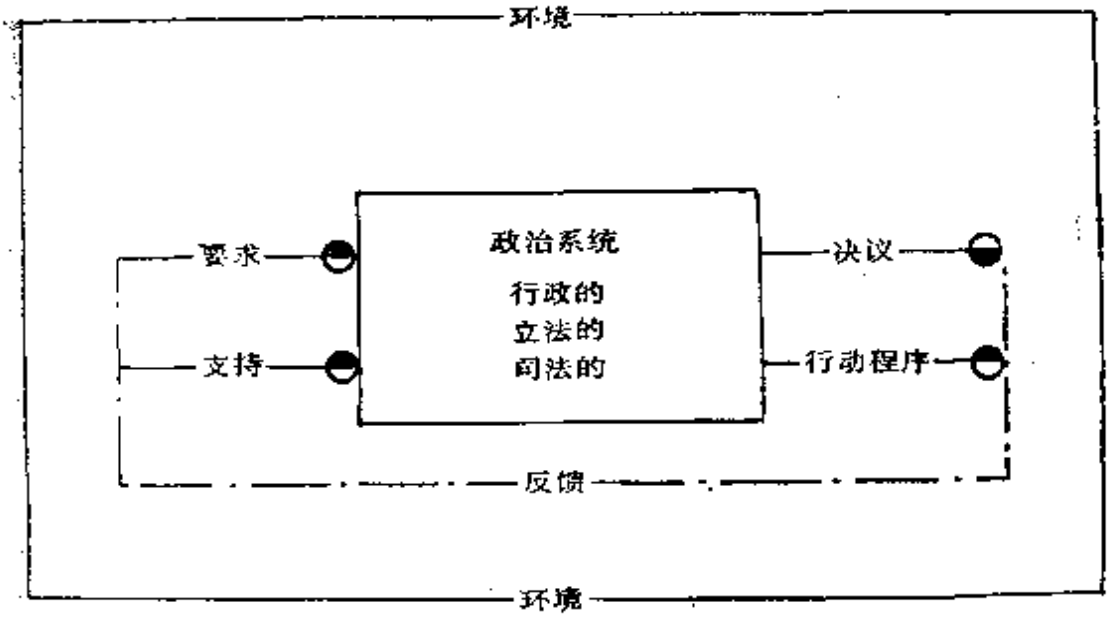


图 6-4 政治过程

在上面阐述的规划过程中，政治决议使集团对选民输入的要求和支持作出直观的判断，并实施一项旨在大选中获胜的决议。另一方面，规划员的建议将会很重要，规划员在其专业领域中的经验和实践，使他能在行动的科学行程方面作出判断。

要求和支持的输入受公众的影响很大，因为政治家有助于公众的意愿，民众的参与就成为规划过程中至关紧要的部分。威利克(1974年)指出，民众需要参与规划，"规划基本上是一个社会性的过程，而不是数学(逻辑)过程，它是一个确定需要、目标、愿望和任务的过程，是判断问题的过程，是方案公式化的过程，也是一个试验建议和落实的过程。在每个阶段中，为了圆满完成该阶段的任务，人在社会环境中的相互影响是必须要考虑的。"

民众参与是确立规划员工作合法性和责任性的基础。威利克说："规划员的合法性越大、责任性越高，则其越可能听到民众的意愿，由此而产生的规划越能为民众所接受。"

威利克概略地设计了信息构通的过程，并讨论了双向通讯联络的要求。民众的愿望是以民主观念为基础的，它将以多种方式

表达出来。用一句十分简单的话来形容，就是市民们必须与所采纳的规划一起生活。如果规划过程中包含着人们，则人们的声音就将被听到，规划就会对各个方面以至到最后的工作都会产生影响。而且，人民必须服从，并要被强制执行规划的决议。执行机构的规划不可能大到足以全盘监督执行指令的进行。如果人民对规划过程很投入并接受了最终规划，那末工作就是个民主的过程，强制实施就不重要了，即使还有问题，则可以出个安民告示①。总之，如果处理得当，民众的参与就是认可双向联络和解决矛盾的基础（普利斯科利，1975年）。通过双方信息构通，就能了解每个人的任务，规划员的责任感和合法化就得到发展，工作计划最终就成为一个真正的、实用的、合法的准则。

上面描述了以民众参与为基础的观念。事实上，一些怀疑民众参与能力的学者（如戴和泽格勒，1972 年）认为选区的大量成员在政治上并非一致，他们常常并不欣赏民主的价值。

莱文（1976年）总结了民众代表性的问题后说："事实上，民众处理问题的专业技术和时间都是有限的，企图吸引大范围市民的参与通常都是失败的。结果，市民的参与只作为一种代表性的象征，受委托的志愿者和拿薪水的内行代表了民众中很小一部分人的利益。相比之下，有效的群众参与却常常与专业建议产生对立。例如，通过居民点附近建造一条高速公路，就会引起民众的强烈反对。"

适当的民众代表权和民众参与是规划中的重要问题。要是总体上不能解决这个问题的话，普通市民对事业的漠不关心和愚昧无知就会使工作造成困难。没有积极的、热心的市民参与，规划员的功能将大受限制。在这种情况下他还可以使用一个方法：提高规划效益，从而与社区有影响人物之间建立密切的工作关系②，拉

① 下面将讨论公法92—500；执行是法的重要部分。

② 对社区有影响的人物是指具有一定地位，对社区的变化方向能施加影响的人物。

扎罗在1977年指出了这点。

§6.3 城市水资源规划

供应饮用水和搬迁污水是城市地区预算中的一大常规支出。这类城市水资源系统的规划是社区综合规划的一个不可缺少的部分。城市水资源规划包括两个广阔的领域：地表水供应和分配；暴雨、生活污水和联合下水道。因而，这一节将对现行城市水资源规划的论点作一个简要的讨论，该规划对下水道工程以及非点源污染有直接的意义。

水质管理规划

在廿世纪六十年代末和七十年代初，水质管理规划对环境活动的反响相当巨大。公法92—500及1972年修改的联邦政府水污染控制条令进一步引起了公众的注意。在101(a)部、U.S.C.33和1251(a)部中可找到该项法规的总目标是："恢复和维持国家水体的化学、物理和生物性能的完整。"

若干年后，国家水体中可以捕鱼和游泳，这个要求应当达到。公法92～500早期的中心内容是清除肉眼易见和发生恶臭的点排放。201部将数百万美元拨给社区，其目的是用最新技术改造现有的污水处理厂或建造新的能满足排放标准的污水处理厂。巨大金额的支出遭到一些学者的攻击，其领头的可能就是盖纳尔·韦伯尔。因为韦伯尔等(1974年)断言："在许多发展中的城市和郊区，有记录的废水可以达到二级处理阶段，但没有监测的非点污染源的排放量要占河流污水的一半以上。"总之，这些作者确认了这一概念：规划活动仓促上马，就不会获得最佳的费用-效益目标和有效减少污水排放的手段。在本书中，韦伯尔(1977年)广泛地宣传了这个非常有价值的观点。他对环境保护局(公法92—500的执行机构)不合逻辑的规划手段进行了讨论："条令(92—500)提

出作流域范围的规划(303e 部)、地区范围的规划(208 部)和具体实施的规划(201 部),这些规划由 EPA 负责实施,他需要在快速、重点突出和易于获得资金的条件下工作。流域范围的规划要由州政府批准才能执行,而州政府又根本不适宜作职员培训和人员分配等工作,这样是不合理的。"表 6.1 列出国家委员会实施公法92-500 的水质预算费用,总数是 5115 亿美元,这是个大得令人难以想象的数字,即使不是完全不可能,该法令在经济上亦是可疑的。

208部审定地区范围的水清洁计划,这个地区是指由城市化或工业化造成严重水污染问题的地区。戴维(1976年)在报告中写道:"208部认识到城市水污染已经严重到单独使用污水处理技术已不能解决全部问题。因此,地区范围的规划具有广泛的含义,如土地利用、发展管理、空气质量和土地废水处理等均应包含在一个地区

表 6.1 实施公法92—500的经费预算

费 用	美元(亿)
政府所属工厂达到 1977 年处理目标的费用(联邦政府只支出75%)(实际上 1983 年目标费用相同)	1185
政府所属工厂达到 1977 年目标非联邦政府支出费用(约为联邦政府支出费用的1/3)	395
污水联合排放的改建费	736
城市径流悬移泥沙的处理费(包括去除和消毒)	1990
达到 1977 年目标工业主要支付的费用	443
达到 1977 年目标工业的追加费用	306
总金额	5115

(韦伯尔,1977年)

的管理计划中。但规划的主要组成因素是'管理'。这就是,最终的计划必须推荐一个有能力实施上述各项技术解答的管理结构。"

韦伯尔(1977 年)在208 部列出总规划的七个条目(见图6.5):

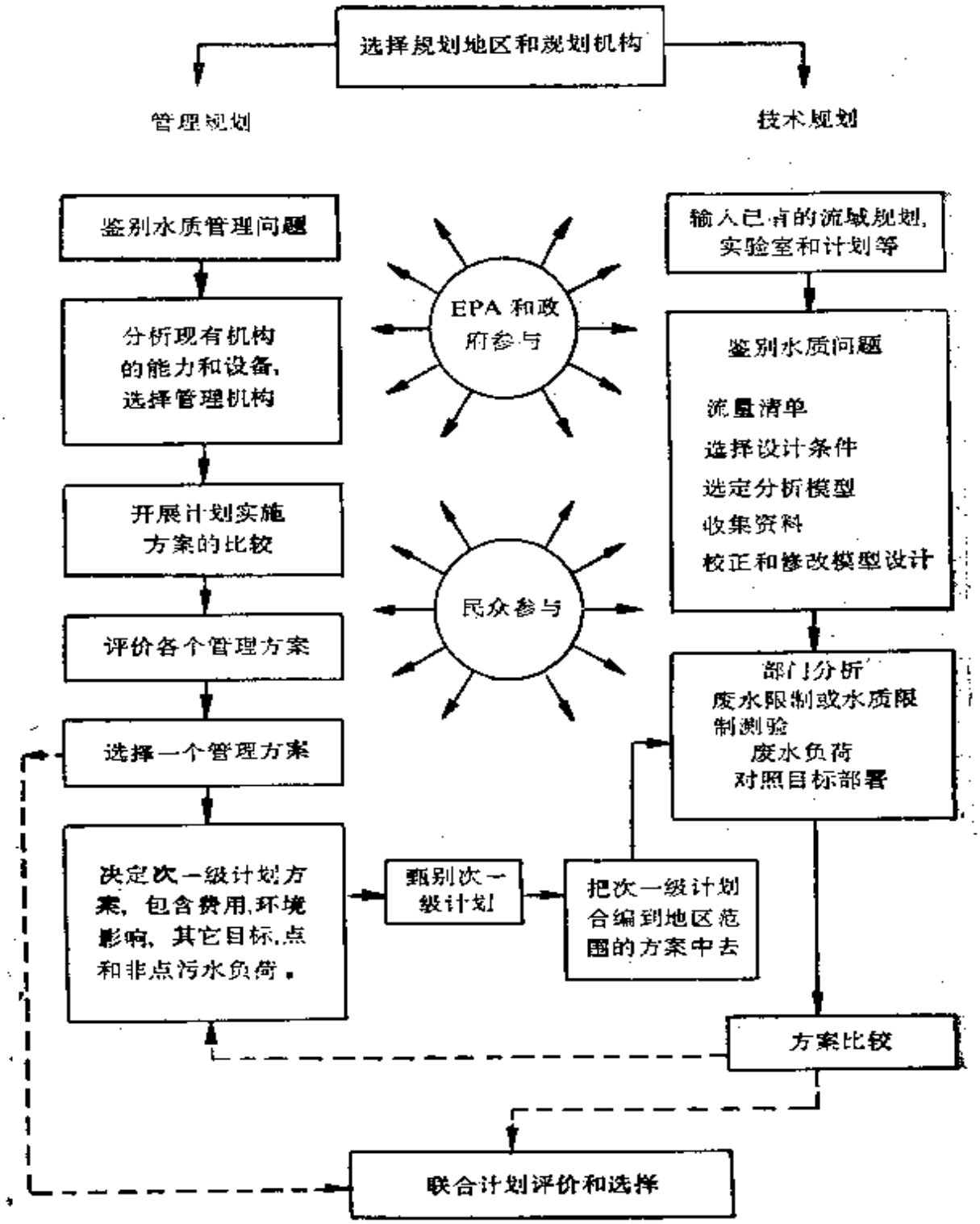


图 6-5　208 部规划过程(韦伯尔,1977 年)

1. 问题的鉴别，
2. 鉴别约束条件和重点，
3. 鉴别问题的可能答案，
4. 开展计划的方案比较，
5. 分析计划的比较方案，
6. 选定一个地区范围的规划，
7. 计划周期性校正。

图 6-5 也指出了 EPA规划战略在理论上是优秀的，合理规划的所有主要元素都已经具体体现了市民的参与，它是整个规划实施的重要部分。但是，资料收集大纲的仓促制定以及 303、201 和 208三部门之间的协作不良，使实际与期望相差甚远。多布罗沃斯基和格里洛(1977年)曾讨论过新泽西州东北地区 303、208 和 201 部① 之间的实际关系。报告中说："初步的评价表明，201 部详尽的工作能影响 303 和 208 部研究的结论，一个广泛的(包括环境、社会和经济等)〈成本-效益〉说明可以要求重新检查 208 和 303 部先前工作的假设和结论。"他们建议美国国会建立一个机构，审查 201 部可能为 303 和 208 部参与研究拨出的资金。他们强调研究应当实用，对使用经费的地方作详细考虑，并提出与完成的研究水平相当的经费额度。

要使公法 92—500 付诸实施是十分困难的。假定 201、303 和 208部的研究完成了，并且很好地实行了，那么，如何能使美国水体一直继续保持应有的水质呢？韦伯概括了这个问题："在目前情况下，由于联邦 EPA 和州政府为建造污水处理厂提供资金，并由 NPDES 掌握批准权②，因而他们在事实上对点源的排放具有绝对的权威，但政府方面和规划方面并不清楚当地有关的土地利用

① 201 部、303 部、208 部等为属实施环保规划的下属机构。

② NPDES 批准权就是 EPA 根据基金条令，在特殊情况下，可以允许点源排放污水。

控制和非点源排放的情况。实施208部规划的地方机构是按照EPA标准选择的，他们尤其需要一份土地利用状况的计划，但他们并不需要拥有控制土地利用权力，也不需要水质领域中的任何专业知识或职能。"

这样，问题就变得复杂化了。塞和代尼斯(1977年)曾提出解决这个问题及其它水资源规划问题的合理而有效的途径。他们提出，第一步是应用防护手段来替代修修改改。由地方选出机构来实施水资源保护大纲，监督各个社区自觉执行大纲，避免弄虚作假。

第二步是选定小流域作为组织单元。如果这些小区域在城市化期间不适宜管理的话，它们可以要求扩大工作范围并提高费用。所选的小流域对人民具有政治和地域上的意义，它能够直接受当地政府活动的影响，小流域居民是多相信息反馈过程的一部分，它提供了一个适当的市民参与机构，居民可以参加当地一级的规划过程。而大河流域规划则缺乏这种默契，其居民关系是疏远的，他们不认为有参与流域规划的必要，他们对最终结果无所谓。因而，规划委员会和规划员必须设法激起公众对规划成果的兴趣，一个协调良好的公众参与大纲可能会大大改善公众的冷漠态度。

正如本部讨论所指出的那样，公法92—500有它本身的问题，但这些问题并非总是不可解决的，这法令在某些方面仍具有足够的灵活性，它随新情况不断地进行修改。公法92—500的目标极富想象力，包含了众多抱负不凡的考虑，它有助于建成一个充满活力的水质管理行政机构，这样，在水中捕鱼和游泳的日子也就不会太远了。现在我们必须工作，一天一天地实施规划，公法90—500代表了一种充满活力的新鲜空气，它在试图解决一个极端困难的多种不同学科综合的问题。

第七章　工程措施

本章将简述几种主要的工程性改善方法。应用其中的任何一种方法，都必须判断它在应用地区的气象和自然地理方面的功过。即根据每一种方法的优点和缺点进行判断。没有一种方法适用于任何地区，最优方案极可能是在不同的程度上应用几种方法。本章的要点就是从根本上提出对减轻城市地区现有的水质和水量问题有价值的技术。

§7.1 水　　量

图 2-3 说明了不透水下垫面的增加与城市地区恶性暴雨洪水的增加有关。从本质上看，这种形式就是储存的雨水减少了。反之，如果有人希望扭转这个过程，即降低径流的流量和总量，那就可以使储存增加。用下面叙述的方法就可以做到。

屋顶蓄水

乔(1971年)指出屋顶在城市地区的不透水下垫面中占了较大的比例。他得出结论，屋顶占城市不透水下垫面的 50%以上。而在典型的中等阶层住宅区里，屋顶占不透水下垫面的10～25%，如果有人设计可以蓄水(达一英尺深)的屋顶，那么大量的水将被储存起来，等暴雨之后慢慢排泄。

乔指出，屋顶不象城市街道那么肮脏。所以，除了受大气污染物影响外，雨水的水质是非常好的。在许多地区(例如，台湾)屋顶的雨水完全被"接纳"用于烹调、饮用和洗涤。用乔的话来说："要改变现在这样把屋顶作为排水用途的做法，为什么我们不能使屋顶起控制和调节用途，就象一种储存方法呢?"

这种设计要求的价格并非高得令人不敢问津。乔完整叙述了通常把屋顶造成能蓄八英寸深的水(40磅/英尺^2)，并有四英寸的附加高度，并不增加多少造价，因为屋顶的费用仅仅是大多数城市建筑总费用的一小部分。屋顶设计成平坦的缓坡用于排水，出水口能使六英寸的雨水至少经过两天才能排完，并可以与暴雨下水管线或透水的地下水回灌坑相接。屋顶水可以接纳并用来增加城市现有的供水，或(经过回灌坑)直接增加地下水。

也许乔强调的最重要的经济因素是，由屋顶滞留雨水可以相当多的降低城市暴雨下水道系统的尺度。他建议，既然屋顶储水可以滞留50%的洪峰流量，那么在暴雨下水道设计中它将成为决定因素。换句话说，已设计的下水道能输送20年一遇的暴雨，那么加屋顶滞留的水量，可以安全地对付100年一遇的暴雨事件。通过这种方式，城市在最初能装设更小的下水道，并从根本上节约了建筑和长期维护的费用。

多孔铺地材料

萨伦等人(1972年)研究了各种多孔铺地材料在增加渗透地面，容许暴雨下渗，从而减少地表经流方面的潜力。作者发现，对于不同的经济和自然原因，一种多孔①的沥青混凝土是最适合的材料。这种材料显示了极好的物理特性，价格又便宜，并且可以采用常规的铺砌方法。

分析三种类型的多孔沥青混凝土。这些混凝土的下渗率从5英寸/小时至25英寸/小时。萨伦等人定义多孔沥青混凝土为：具有有效孔隙的多孔材料对液态水有很高的渗透性，是由沥青水泥粘合成整块的……多孔材料的制造是加热到275～300°F，并用热沥青水泥混合而成。将热的混合材料拖到铺砌地点，在那里由散布机铺成光滑面，然后由压路机压成设计的密度。

---

① 包含孔隙的材料——包含少量有用孔隙度的总和，在沥青混凝土中通常包含占10%总体积的孔隙(萨伦等人，1972年)。

作者简述了使用多孔沥青路面的好处。多孔铺地材料铺筑在不透水地面上，可以滞留暴雨水，并且有可能滞后散发。储存能增加现有的供水，或者，如果多孔沥青铺在渗透地面的话，水能补充城市含水层，该层常被严重损害。滞留暴雨水能缓和突发洪水并保留天然的排水模式。储留暴雨径流正变成一个日益重要的问题，尤其在干旱气候的地区(安格农等人，1972 年)。暴雨水的短时间滞留，对于降低冲击性负荷，改善地表径流的水质也有良好的作用。

萨伦等人指出，对飞机跑道上类似的沥青地面的研究表明，这种地面成功地防止了滑行和刹车中的事故。这种铺地材料还增加了铺砌标志的可见度，作者曾要求增加这方面的安全性。

使用和维护多孔沥青地面的费用与用于暴雨，或与下水道混合的常规铺地材料的费用相比，基本相等或略便宜一些。

地表滞水

菲尔德、塔夫里和玛斯特斯(1977 年)报告：地表池塘是开发者应用得最普遍的滞水形式，表 7.1 说明了这种方法和常规的下水道之间的费用差别。

表 7.1　地表池塘装置与常规下水装置的费用比较

位　置	情　况	费用估计($)	
		地表池塘	常规下水
密苏里的俄斯城	一个规划社区，包括永久娱乐用湖泊及附加的暴雨径流排放能力	2,000,000	5,000,000
密苏里的圣路易斯稳固的货运公路	卡车公路终端用作停车场，利用滞留暴雨径流	115,000	150,000
肯塔基的圣康帕培	一个军用装置用作池塘以减小所需排水管的尺寸	2,000,000	3,370,000
伊利诺斯的布鲁明顿　印地安湖伊斯坦斯	一个住宅规划区，用池塘和一个现存的小口径排水管	200,000	600,000

(菲尔德等人，1977 年)

开发者可以简单地通过完整的斜坡地把一个停车点作为地表池塘，并结合一定的限制装置以滞留径流。如果在停车点的特定位置采用多孔铺地材料，即使没有栏杆，水也就不会成为徒步者或车辆的一个问题了。过去的概念总是采用停车场和设计下水道并举，以使暴雨尽快流完。作为一系列过程，正如第二，第四章中讨论的那样。这些水会带来很多问题，如果这个观念得到改变，建设成类似滞水水库，这将大大减少径流。

暴雨水滞留的结构

纽约长岛的南骚县于 1935 年完成了一个长远流域规划。其中县环境卫生委员会打算建回灌盆地以代替暴雨下水的干线(西帕恩，1970年)。这个决定只履行了一部分，因为当时相信，建筑和维修回灌盆地的费用稍贵于暴雨下水道。

终止于盆地或坑的短距离下水管线系统已经布满全县，在南骚县大约有 500 个回灌盆地(临近的萨福克县大约有 1400 个)。这些盆地的平均大小约 2 英亩。变化范围从 0.1 到 30 英亩，平均深度约 10 英尺。他们未规划回灌坑，而是挖掘到地下中等至高度透水的冰川砂砾层上。大多数回灌盆地位于地下水水面以上①。

1935年以来，回灌盆地的基本设计标准在试验中逐渐演变。有两种基本类型的盆地：那就是具备坡面汇流结构和不具备这种结构。有坡面汇流结构就可以将超过盆地容纳能力的部分径流(通过管道、渡槽或明沟)输送到临近河流或另一个盆地。有坡面汇流结构的盆地有两个主要的设计标准。第一个是盆地在坡面汇流高度以下的体积。它的估计由乘积确定：(1)全流域排水面积上5英寸降雨的雨水总体积，乘以(2)一个从40%至90%的因数，该因数根据坡度和由街道、停车场所占的面积百分比而变化(在大部分住宅区取 40%，在工业区可以达到 90%)。第二个设计标准涉及到坡面汇流结构的高度，它必须高于回灌盆地底部十英尺以上。在

① 见辛(1976年)有关回灌盆地壤中流的讨论。

设计中，盆地底部和边坡上的下渗忽略不计，以增加安全因素。

欧弗顿和米朵(1976年)建议：暴雨滞留盆地应该稍大于滞积在公路或公路阴沟中的水量。在他们提供的例子中，公路下有一条36英寸的阴沟。当阴沟中的水超过它的过水能力时，在漫到公路上以前，可以积水 2.17 英亩——英尺之多(水头高3.15英尺)。(作者描述的是田纳西的克诺克思维尔，一个为 85 英亩住宅区流域设计的盆地。)显然，在这种情况下，会有许多有意或无意的滞留结构存在。

阿伯特和格里格(1978年)提出了设计滞留水库的方法。他们警告：滞留水库不能任意地安置在流域内，因为它们增加洪水的危险也许远远大于减少洪水的作用。他们采用三角形过程线(图7-1)。根据下式计算总水量：

$$\text{总水量}=\frac{1}{2}Q_p(T_c+mT_c)\frac{60}{43560}。$$

式中，总水量为近似的暴雨径流量，Q_p 为洪峰流量(立方英尺)，T_c 为集流或滞后时间，mT_c 退水时段。正如作者指出的那样，当流域中有一系列滞留水库时，计算总水量就变得更加困难。

下水道可以设计用来储存暴雨水，芝加哥就建有地下储存暴雨水的坑道构作物。

城市街区的新设计

如果城市地区为维护天然环境而设计，那就比对环境进行总体改建要好得多，因为后者涉及到不透水地区的许多径流问题要消除。在讨论了其他人的工作之后，马丁(1972 年)提出了他自己的建议，他指出由福瑞尼尔图证明的等面积原理，如果有人试图计算图 7-2 中的每一个环纹的面积，他就会发现纵然每一环的宽度减小，他将发现其面积与前一个是一样的。

这个原理在设计和规划土地时恰当应用，就能较大地保护天然环境，图 7-3 说明了这一应用，其建筑物占地同另一张平面图一样。右边的平面图说明在主要的土地利用以外是天然地表。

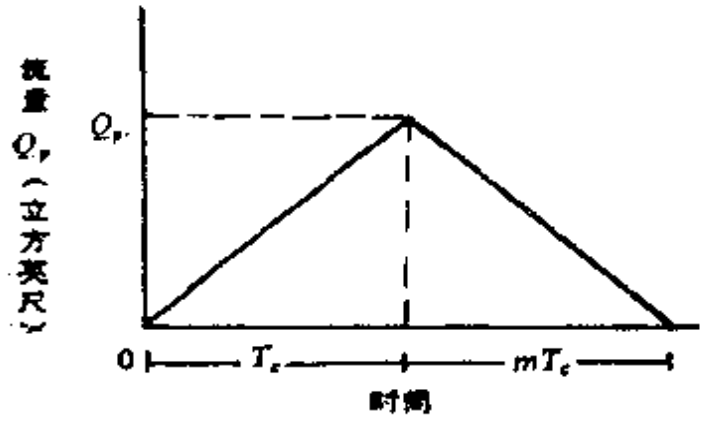


图 7-1　三角形过程线(阿伯特和格里格,1978 年)

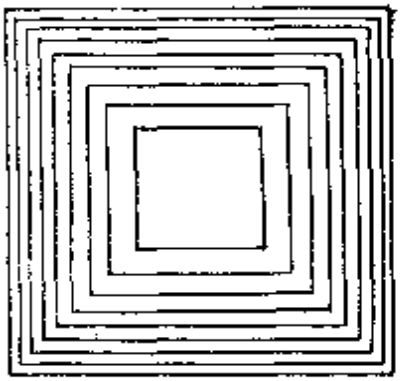


图 7-2　由福瑞尼尔图说明的等面积原理(马丁,1972 年)

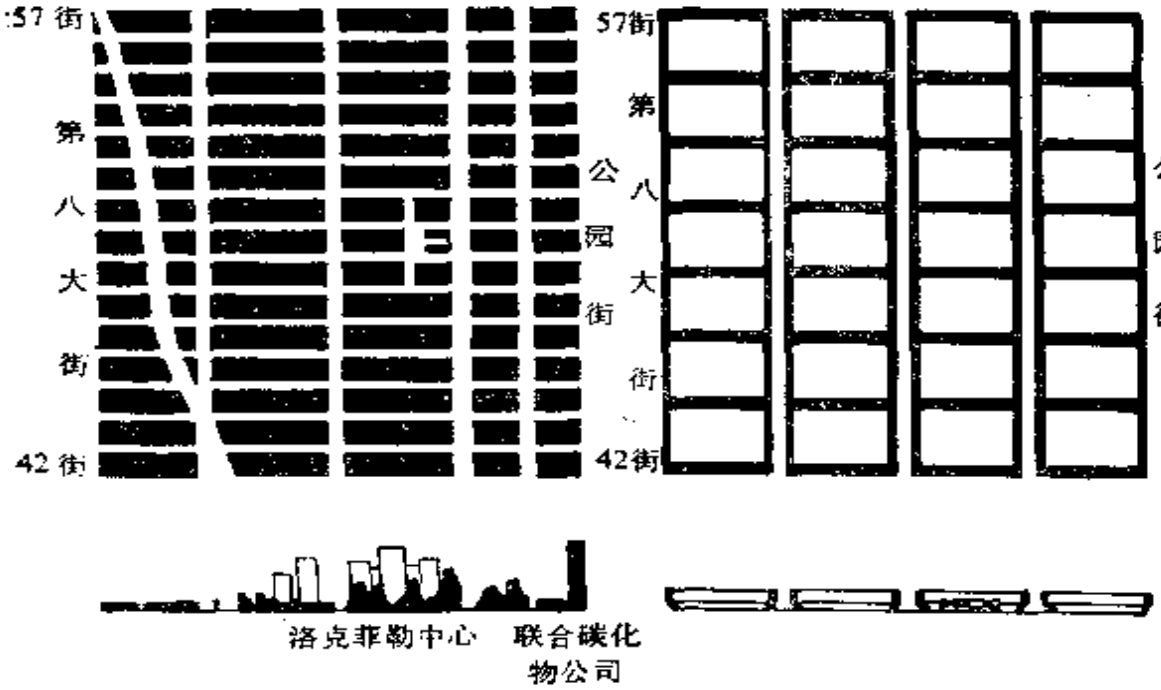


图 7-3　等面积原理的应用(马丁,1972 年)

§7.2 水　　质

滞水储存也是城市地区水质问题的中心焦点。然而，其方式与水量相反，城市地表的垃圾和废物的累积与储存在第四章中已

经说明，它对河流产生冲击性负荷的结果。有两种基本的结构方法来缓和冲击性负荷：(1)使累积物质逐渐地、缓和地排放由此把冲击负荷分散在一个更长的时段里，(2)由废水处理厂处理暴雨径流。

缓和排放过程

在§5.6中，街道清扫的结果已经作了简单的讨论。在华盛顿特区的一个地区完成模型研究之后，苏瑟兰和迈克可恩(1978年)提出真空吸尘清扫大约比机械清扫有效5%，而清扫者以3英里/小时的速度行进，又比以4英里/小时的速度行进更有效率3%。通过四个地区的研究，最有效的街道清扫过程被认为是以3英里/小时的速度行进的真空吸尘清扫者，每次间隔两天。这些观察并未被认为适合所有地区，但是尽管如此，清扫的频率、速度和街道清扫设备的类型直接影响了清扫的效率。

萨特和博伊德(1977年)提出：可接受的规划方法和对街道清扫方案的评价在目前是没有价值的。他们建议：公共事业部有街道清扫过程的准确而细致的记录，包括用人，设备利用和设备维修。以这种方式，分析资料就可以提供一幅平均的清扫街道费用-效果图。

菲尔德和拉戈(1975年)报告说，街道清扫者迁移的灰尘和污物(造成绝大部分严重的水污染负荷)平均为50%，而铲除垃圾和废物的效率是95～100%。他们也推荐使用更有效的真空设备来清除这些小颗粒。他们列出的费用从2.18美元/英里路边长度到8.42美元/英里路边长度。

萨特和博伊德观察到铺砌类型和条件影响街道上松散颗粒物的产生特性，他们发现全混凝土的街道比全沥青的干净，而混凝土沥青混合铺砌的街道居中。这三类中的任一类，从根本上看，街道保养条件好的要比条件差的干净。萨特和博伊德建议公共事业部花更大的力气把铺砌的街道保养好。

暴雨径流的处理

有两个明显的问题与暴雨径流处理的概念有关。首先是并非所有的城市径流都进入下水道系统，而且河流将接受数量不等的未处理径流。第二个问题涉及到污水处理厂的能力。当输入超过处理厂的处理能力时，有些厂将自动地把水放入河流中。影响废水处理厂设计的其他因素由菲尔德和拉戈(1975年)说明：由于暴雨径流的间歇和变化，以及系统流动的相互关系，对暴雨处理设备来说，不存在一种"平均"的设计条件。……另外，夹有大量碎屑和冲击力的暴雨径流可以较大地限制中心控制室作出的有限选择(由于很高的传输代价)并有所反应，而复杂的设备几乎没有作用或不可能维修。

上面提供了一种选择，就是收集和储存暴雨水，在以后的无雨时期，废水处理厂就以这种方式，把储存的水以一定的控制流量送进它的处理设备。彼特和菲尔德(1977年)指出这种方法的一个缺点，在高度城市化地区，储水设备的费用高达25000美元/公顷或10000美元/英亩服务地区。

菲尔德和拉戈指出，物理处理过程有很多方法适合暴雨水的处理。这些方法由常规沉淀，气浮，筛选和带有特殊调节装置的过滤等组成①。同暴雨间隙中设备的有效利用一样，流量和负荷的灵敏度在一些情况下也是个问题。

常规的两级废水处理厂通常包括：(1)机械过滤，(2)沉淀和曝气，(3)生物过滤。近来，科学家通过研究扩大生物过滤方法的可能性，和用它来处理原废水的潜力。在废水处理厂，生物过滤基本上由细菌的生物量决定，因而一些科学家稍稍改变这个方法，并研究水生植物的利用，或基本上是植物过滤系统。

沃尔弗顿等人(1976年)指出道：水生维管束植物当被应用在一个控制的生物系统中，按规定的收获过程以获得最大生长量和污染物有效迁移的时候，作为一种具有显著效果和低廉成本的过滤方法和处理系统，对于城市和工业区排入水体的废水和有毒物

① 见克帕(1976年)对废水处理厂的详尽讨论和说明。

质来说，是颇有成效的。

作者指出，在很好的条件下，一英亩(0.4 公顷)水风信子能：(1)每天产生 534 磅以上(240 公斤以上)干物质，(2)每年从废水流中迁移 3500 磅(1591 公斤)氮和 800 磅以上(364公斤以上)磷，(3)每 72 小时吸收 150 磅(68公斤)酚，以及每 24 小时吸收 120 克金属沾染物。

西德尔研究了宽叶香蒲在水净化中的应用，这种植物适用于污染水，并表现出一种令人惊奇的能力，不仅能消除危险的工业毒物(酚)而且能继续生长，用它还测试了其他毒物如氯酚，五氯苯酚和氰。在有些情况下，建立了一个串联系统，作者报告了非常满意的结果。这些毒物对常规废水处理厂有一系列的威胁，它们会杀死生物滤网上的生物。如果被排入河流，它们会极大地破坏水生生态并且会产生处理问题。

西德尔继续提议利用阳光和重力作为一种新型的废水处理厂，用作者的话说："今天，我们作最复杂的努力以捕获和利用太阳能，绿色植物是一种古老的模式，我们不能对它重视和估价太高。……通过一系列不同水平的排水沟的设计，重力能利用来输送并使废水曝气。"

在上面几段里，已经介绍了有关处理原废水的生物方法的一些研究成果。这些方法在点源污染方面被应用并作基础试验。非点源则是另一个问题，需要进一步研究和设计。然而，有价值的技术和原理基本上是一样的。暴雨径流是变化的，其随机特性使设计和在暴雨间隙里维护植物过滤器更复杂。气候直接决定了水生植物的生长和生存，任何植物过滤器的设计必须考虑这一点，对于非点源污染处理问题的解决，最终应该作为一个完整的问题充分应用推理方法。很可能把物理处理系统用于储存的暴雨水，而用植物过滤进行处理将是一个成功的方案。

在下水道里积存的地表径流在暴雨的冲击下会对河流产生冲击负荷，由于这是一个储存问题，其解决方法与本节开始时推荐的

那些原理一致。例如，逐渐排放并处理。逐渐排放这些高浓度物质可以通过储存设备的结构和系列控制排放来完成(见图7-4)。水处理可以是排放设计的一部分，而处理可以由在下水道中用来对累积物充气并降低浓度和机械装置组成。菲尔德等人(1977年)建议以不同的下水道设计来阻止固体的沉淀并提供较低的速度产生固体流动。

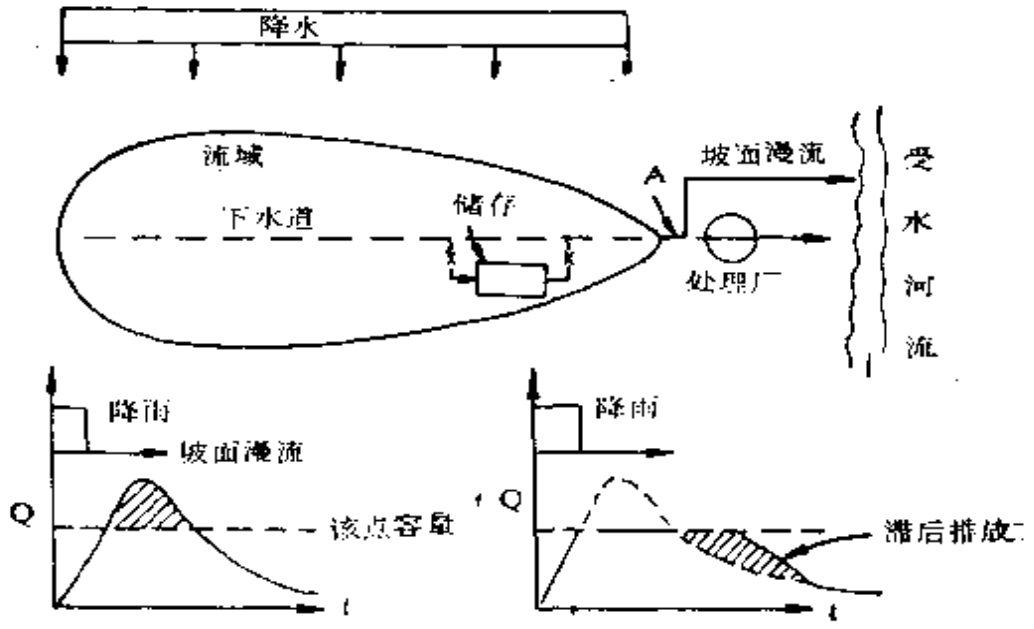


图 7-4　用储存来控制暴雨径流的结果(菲尔德等人,1977年)

公法 92—500 的焦点是减少，或有助于消除进入河流的污染物。河流具有吸收一定数量的废水的能力，如果以某些机械的方法，使河流的吸收能力增加，那么，污染物的流量就能增大些或至少能被允许。下水道不会接纳所有的城市径流，而污染物总会进入河流。值得庆幸的是这些非点源污染物的总量和浓度较小。在某些情形下，提高受水河流的吸收能力是可能的。在原理上，综合的水质目标其目的在于整个城市地区。

这种方法允许非点源和点源污染的流量经过最低限度的处理进入城市河流。在这件事上，我们将基本上考虑有机物流和一些无机物，但没有工业毒物。这些河流会变成有控制的腐败区。在腐

敦区里，不接触水的娱乐可以允许进行，在这些河段的下游将处于河流的机械曝气作用下，水流具有相当的自净能力，在下游河段可进行接触水的娱乐活动。为了完成这种方法，科学家不得不对河流所涉及到的一切进行彻底的调查，区域性气候和细菌的生长潜力及降解速率都将涉及到。然而，这种技术是存在的。在原理上，水资源方法类似于这种德国完成的方法。

§7.3 表面侵蚀和沉积控制

表面侵蚀容易发生在植被被破坏，并且直接暴露在诸如挖掘机械进行进一步开挖的地方。表面侵蚀的过程见图 7-5。雨点以19英里/小时的速度(美国环境保护局 1971 年)撞击地表，撞击的大量动能传递到地表使土壤颗粒分散。当更多的雨落下时，地表被浸透并产生坡地漫流，夹带着水-泥混合颗粒。在输移过程中，混合物不断磨擦，并在移动中累积更多的泥粒，增加了泥水混合颗粒的浓度。当不同的径流汇集时，最初发生下切，溪流产生了，冲沟侵蚀也发生了。当泥粒脱离混合物时就发生了沉淀。这是输移能量降低的结果，并可以产生更光滑的坡面及池塘。

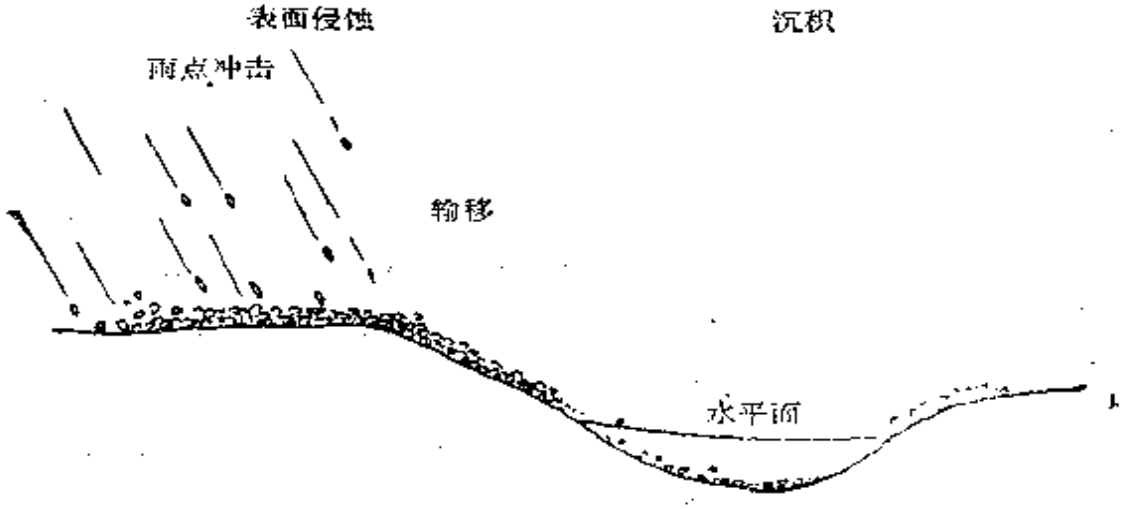


图 7-5 表面侵蚀的过程

桑逊（1973年）给出了侵蚀指数（EI）发展过程的简单历史。马斯格拉夫（1947年）考虑了坡度和农田的长度，试图确定侵蚀造成的土壤损失量。在1958年，通用的土壤损失公式（经马斯格拉夫精心研究）由威斯曲梅、史密斯、育兰完成，并经美国土壤保持局的推广应用，形式如下（斯沃顿和考思兹，1973年）：

$$A=RKLSCP,$$

式中，A 为计算的土壤损失量（吨/英亩），R 为降雨因素，K 为土壤的侵蚀因素，L 为坡长因素，S 为坡地倾斜因素，C 为收获的处理因素，P 为侵蚀的控制因素。

斯沃顿和考思兹（1973年）讨论了在宾西法尼亚州里确定这些变化因素，并对在其他地区应用这个公式提出了一些见解。

防止表面侵蚀

看看图7-5，如果有人能努力降低雨点的冲击，那么表面侵蚀就可以大大减少，这可以通过把植物覆盖的损坏降至最低或安置各种人工覆盖以截断雨点的路径，从而使它们在到达土壤表面之前就损失掉能量。

桑逊（1973年）列出了几种提供地表覆盖的方法。细刨花垫是一种机器制成的卷木丝垫子，含有80% 8英寸或更长的纤维。这些垫子，以及其他类型的垫子，可以钉在地表。稻草纤维，干草，麦杆，或碎木片使用的效果都相当好。然而，如果表面冲蚀开始了，这些作用很快就消失了。化学土壤保护剂可以完全维护土壤使之免受表面侵蚀。速生草本一直在各种气候条件下使用，并提供了一种"天然"防护覆盖。这些草本在一次施肥后就会产生。

水-砂混合物的输移受到把土粒从水中分离的方法或输移能量的消耗的限制，这可以通过成捆的麦杆、砂和砾。水流过这些滤料，遇到些阻碍，这样就消耗了能量；与此同时，较大的砂粒被留在滤料前了。

防止溪流和冲沟侵蚀可以由几种方法完成。首先可以用小的半渗透栅栏（环保局，1971年）来使能量消耗及分离泥沙；片流会趋

向于集中，可以用分散这种强大水流的办法来减少下切。或混凝土管渠的方法，或用一条弹性的管子顺坡排水(一条很大的软管)。以及利用砂、砾的能量消耗来输移片流(见图7-6)。在所有方法之下的这个思想是消耗这种强大水流的下切能量。

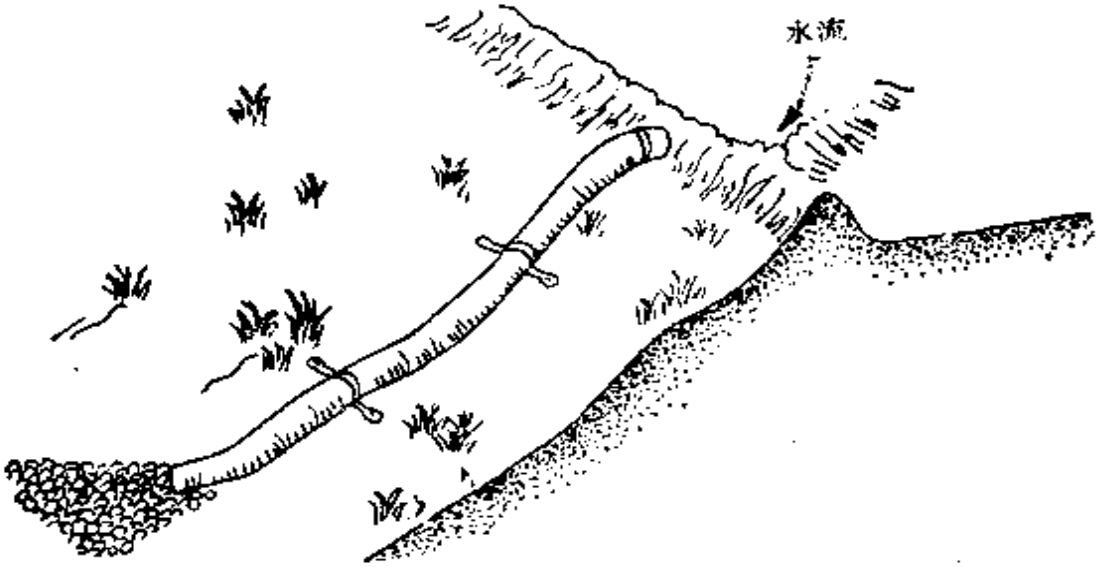


图 7-6　临时性的软管顺坡排水，在水流的末端砾石的能量被消耗，从而防止了侵蚀



图 7-7　在末端具有防止侵蚀的消能措施的小型沉积盆地

沉积是一种优先使用的恰当方法，可以较大地降低侵蚀。从另一方面来讲，沉积可以允许发生在建筑完成后的建筑物位置；累积的泥沙可以返回源地或泥沙可以留在该位置上，而不影响下游的天然系统。通过泥沙滞留盆地的利用就可以在局部增加沉积(见图 7-7 和图 7-8)。它通常位于建筑物的最低点，由人工开挖的池

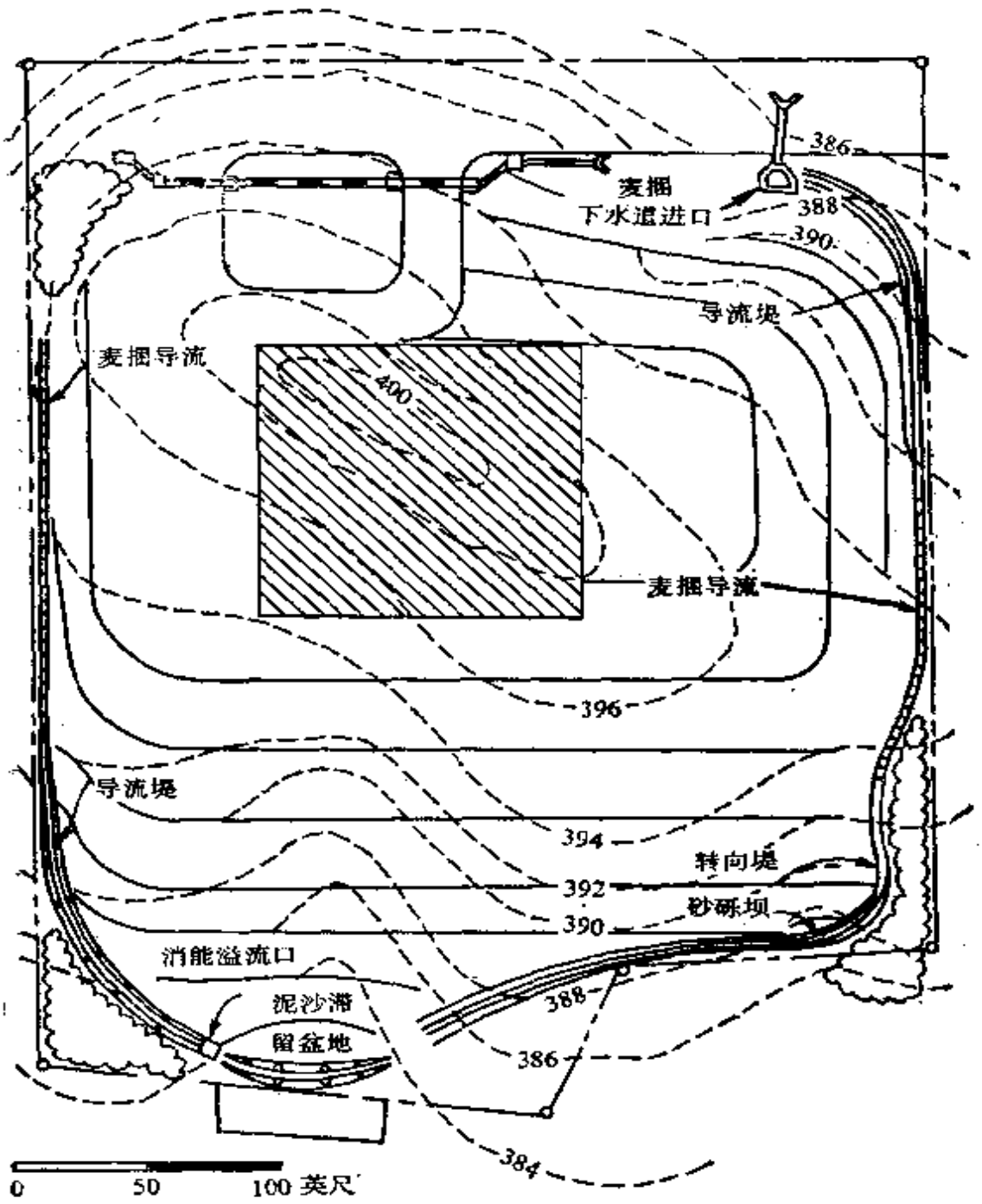


图 7-8　泥沙和侵蚀控制规划的例子(桑逊,1973 年)

塘组成，更可取的是带有一个盆地，见图 7.7。这里的目的是提供静止的水以使土粒下沉，而不允许盆地充满着或满溢着，使泥-水混合物进入邻近河流。泥沙滞留盆地可以与防止砂砾侵蚀的方法

联用。在建筑物的尾端，将从这些池塘里把泥沙挖去。或在某些情况下，池塘将保持下去，作为新增加的天然景色，如同继续作为泥沙滞留盆地的作用一样。

各种表面侵蚀和沉积防护方法的费用由桑逊(1973年)作了详细讨论。在今天，他的费用估计要更高了，因为连续的通货膨胀增加上去了。即使如此，控制表面侵蚀费用的大致轮廓还是可以从他的估计中得到。为了作个比较，图 7-8 给了一个建筑地点的泥沙和侵蚀控制规划的说明，而表 7.2 列出了 1973 年建议的费用。

环保局(1971年)估计沿公路的平均建设费用为 1,000,000 美元/英里。用于对付侵蚀和控制方法的费用在每英里 10,000 到 15,000 美元之间。建筑性措施平均每个 40 美元(由工程和地质咨询估计)和每个 100 美元(由开发者估计)。

表 7.2　泥沙和侵蚀控制规划的费用估计

项　目	单　位	数　量	单位费用 ($)	费　用	
				加　州 ($)	弗吉尼亚 ($)
下水道进口的麦拥	个	1	55.00 (46.34)	55	46
导流提	长度、英尺	57	4.51 (3.70)	2593	2127
表面导流	揭	90	7.86 (6.62)	707	595
碾石坝	6英尺	2	10.44 (8.99)	21	18
泥沙滞留盆地	立方码	33	16.25 (13.75)	585	495
2.95英亩设施的总费用				3961	3282
每英亩费用[1]				1340	1110
如果在坡地的坝上要有水力防护和种植时，另加					
加州				720	
弗吉尼亚					680
每英亩总计费用				2060	1790

① 精确到 10 美元。

第八章　废水处理

在天然河流中，复杂的生物组成表现出三大特征：物种的复杂性，物种及种群数量的稳定性，以及强烈的自净作用。这些特征使天然河流在接受流域表面进入的有机废物，或水生生物死亡的时候，在较短的时间和距离内，通过低等生物的吞食和食物链的传递、消耗，而迅速消除。

但在城市区域的河流中，工业和生活废水持续、大量地进入河流，使河流中的生物特征严重扭曲，以至于不可能使河流水质恢复到原有的洁净状态。

因此，有必要人工设立装置，以达到在极短的时间和距离内消除大部分废物，而将废物进入河流的数量减少到可以保持原有生态系统，并消化废物的程度。这种人工装置就是废水处理装置，而允许排放的标准则由专家确定，并以国家强制规定的方式公布执行。

§8.1 废水的氧化和污染物的去除

有机废水的处理——氧化过程

有机废物的去除在天然河流中表现为氧化过程，每经过一级食物链平均要氧化掉近90%。河流中最初参与有机废物处置的是细菌，其作用详见§4.2。

有机废水的处理就是一种人工利用微生物（主要是细菌，及少数更高级的微生物）氧化，吞食水中有机物的过程。衡量其效率的指标是以生化需氧量或化学耗氧量表示的有机物在单位时间和单位体积内的去除量。这就涉及到引入的生物种群的适应性和吞食

效率，活性污泥(生物种群)在单位体积内的数量高低，以及人工提供的溶解氧的数量。

生物种群的选择这里不予讨论。从理论上说，每一种废水都可以找到一种或数种适合的微生物群落。

为了提高和改善生化处理的效率，国内外主要从两方面进行研究，其一是提高活性污泥的浓度，其二是增加氧转入水中的速率和利用率。这在下一节中进行详细讨论。

另外，有机废水也可以通过厌氧发酵的过程来降解部分有机物，并获得可燃性气体。但是，为了适合城市区域的河流状况，厌氧处理后的废水也要进行好氧生化处理或充氧排放。

无机废水的处理——去除过程

无机废水往往来自某些工业生产，所含的无机物大多是自然水域中含量极微或不存在的物质，为维护流域的生态系统，无机废水应该在排入河流之前进行处理，以去除各种金属离子和有毒物质。

去除的方法大多是根据无机废水的某些物理性状或化学特性进行处理，常规方式见各种水处理手册，特殊情况则要视具体情况进行研究后处理。

另外，去除污水中的病菌，病毒具有十分重大的意义。污水中的病原体往往是传染病的重要来源，生物处理污水的构筑物中的微生物可以吞食和降解病菌、病毒，或通过生物絮凝使病菌、病毒浓缩于剩余污泥中，便于进一步的处理。一些研究表明，城市生活污水通过二级处理可使病菌、病毒去除 90～99%。生物处理还为污水的进一步加氯消毒，创造了有利条件。

§8.2 高效好氧工艺

有机废水的处理，早期采用活性污泥法及其各种改进形式。其工作原理是让活性污泥悬浮在水中，由底部或表面曝气充氧。由

于曝气过程达 6～8 小时，还需要相当的时间使污泥沉淀，因此场地和构筑物都较大，而场地建筑物和运行两部分之和的费用与水量的关系则是，水量越大，单位水量的总费用越低。因此，国外往往采用这种工艺建设处理水量每天多达几百万吨规模的城市生活污水和部分工业废水。

我国城乡能享受到生活污水处理装置的人口比例还很低，考虑到人口众多带来土地资源的不足，我国的废水处理应该朝高效少占地的方向发展。本节探讨几种效率较高的废水处理工艺，并介绍一种适合高浓度工业有机废水、也适合低浓度城市生活污水的处理新工艺。

纯氧曝气法。它属活性污泥法的改进方式之一，以纯氧取代空气进行曝气，使水中溶解氧高达 40 毫克/升以上，使活性污泥得以充分利用有机废物进行合成代谢，BOD_5 的去除率为 1.45～3.64 公斤/米^3·日(0.30～0.74 磅/立方英尺·日)。但由于制氧的能耗很高，该工艺国内极少使用。

深井曝气法。这种方法也是活性污泥法的改进方式之一。根据气体在水中的溶解度与分压成正比的亨利定律，借助深井的水压，以达到氧气转入水中的速率大幅度提高，从而节约了充氧的电耗。其处理效率与纯氧曝气相差不多，但直径数米，深达百余米甚至三百米的深井，使基建投资很大，且维修困难。虽然用地很少，但采用该工艺的仅限于少数工业废水。该工艺的试验成功还证明了一个有效的结论：细菌的形态及生物性状不会因为压力的变动而变化。

接触氧化法。这是国内处理工业废水较多采用的工艺。其工作原理与活性污泥法的差别在于，细菌是呈膜状吸附在填料表面而固定在水中的，老化的膜在水流和气泡的鼓动下会脱落被更新。这样，曝气池内装有表面积很大的填料，就可以大大提高单位体积内活性污泥的数量。可以达到 10～20 克/升，另一方面上升的气泡撞击到填料上，有助于氧气向水中转化，并提高了氧的利用率。

BOD_5的去除率更高，达到3～5公斤/米^{3}填料·日。但该工艺实际曝气池中的溶解氧一般为3～5毫克/升，而且难以提高。这是因为，一方面受到常温下水的饱和溶解氧浓度不超过10毫克/升的限制，另一方面加大曝气强度以提高溶解氧浓度的方式会增加水中气泡的扰动，过分扰动将阻止细菌附着在填料上，从而使污泥浓度大大下降。

流化床工艺。它则是去除效率更高的工艺。微生物附着在细粒载体表面上，载体受到水流的冲击，(以及气泡的扰动)而在床内翻腾，故称为流化床。由于不象接触氧化法的填料需要支撑，巨大的表面积使得污泥浓度可以高达10～40毫克/升，以至于需要另设装置将载体上的生物膜脱去一部分以继续维持正常工作。BOD_5的去除率可以高达7～8公斤/米^3·日，该工艺本身也有几种不同的流程。一种是以纯氧充氧，在床内靠水流流化，则需要循环回流处理后才能出水，如BOD_5须去除200毫克/升，而溶解氧一次利用不会超过40毫克/升，则至少要循环五次。另一种以压缩空气为氧源，靠水流在床内流化，则循环次数更大，为纯氧流化床工艺的八倍以上。循环次数越多，不仅需要的电耗很大，而且废水在处理工艺中的停留时间也成同一倍数增加，这就要求处理装置的体积和建造费用上升太大。故而这些工艺国内使用很少。另外一种以空气作为流化动力的三相生物流化床，从理论上看，应该可以达到很好的效果。但具体技术关键之一，是要求流化床下部布气之后，气泡在上升过程中不能合并为大气泡，要做到这一点难度很大。而一旦出现大气泡则该工艺就几乎没有效果了。由此可见，流化床工艺的先进性必须在良好的设计、制作技术和高水准的操作人员的支持下才能实现。

加压接触氧化法。近年来，国内出现了一种新的好氧生物处理工艺。它是接触氧化法的改进工艺，采用填料挂生物膜的方式，保留了污泥数量大，更新快的优点；又利用密闭加压的方式，以获取接近于纯氧曝气法的溶解氧浓度；水流方式采用推流式，促使

沿水流方向上生物群落更适合废水水质的变化，从而达到更稳定，更好的出水水质。该工艺就定名为加压接触氧化法，已经在数次环保展览上出现，并应用于印染废水，以及制药、酿酒和炼油等等废水处理之中。

目前该工艺的应用一般使污泥浓度维持在 10～20 克/升，曝气塔保持表压 0.3 兆帕（3 公斤/平方厘米）的压力，在常温条件下，溶解氧就可以达到 30 毫克/升以上，使好氧反应时间大大缩短。借助于溶解在水中的大量气体，通常采用气浮的方式可以去除剩余污泥，从而取得极好的处理效果。

该工艺作为主体部分处理印染废水和啤酒油化混合废水的情况见表 8-1。需要说明的是第三行的数据持续了两个星期多一些的时间，系厂方调整生产时期，笔者亲自调试操作的结果。这一结果表明，如果进一步提高压力，并改进填料的密度和供气条件的话，该工艺还可以进一步提高效率，这方面的工作尚未开展。

表 8-1　加压接触氧化法处理废水参数

废水类型	进水 BOD_5 毫克/升	进水 COD 毫克/升	进水水量 吨/日	加压接触氧化塔 停留时间 小时	加压接触氧化塔 平均压力 公斤/厘米²	加压接触氧化塔 BOD 去除负荷 公斤/米³·日	加压接触氧化塔 COD 去除负荷 公斤/米³·日	出水 COD 毫克/升
印染废水	400～450	800～1000	1500	1.8	3.0	2.5	5.6	<100
啤酒、油化、废水	400～500	900～1000	500	1.1	3.0	4.7	9.5	<100
	500～600	1200～1300	760	0.7	4.5	8.0	17.7	100～120

1 公斤/厘米² = 0.1 兆帕

1 公斤/米³·日 = 0.2046 磅/英尺³·日

该工艺还可以直接应用于浓度低水量大的城市生活污水处理。以每人每天产生 0.5 立方米生活污水计算，20 万人口的生活污水处理的建设费用为每人 106 元（1989年）或更多一些。而这一价格并不比美国同类规模二级处理厂每人 40 美元（1972 年）的建

设费用贵。但处理1立方米耗电约0.5千瓦时却比活性污泥二级处理厂的0.2千瓦时高。

考虑到加压接触氧化法是采用空压机作为气源的。空压机及场地、配件的费用，耗电和噪声都不利于该工艺应用到城市生活污水的处理中去。

射流加压接触氧化法。最近的一项工艺改进可能是以射流吸气来取代空压机。如果这一改进可以实现，改进后的新工艺可以广泛应用于我国城市生活污水和一般工业废水的处理，以及高浓度有机废水的处理，与其他工艺相比不仅投资省，占地少，操作方便，而且电耗也低。

§8.3 治理责任社会化

到目前为止，废水处理主要用于工厂生产装置的末端，或城市生活污水集中排放的区域。对于城市径流的处理极少有实际的例子。

工业企业生产废水的处理源于社会环境保护意识的增强，源于社会对企业的压力和强制。出于节省投入以提高效益的考虑，企业本身总是试图避免投资处理废水，或投资不足，从而造成已有废水处理设备的闲置或运转不足。早些年的统计表明，国内约三分之一的处理设备质量欠佳不能运转，约三分之一的处理设备已经在运转但未能达到设计的废水处理效果。

社会要文明、发达，就必须保护环境。这一责任落实在企业方面虽然符合"谁污染，谁治理"的原则，但未必能达到社会的要求。社会是否需要另外建立一些民政事业机构来承担这一责任呢？答案是需要的，并且有可能实现的。

除了专门承担企业废水处理责任的机构外，还需要评估机构，对企业责任的大小作出经济评估；由企业按经济评估承担处理装置建设费用和运转费用。而处理废水的效果则由环保监测部门予

以监督。这种机构在城市生活污水的处理方面作出了较大的贡献，笔者希望类似机构向工业废水处理方面延伸，以合理的代价保护我们的水环境。

企业废水治理工作的社会化必将要求在一个较大范围内逐步确定比较优化的一种或几种废水处理工艺，该工艺能适应大部分工业废水和城市生活污水的处理。

同时，又要在已确定工艺的各种参数指标基础上，研究和发展占地更少，同比投资更省，效果更好的新型工艺。如新工艺能适应废水水质的大幅波动和水量的大幅变动，则可以考虑在城市生活污水的处理中采用，以同时处理含污染物较多的早期地面径流。

从上一节的讨论中可以知道，加压接触氧化工艺一般针对COD浓度为1000毫克/升左右的有机废水，其主要曝气时间为二小时。如果水量增加较多，而COD浓度稍有降低的话，该工艺也可以接受COD浓度700～800毫克/升的有机废水，曝气时间为一小时或更短些。这一适应较大波动的特性其他类型的好氧工艺中还未开发出来。

由于较大幅度的改变工艺参数在正常的工作方式中是难以接受的。而加压接触氧化工艺近年来还在进一步摸索开发之中，还没有完全了解其工作特点。而缩短曝气时间，特别是幅度较大的情况下，对该工艺是一种难得的挑战。

该工艺及其改型如果能在更大的范围内使用，并扩大到城市生活污水的处理和城市径流的处理，对于城市河流的保护肯定是极有帮助的。

第九章　沿海城市风暴潮

风暴潮灾是世界沿海城市最常见的严重灾害之一，如美国的纽约、中国的上海、缅甸的仰光、日本的东京、法国的马赛等沿海大城市经常在不同程度上受到风暴潮的袭击，所以对沿海地区风暴潮特征的分析和最高潮位的预测，是保护城市安全，减少人民生命财产损失、防灾、减灾的重要组成部分。

§9.1　风暴潮的基本概念

风暴潮是沿海地区超过天文潮的非周期性较大幅度的增水现象，是由强台风、强低压、强寒潮或地方性风等大气强迫力作用下所引起的巨浪。当风暴来临时，风吼海啸，海面上涨异常，在沿岸附近大量增水(表9.1)，成灾快、损失重而危害大。就目前所知，印度洋的孟加拉湾沿岸是世界上风暴潮危害最严重的地区，其次是中国、美国、西欧沿海国家和日本等。1900年美国加尔维斯敦发生风暴潮，海面高出平均海面 5 米左右，城市大部分地区淹没，死亡 6000 余人；1970 年 11 月 13 日，印度洋上一次大飓风袭击了孟加拉湾沿海，哈提亚岛完全为海水淹没，死亡 30 余人；风暴潮也是中国沿海城市的主要灾害之一，据历史记载，自 1949 年至 1984 年发生较大风暴灾害 58 次，几乎年年受害，仅 1989 年我国沿海热带气旋风暴潮灾害就达 8 次之多，直接经济损失 50 亿，受灾人口 1590 万人。所以，风暴潮的问题早已引起世界各国人民的关注。

现以长江三角洲及邻近地区(图9-1)为例，阐述中国沿海城市的风暴潮：

长江三角洲及邻近地区位于中国东南沿海，北起灌河口，南抵

表 9.1　风暴潮引起的最大增水高度

国　家	地　点	最大增水值(米)	时　间	天气系统
中　国	杭州湾	4.57	1959. 8. 2	台风
美　国	新英格兰地区	4.50	1954. 8.31	台风
孟加拉國	孟加拉湾	3.90	1970.11.12	台风
日　本	伊势湾	3.41	1959. 9.26	台风
中　國	莱州湾	3.55	1969. 4.23	寒潮
英国、荷兰	英国和荷兰沿海	3.00	1953. 1.31	寒潮

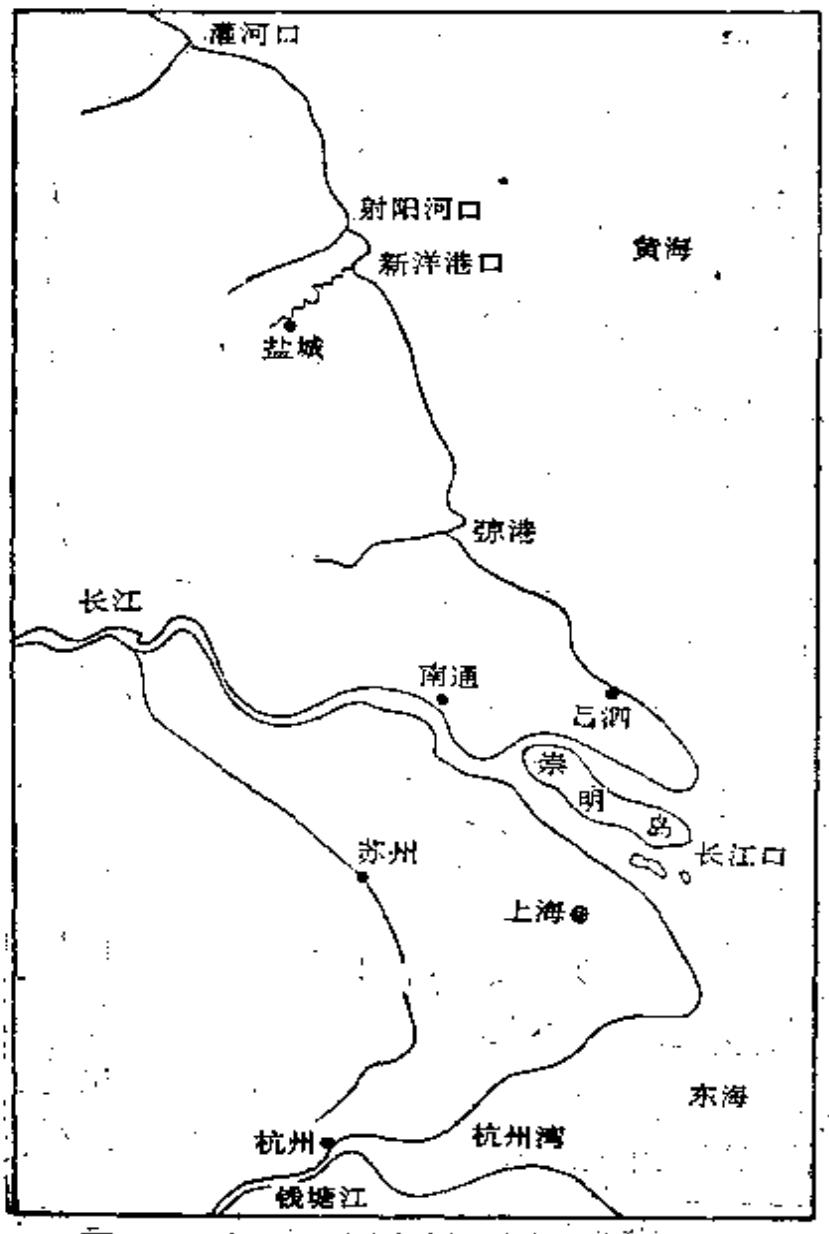


图 9-1　长江三角洲及邻近地区地理位置图

杭州湾，自然环境优越，物产资源丰富，是我国最重要的经济发达地区，人口高度密集，每平方公里面积达911人(3.7人/英亩)，地势低平，一旦遭风暴潮侵袭，成灾机率较高，沿海城市经济损失较大。以8114号强台风暴潮为例，浙江省沿海城市遭受巨大损失。海塘、江堤严重决口，倒塌房屋二万六千多间，损坏房屋一万二千多间，死亡42人，伤99人，总损失超过一亿元。上海地区63家工厂、企业进水，全部停产或部分停产，12处港区、铁路南站和何家湾车站积水受淹，227吨食糖和2400多吨粮食以及许多日用百货、布匹、土产、杂货和进口设备受潮。6处水塘和32处乡村围圩决口，七万亩农田受淹，170多万亩棉田部分小铃和花蕾被吹落，每亩减产20斤左右，蔬菜损失十五六万担，6790多户居民和农户家里进水，倒塌房屋七千多间，副业棚一万六千多间，吹倒树木六百多棵，死76人，伤43人，损失惨重。

本区风暴潮时间变化与热带气旋的活动有关。每年5～10月受太平洋西北部台风和南海台风的影响，其中最盛期为7～9月，占全年总数的90%以上(表9.2)，为较大风暴潮的多发期。

表 9.2　1949～1981年影响长江三角洲地区的台风统计表

项目 \ 数值 \ 月份	5	6	7	8	9	10	总数
次数	2	4	24	32	17	2	81
占总数的%	2	5	30	40	21	2	100
占总数的累积%	2	7	37	77	98	100	

热带风暴遭遇天文高潮，往往出现异常增水和高潮位。上海市黄浦公园站1949～1988年间，出现极大增水大于50厘米的风暴共39次①，长江口吴淞站1912年建站以来，大潮期间发生实测浮

①刘凤珍等"上海市热带气旋风暴潮综合分析"，上海水利(1)，1990年。

位高于5.0米的机率超过90%，形成大幅度的风暴增水可在1米以上，酿成灾害。如1949年7月24～25日，强台风影响长江口时，黄浦公园站潮位达4.77米，超过平均高潮位1.5米以上。

长江三角洲及邻近地区的热带气旋和台风，主要发源于菲律宾以东至威克-关岛以西的洋面上，据1884～1979年资料统计，本区受到较大台风影响共183次。其中仅4次来自南海，且强度较弱。风暴潮的空间分布特征，当热带气旋的移动路经及海区地形有关。据1949年以来的统计资料，本区沿海风力在8级以上的热带气旋路径一般有两种类型(图9-2，见第186页)。

(一) 北上型。沿长江口以东洋面北上。如8114号强台风产生于1981年8月27日14时至9月1日(农历初四)2时，台风在太平洋关岛形成后，向西北方向移动，当台风中心移到舟山群岛附近，时速减慢，以每小时7～8公里的速度并道北上，在上海海岸以东约110公里(60英里)的海面缓慢北移，近中心最大风力12级以上，大于8级风持续时间为21小时半，实际最低气压为986.7毫巴，风速达44米/秒(约48码/秒)，并逐渐转向东北，直到9月3日加速向对马海峡移去，进入日本海变为温带气旋。

(二) 登陆型。在1944～1988年间，直接在长江口登陆的热带气旋仅3次，产生了较大的增水，如7413号台风最大增水达1.52米，它生成于1974年8月20日(农历初三)，在浙江省三门附近登陆后，台风中心逐渐消失。台风期间，大于8级风持续时间8小时半，实测最低气压为993毫巴。

风暴潮与海区地形的关系密切，在河口港湾地区更为明显，如杭州湾呈喇叭口形，增水自湾口至湾顶逐步增加；而长江口最大增水区则一般发生在拦门沙附近。

§9.2 风暴潮的特征

沿海潮汐运动和强风是引起风暴潮作用的主要因素。如长江

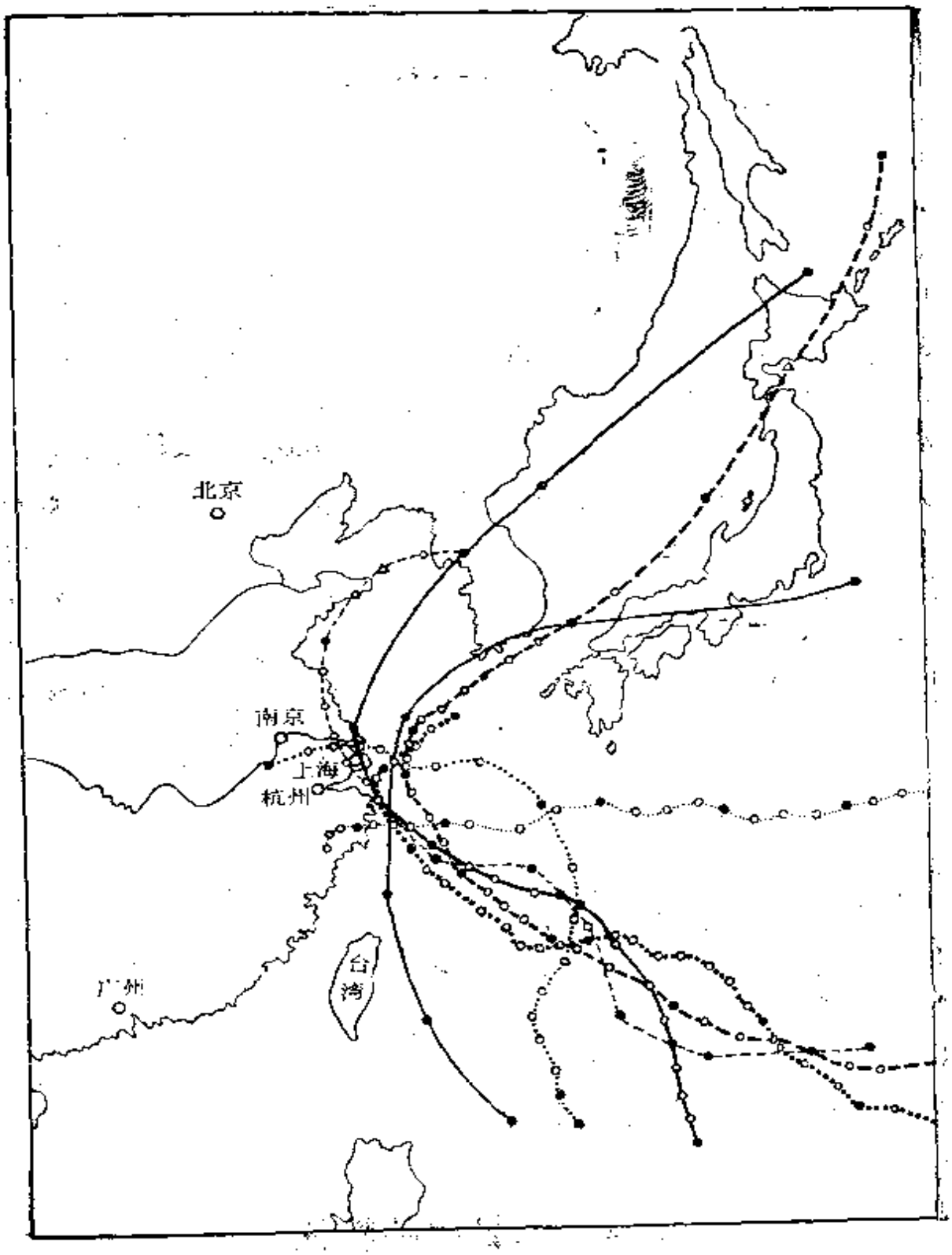


图 9-2　影响长江三角洲及邻近地区强台风路径图

三角洲沿岸受到东海潮汐和热带风暴的影响，具有明显的感潮性质，并出现台风暴潮现象。长江口的潮汐主要由太平洋传来的潮波所引起，属非正规浅海半日潮型，一个太阳日内各有两次高潮和低潮，两次高潮的潮高不等，潮差不等，涨潮时和落潮时也不相等，涨潮历时约4～6小时，落潮历时约6～8小时，自河口向里涨潮历时逐渐缩短，落潮历时延长。据1912～1981年观测资料，吴淞站多年平均涨潮历时为4小时33分，落潮历时为7小时52分，一个全潮周期为12小时25分。

长江、钱塘江河口潮历时沿程变化明显，涨潮历时一般河口向上不断缩短，落潮历时则逐渐增加，致使涨落潮历时差向上游明显增大(表9.3)。如长江的横沙站，涨落潮历时差为2小时03分，向上至镇江站加大至5小时50分；钱塘江口绿华山站涨落潮历时差仅23分，向上至闸口则增加到8小时52分。

表 9.3　长江、钱塘江潮历时沿程变化表

河名	站名	涨潮历时		落潮历时		涨落潮历时差	
		小时	分	小时	分	小时	分
长江	横沙	5	11	7	14	2	03
	天生港	4	12	8	14	4	02
	镇江	3	24	9	14	5	50
钱塘江	绿华山	6	01	6	24	0	23
	海宁	2	02	10	23	8	21
	闸口	1	46	10	38	8	52

河口潮波在运动过程中，受到地球自转偏向力、近岸海底地形和岸线轮廓等影响，致使潮汐特征在各地有所差异。如长江口沿岸平均潮差2.4～2.5米。杭州湾口门水面宽100公里，湾外绿华山平均潮差2.53米，由湾口上溯江面迅速缩窄，至澉浦仅20公里宽，潮差急剧增大，澉浦站可达5米以上，实测最大潮差为8.93米。

可能最大潮差可达 9.8 米，为我国之冠。加之，澉浦以西，河口沙坝升高，水深突然变浅为 2.3 米，使潮江而上的潮波急剧变形，至尖山附近就出现涌潮，气势雄伟，闻名于世。

长江河口的潮差，潮位具有自河口向上沿程减弱的特点：河口横沙站平均潮差为 260 米，江阴降至 1.64 米。上海市的黄浦江口吴淞站平均潮差为 2.27 米，历年最高潮位 5.74 米，多年平均高潮位 3.21 米，至上游米市渡站平均潮差仅 0.99 米，历年最高潮位 3.80米，多年平均潮位 2.70 米(表9.4)。

本区沿岸平均高潮间隙，由北向南变化较为均匀、缓慢。一般

表 9.4 长江口高桥站和黄浦江主要测站潮位和潮差表(单位：米)

项目 \ 站名	高桥	吴淞	黄浦公园	米市渡	淀峰
平均潮差	2.34	2.27	1.83	0.99	0.68(泖田)
历年最高潮位	5.04	5.74	5.22	3.80	3.71
多年平均高潮位	3.25	3.21	3.11	2.70	3.05
历年最低潮位	−0.43	−0.25	0.24	0.64	1.75
多年平均低潮位	0.91	0.96	1.27	1.71	2.02

在月中天后 9～12 小时之间发生高潮，但在长江口和杭州湾口附近，平均高潮间隙变化较为复杂，一般由河口向上游递增。长江口横沙站平均高低潮间隙分别为 36 分和 6 小时 38 分，上溯至镇江，分别增加为 3 小时 02 分和 17 小时04分；杭州湾乍浦站平均高、低潮间隙分别为 39 分和 7 小时 48 分，上溯至闸口站分别增加为 5 小时 02 分和 15 小时 33 分(表9.5)。

根据验潮站实测水位资料，长江三角洲沿岸平均水位具有明显的季节变化规律，一般最大值出现在 9 月份，最小值出现在 1 月份，年变幅高桥站为0.53米。区内最高水位皆在 2.50 米以上，最低水位为 −0.25 米至 −0.43 米，沿岸月平均最高水位出现的时间具有由北向南推迟的规律，其年变幅较黄、渤海小，而较南海大。月平

均水位的季节变化与河川径流、台风以及潮汐的季节变化是紧密相关的。

表 9.5 长江、钱塘江高、低潮间隙和潮差沿程变化表

河名	项目 / 测站	平均高潮间隙 小时	平均高潮间隙 分	平均低潮间隙 小时	平均低潮间隙 分	潮差(米)
长江	横沙	0	36	6	38	2.60
	吴淞	—	—	—	—	2.27
	天生港	3	41	11	55	1.91
	镇江	3	02	17	04	—
钱塘江	绿华山	—	—	—	—	2.53
	乍浦	0	39	7	48	4.55
	海宁	2	21	13	11	2.38
	闸口	5	02	15	33	0.36

§9.3 风暴潮的作用过程

引起和影响风暴潮的因素复杂，浅水海域风暴潮主要受风应力与低气压相关联的"共振"所制约。风暴潮的运行规律，可以用流体力学的方程组进行描述，实质上它是一种非线性的湍流现象。台风暴潮是一种由于台风引起气压下降，以及强烈风场变化而产生的水面异常增升现象。当外海或开阔洋面上形成了台风，处于低气压处的海面就会隆起，海面水体的升高和气压的降低形成静压效应，从而达到平衡。与此同时，风暴中心周围的强风将以湍流切应力作用，引起海水呈气旋式环流，它在地球自转偏向力场的作用下，造成北半球表面海水呈逆时针方向的回转流。当风暴稳定、海水密度均匀时，则这种运动能达到海洋深层。若风暴移运速度远小于长波的速度，风暴过去很长时间还会留下风暴潮的痕迹。

大气低压及其伴生的深层流辐聚，使海面形成异常隆起，好似

一个孤立的随风暴而移运的强迫前进波，当它传播到大陆架浅水域或进入近滨岸带、海湾或河口时，因水深变浅、地形平缓，风暴潮能急剧集中而得以发展，可能出现大幅度的风暴增水现象。在大陆架或浅海地区风暴潮的增水过程，大致可分为三个阶段(图9-3)。

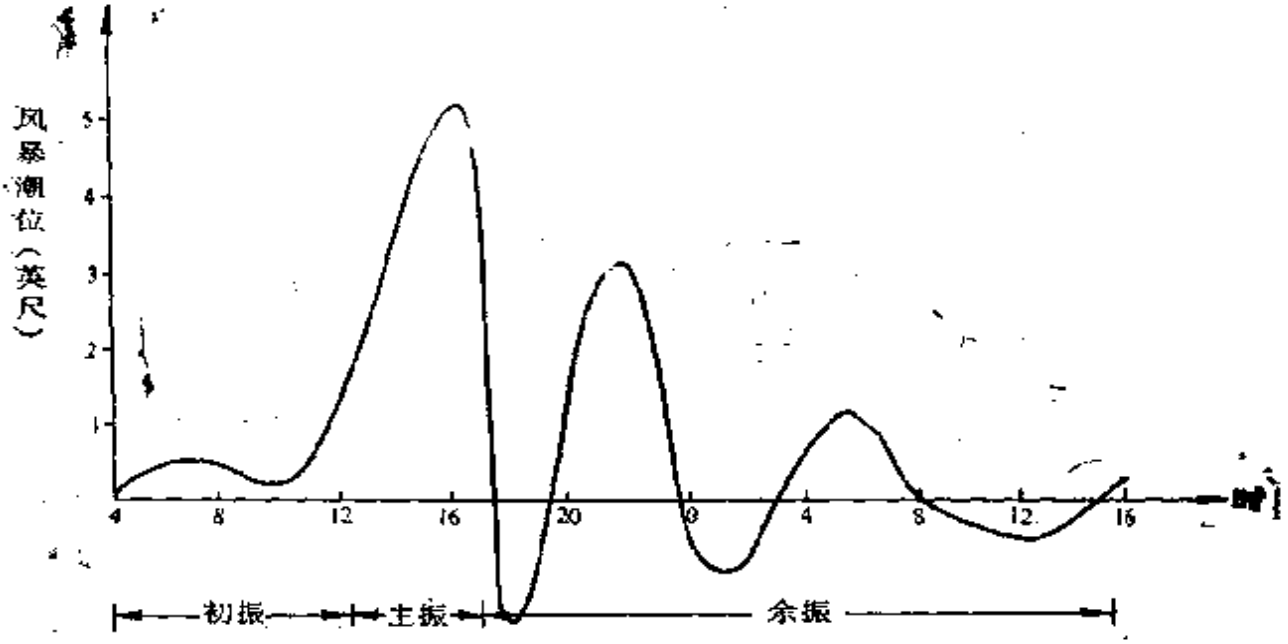


图 9-3　大西洋城1944年9月14日～15日风暴潮过程线

（一）初振阶段：大洋上台风已生成，但还未到达海岸时，验潮曲线已能看出潮位受到相当的影响，有时达到20～30厘米的缓慢移动。这是风暴潮来临前的"先兆波"，此时海面微微上升或缓缓下降。

（二）主振阶段：风暴已逼近或过境时，将产生急剧的增水现象，这是主振阶段，时间约数小时。

（三）余振阶段：当风暴过境，主振阶段过后，海面上还会存留一系列的自由波或固有振动。在余振阶段，陆架上往往会出现一种特殊的"边缘波"或"假潮"。

以8114号台风为例，它是建国以来影响本区最大的一次强台风，形成于1981年8月27日14时太平洋关岛西北约200公里处，当时中心气压为995毫巴，中心最大风速为44米/秒，以20公里/小时的速度向西北移运。至9月1日2时，台风移至舟山群岛附

近，7 级大风圈半径达 680 公里，8级以上强风长达 12 小时，最大风力上海市区达 10 级，沿海一带在 11～12 级以上，杭州湾北部芦潮港站最大风速为 37 米/秒，致使本区沿海地带和 23 个潮位站出现历史最高潮位，吕泗、吴淞、宁波和镇海等测站最大增水值皆超过 1.50 米，其中吕泗最大增水高达 2.14 米。此外，潮水涨速也快。上海高桥站 8 月 31 日 21 时潮位 1.58 米，9 月 1 日涨至 5.63 米，4小时内潮位净增 4.05 米，涨率为1.01 米/小时，在 1 时08 分出现建站以来最高潮位 5.64 米，接近百年一遇的潮位 5.66 米。当时黄浦江沿岸的吴淞站、黄浦公园站、吴泾站和闸港站的潮位均超过历史记录，分别达 5.74 米、5.22 米、4.27 米和 4.24 米(表9.6)。

表 9.6　上海黄浦江实测最高潮位沿程分布表

站　名	吴　淞	黄浦公园	吴　泾	闸　港
距河口(公里)	1.00	25.40	47.38	54.67
历史最高潮位(米) 出现时间	5.72 1933. 9.18	4.98 1974.8.20.	4.11 1974.8.20.	3.89 1962. 8.2.
"8114"实测最高潮位(米) 出现时间	5.74 1981. 9.1.	5.22 1981. 9.1.	4.27 1981. 9.1.	4.24 1981. 9.2.

根据 8114 号强台风本地区测站的增水和增水过程线(图 9-4)，风暴潮水动力具有以下特征：

（一）各测站的台风暴潮增水过程相似。具备初振、主振和余振三个阶段，相应出现潮位的低、高、低过程。风暴潮尚未到来时，本区潮位已受影响，海面产生缓慢上升或下降的"先兆波"，振幅可达 20～30 厘米，到主振阶段，潮位急剧上升，产生增水现象，但高潮位持续时间短，4 米以上的潮位维持 6 小时左右，风暴主振过后，出现一系列海面波动余振。这与大西洋等地风暴潮存在着相似的增水过程，反映了风暴潮作用特征的普遍性。

（二）风暴高潮位和增水现象明显。长江口站增水普遍大于杭州湾，吕泗的增水值要高于宁波站 50～60 厘米，这与长江三角洲

地区大陆架更为广阔，对风暴潮成长更为有利有关，所以长江口是风暴潮多发区。

（三）潮周期振动现象明显。增水较多的潮位站，如吕泗、黄浦公园、吴淞站等的增水曲线皆有半日周期的特征，这与东海区以半日潮为主基本上是一致的。

（四）风暴潮最大增水时刻与各测站高潮时刻相近，在强风暴时，长江口各测站往往出现相应的历史最高潮位。在沿程分布上，本区风暴增水有两个高潮区：一个在吴淞与高桥之间，另一个在栏门沙周围的中浚站附近，再向北转为递减；向西到石洞口以上增水明显缓慢。

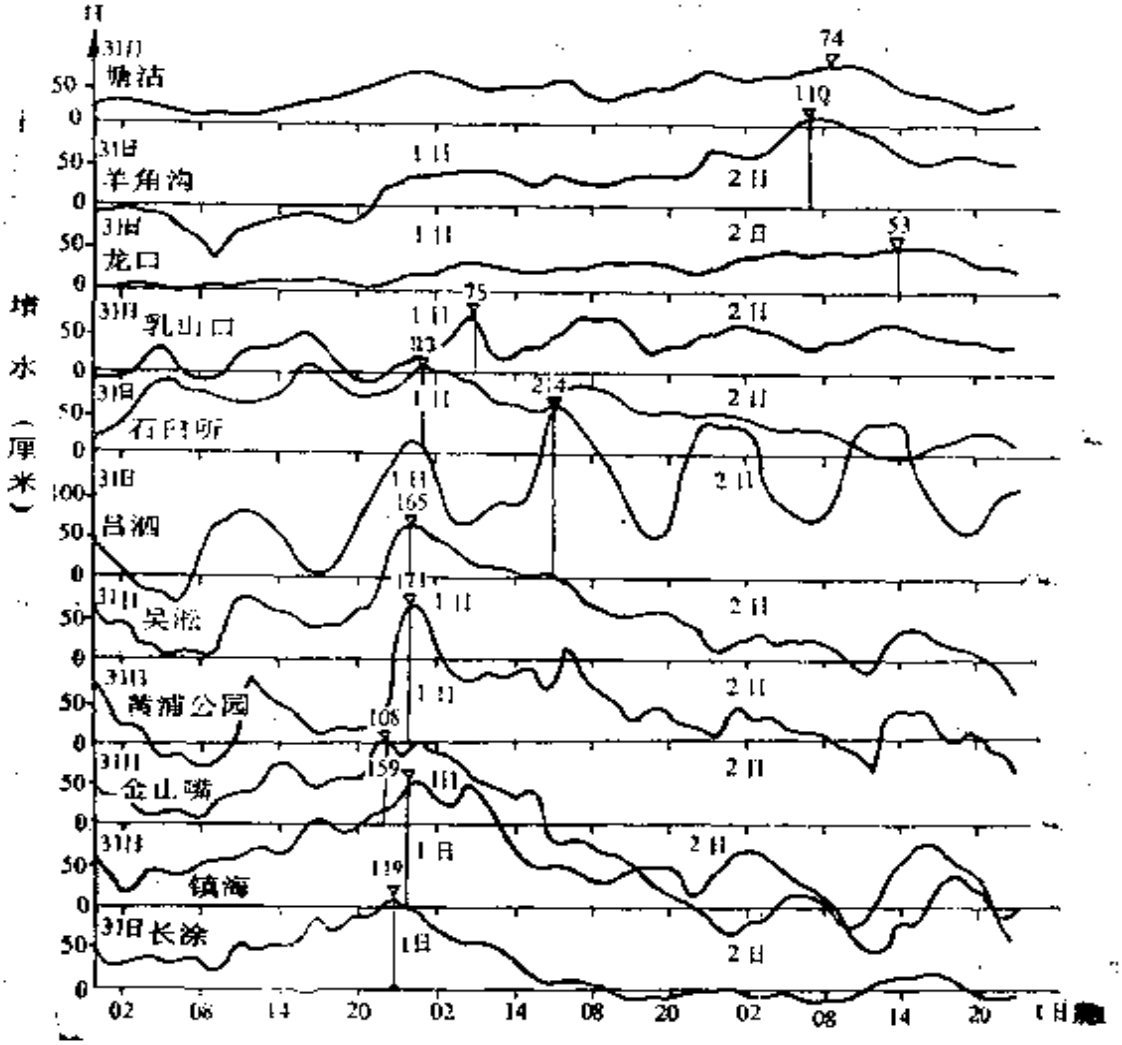


图 9-4　长江三角洲及邻近地区主要测站 8114 号台风期间增水过程线图

应当指出，若风暴潮移运速度接近当地的长波波速时，则会发生共振现象，出现异常高潮位，波峰面陡峭似涌潮。

§9.4 风暴潮可能最高潮位预测

目前，风暴潮的预测方法可以归为两大类。

（一）经验统计法。以实测资料为基础，进行统计和分析，建立回归方程式和经验关系式。如多元回归预报、多站连续辗转回归预报、经验趋势外推法、经验对比相似法等。其主要手段是回归分析和统计相关，根据历史资料建立气象扰动（如风、气压等）和特定地点风暴潮位之间的经验关系，方法简单方便，但必须依赖预报站长期的验潮资料、增水资料和相应的气象资料，否则就不能建立稳定的经验关系，并容易遗漏罕见的特大风暴潮，影响预报的精度。当前，经验预报方法在世界各国延用不衰，中国一般沿海水文站和海洋台站都备有当地风暴潮预测的经验-统计预报方案。

（二）动力数值计算法。简称数值预报，其实质是"数值天气预报"和"风暴潮数值计算"相结合的一种预测方法。数值天气预报给出风暴潮计算所需要的海上风场和气压场；风暴潮数值计算就是在给定的海上风场和气压场一定的初始条件和边界条件下，进行数值求解风暴潮的基本方法。这方法不受历史条件的限制，也不为统计特性所制约，可作出"场"而不是"单站"的预测，并可推断尚未出现过的特大风暴潮位。因此，动力数值预测是风暴潮预报的方向，它能导出一些有关的动力机制和特征，为进一步建立新的理论模型和改进预测方法提供信息，所以数值预报正越益受到人们的重视。近十余年来已由数值模拟阶段逐步走向数值预报阶段，并进入预报业务。但数值预报也有其本身的困难，如湍粘系数、底摩擦系数等的确定常带有颇大的任意性，以及它对于天气预报精度的依赖性等问题都有待于进一步完善和解决。中国上海台风研究所和上海市水文总站合作研究和建立了包含风暴潮的天文潮非

线性相互作用在内的综合潮位的数值预报方案，并已投入业务试用，福建省水文总站和厦门大学也合作建立了一个用于感潮阶段中天文潮、洪水和风暴潮的综合水位的数值模型。

本区可能最高潮位预测，目前常采用下列方法推算。

（一）极值形成因子组合法。根据风速极大值、不利风向和最大气压下降值等直接影响增水的因素组合，建立回归方程式，以求出可能的最高潮位。方程式形式如下所示：

$$y=B_0-B_1V^2\cos(180^\circ+\alpha-D)+B_2\Delta p+\delta_y①,$$

式中，y 为过程高潮位时台风增水值，V 为风速极大值，α 为不利风向角，D 为不利主风向，Δp 为 Δt 时段内最大气压下降值，B_i 为回归系数，δ_y 为标准差。

（以上数据都选自本区历史上曾出现过的台风暴潮）

（二）台风位移法。将同一天气、气候区域中，海洋上出现过的特大台风移置于最有利于本地区增水的某一位置，以此来估算可能最大增水。据历史资料分析，对本区威胁最大的台风位置应在朝鲜半岛西南端到上海南部和杭州湾一带的洋面上。

本区曾以"6123"号强台风西移 10 个纬度区为例，选用下列因子组成增水方程① 进行推算：

1. 地转风的动能因子 X：

$$X=-V_g^2\cos(180^\circ+\alpha-DI-F),$$

式中，V_g 为地转风，α 为地转风向角，F 为主风向方向角（选用45°），DI 为摩擦角，优选结果 $DI=40^\circ$，V_g 为取 $5.4\Delta P/\Delta n\sin\Phi$，$\Delta P$ 为上海与台风中心气压差，Δn 为上海与台风中心距离，Φ 为上海与台风中心纬度平均值。

2. 台风移速 V_T：

$$V_T=\sqrt{(x_{24}-x_0)^2+(y_{24}-y_2)^2},$$

式中，x_0、y_0 和 x_{24}、y_{24} 分别为最高潮位与最高潮位前 24 小时的

① 范钟秀等论文，"上海港可能最大台风暴潮估计"。

纬距(x为东经、y为北纬)。

3. 过程最高潮位时上海的气压:P。

运用回归分析得增水方程为:

$$y=409.39\times0.0014V_g^2\times\cos(180^\circ+\alpha-40^\circ-45^\circ)+3.506V_T-0.368P$$

根据上述计算结果表明,本区风暴潮的最高可能潮位达7米左右,超出该区千年一遇6.68米的高潮位。这将为本地区城市的规划和建设、水利工程的设置和管理,以及防洪设计标准的确定等提供较可靠的依据。

第十章　城市地面沉降

天然流域在长期的地质侵蚀过程中，会出现极其缓慢地沉降过程。但在近代，人类大规模地开发过程引发了区域性的地面沉降，由此带来码头、防浪堤、桥梁、机场、铁路的毁坏，工厂、商店、居民区的受淹受损。而要防止这些损失的发生，需投入巨额的资金，这对于社会的发展和人民生活水平的提高将造成极大阻碍。

§10.1　城市化与地面沉降

在§5.2中，曾讨论了城市化现象使大量的透水地面变为不透水地面，由此减少了降水入渗，使地下潜水发生缺失。

而高层建筑的大量出现、城市交通的日益繁忙、地下流体的集中开采以及地下取土、深井出砂、人工填土、河流疏浚等城市化活动都与地面沉降有着密切的关系。

上海是中国最大的城市，1910～1919年间经重复水准测量，地面高程变化仅 3.9 毫米。

1921～1948年近三十年中，市区却产生了日趋明显的沉降现象，市区地面沉降年平均 24 毫米，最严重的区域累计沉降达1136毫米；沉降 500 毫米的面积达 19.3 平方公里。

1949～1956年间，市区地面沉降年平均 40 毫米，沉降 500 毫米面积为 7.4 平方公里，已超过前期的沉降扩展速度。

1957～1961年间，市区年平均沉降 110 毫米，最严重的区域累计沉降达 1149 毫米，沉降 500 毫米面积达 66.1 平方公里。而近郊工业区的发展，也产生明显的沉降，最大沉降量达 1321 毫米。

1962～1965年间，由于采取了限制和压缩地下水开采量的措

施，地面沉降逐年得到缓和，到1965年市区地面年平均沉降量只有22毫米。在四年中沉降500毫米的地区已不复存在。

1966～1971年，市区地面由缓和沉降转入微量回升，在六年中，市区地面平均回弹量为3.2毫米，回弹面积119.7平方公里，沉降面积8.3平方公里。

1972～1977年，市区地面由微量回升又转入微量沉降，市区地面年平均沉降量为3.6毫米，沉降20毫米面积达50.9平方公里。这一沉降率差不多维持到1984年。

1984～1937年年平均沉降量达到6.2毫米，地面趋向加速下沉。尽管同期地下水的回灌量比开采量大一倍多，地下水回灌的作用逐渐减小。

而在中国其他的城市化地区，如东南沿海的城市，天津、南通，苏州、无锡、嘉兴、杭州、宁波、温州等等都发生了地面沉降。

在世界各地的城市化区域也有地面沉降的现象发生。在日本东京，1898年就已经发现有地面沉降现象。到1926年，局部地区最大沉降速率达每年200毫米。在日本的其他地方也有类似的情况发生，如琦玉县、川崎、横滨、大阪、新潟、名古屋等等。

在美国各地的地面沉降中，以加利福尼亚州为最多，有十处以上。

墨西哥的墨西哥市1936年以后才注意到地面沉降，从1890年到1930年共沉降2.0米，年均沉降50毫米。而到1950年沉降了6米，即1930年到1950年的年平均沉降200毫米。

其他如委内瑞拉的马拉开波湖地区，意大利巴诺那三角洲地带的康塔利那东南2～3公里和波河下游，泰国的曼谷以及英国伦敦等处，亦都有地面沉降现象(见表10.1)。

根据各国学者的研究，认为地面沉降表现在以下几方面：

1. 高层建筑物高出地面。高层建筑物由于静荷载产生的沉降速率随时间的推移而减缓；当地面沉降的速率大于高层建筑的沉降速率时，高层建筑相对上升。墨西哥市的艺术宫每年上升60毫

米。

2. 深井管上升，使原来的混凝土泵座高出地面。这种情况对开采地下水和石油、天然气造成困难。

3. 桥下净空减小，航行困难，尤其是近海城市受害更重。

4. 桥梁附近发生显著裂痕，损坏桥基。

5. 下水道排水功能变坏，坡度改变，必须重建，或增设泵站或加大水泵能力。

表 10.1 世界各地地面沉降的主要区域一览表

地点		最大总沉降量	最大沉降速率	沉降面积	发生沉降的主要时间	采取措施后的沉降速率	备注
日本	东京	3000～4000	195	290	1948～1965	停止抽汲地下水 0	二战后工业活动期
	大阪	2100	163		1935～1960		
	新潟	1170	530	2070	1957～1961	回灌地下水20	最大总沉降量与最大沉降速率不是同一点
	名古屋	>700			1934～1948		
美国	加州朗比奇	8840	711	50	1926～1968	加压回灌 0	
	加州圣卓阿金流域的三个地区	8000	350	9000	1935～1966		
	加州圣克拉拉	4000	>100	600	1920～1967	停止抽水四年 0	
	亚利桑那州中部内华达州	2300			1952～1967		
	拉斯韦加斯	1000		500	1935～1963		
墨西哥	墨西哥市	8000	420	7560	1935～1968	20	
意大利	波河三角洲	10250		510	1953～1960		
中国	上海	2630	>200	>100	1949～1965	回灌 0～20	
	台湾	2260		>100	～1989		
	宁波	300	44		1985～1987	控制地下水开采量 10	
	苏州、无锡、常州	>1000	>50		1985～1989		

沉降量：毫米 沉降速率：毫米/年 沉降面积：平方公里

6. 河道水体等水面明显地接近地面。尤其是上海、曼谷等冲

积平原上的城市更是如此，由于地面下沉，导致海平面和河道水面与地表面非常接近，极易受到风暴潮，洪涝积水的危害。

7．海水逆流，进入河流和冲积平原内部，使地表水的使用和农业生产大受影响，也能使堤防设施功能失效。

8．从埋入土层内的分层观测标点内测出地层在收缩。

综上所述，虽然并非所有的地面沉降都发生在城市化地区，但人口密集的城市所具有的充满活力的社会生活和社会建设，产生了很多影响地面沉降的因素，这些因素导致了绝大部分的地面沉降。

§10.2 影响地面沉降的因素

影响地面沉降的因素大约有十多种，综合国内外的观点，概括起来叙述如下。

1．地球普遍转暖，极地冰块融解，引起海平面的上升。几乎所有近海的地面沉降区域，都发现潮水逐年上涨的现象。但是根据全世界的验潮记录，这样大范围的海水上升，每年的上升速率不会超过3毫米。

2．沿海地区的构造运动导致了大面积沉降。通过对中国长江三角洲平原区新构造运动现象的研究，可以估算出相应的年平均沉降率在0.38毫米左右。

3．高大建筑物静荷载使土层压密而造成地面沉降。根据墨西哥市的研究，认为建筑物静荷载并不仅仅以建筑物的施工期间为限，而随着建筑物的存在也赋予地层一定的压力。但建筑物产生的沉降量是在一个递减的沉降速率情况下发展的。而上海的研究结果有所不同，高大建筑物在建成30～40年以后，其沉降量仍很大，但却小于低层建筑物，也小于周围地面的沉降量；另外，高大建筑物集中地区，也不是沉降严重地区。上海的研究表明，高大建筑物静荷载不是地面沉降的主导因素；但由于受大范围地面沉降的

影响，其沉降量并未稳定。

4. 城市交通频繁，干道分布密集，由于车辆终日不断行驶振动，可能引起路面下伏土层的压缩。这种动荷载可能引起地面沉降，但据上海的研究，动荷载极少的广场与主要街道的沉降率变化是一致的；而从垂直主要干道和铁路的沉降剖面中可以看出，铁路、干道附近的沉降量小于远离铁路、干道的沉降量；在一些主要街道，交通流量大的沉降量则较小；从平面上看，交通流量大的地区是沉降较小的地区。由此得出结论，道路及其上的动荷载对地面沉降的影响仅限于表土层，数量也较微小，不是大规模地面急剧沉降的主要原因。

5. 美国加州朗比奇市由于抽汲石油而导致地面沉降，在1950～1951年间沉降了730毫米，1953～1954年沉降了400毫米，但在1955年1月25日，由于该区发生地震，沉降又增加为515毫米/年，有75口以上的油井被毁，后来到1957～1958年沉降速率又降为307毫米/年。

6. 农田疏干、土壤收缩而造成地面沉降。美国加州圣克拉门托—圣卓阿金三角洲泥炭层因疏干而下沉，这些沉降的直接原因可能是：(1)由于地下水位下降，氧化作用使得土壤发生变化；(2)耕作时的机械压密；(3)干缩、晒干及风干。

7. 地壳变动，据新潟市的研究，由于第三纪地层发生褶皱、倾斜和断层等变化，有可能引起地面沉降。

8. 疏浚河道。上海疏浚黄浦江，新潟疏浚航道，浚深到受压含水层，从而导致含水层内地下水和泥砂流失。

9. 最重要的一个因素，也是各国学者较一致的看法。由于开采地下的水溶性天然气、石油或地下水而造成地面沉降。

日本新潟的地面沉降量随着水溶性天然气开采量的增加而激增；在开采天然气的地层中水位降落；天然气开采量大的地层，其上面的地层压缩量也大；在减少水溶性天然气开采量40%以后，地下水位回升了15米，平均的地面沉降量与最高时相比，也减少了

40%。虽然还有一些事实表明，有些沉降现象与天然气的开采关系不密切，但新濑地面沉降的主要因素还是被认为是水溶性天然气的开采。

美国加州朗比奇的威明顿油田是美国第二大油田，1936年开始大量开采，从1926至1968年之间最大的总沉降量大约为8840毫米，而1952年最大沉降速率为每年711毫米，沉降面积达50平方公里，沉降体积约52亿立方米。伴随着垂直地面沉降而发生的水平位移对许多地面和地下构筑物造成了巨大的损失，修理费用超过一亿美元。从1958年开始实施一个大规模的加压回灌计划到1968年，沉降面积由50平方公里减少为8平方公里，大部分地区已控制了沉降。并提高了石油的生产量。

上海在深井数量、地下水位变化，开采水量的历史发展与地面沉降的相关性，地下水降落漏斗与地面蝶形沉降的相关性，水位、水量的季节变化与地面沉降的相关性，分层标观测资料与其附近水位资料对比，主要沉降地层与地下水开采层次的相关性等方面的研究表明，上海的地面沉降主要由过量汲取地下水而产生的。

§10.3 地面沉降的防治对策

地面沉降与开采地下的水溶性天然气、石油或地下水关系密切，一般工业区域都是地下水为主。其防治对策又受到当地的经济、工程和法律等方面的制约，最容易提出的方法，往往是最难以实施的对策。

1. 停止汲取地下水，日本东京的工业区大量抽汲地下水而导致地面沉降，但在二战后期，由于空袭造成工业区瘫痪，相应停止了地下水的抽汲，地面沉降也停止了。墨西哥市和大阪对停止抽汲地下水作了很大的努力，使沉降得到了很好的控制。

2. 限制地下水的开采量。严格停止向地下取水几乎是不可能的，但从区域沉降控制的角度出发，减少取水井数量，控制水井

深度和水管直径是一种较好的方法。中国宁波根据研究，确定市区 6～9 月地下水高峰用水期月安全开采量为 100 万吨，市区年安全开采量为 600 万吨，地下水水位应控制在 −25 米以内。这一方案的实施产生明显的效果，1985年市区地下水开采量为 890 万吨，沉降中心地面下沉 25～30 毫米；1986年地下水开采量减为 681 万吨，地面下沉 15～20 毫米；1987年地下水开采量又减少到 624 万吨，地面沉降了约 10 毫米。

3. 调整开采层次，变集中开采为分散开采。地下水各层次的补给由广大流域的下渗来完成，故各层次均有一定的补给数量，若将开采数量分散到各个层次，有助于地下水的天然补给；若将开采数量在区域上分散，有助于减小地下水漏斗的深度。后者更为重要，因为保持较高的地下水位将使该水位以下，常年浸润在水中的土层不致于发生压缩，从而减少地面沉降。

4. 回灌地下水。在较大的区域上回灌地下水有助于保持地下水位。但是，夏采冬灌造成有些深度上在一年之中一部分时间有水浸润，一部分时间无水受到压缩。经多年反复后，地面将维持一种低速沉降的状况。上海近年面临的正是这种状况。

综上所述，只有地下水的抽取量小于年地下水补给量，且在季节分配上，抽取高峰月份不使地下水水位下降太多。这种抽取地下水的对策能够较好地控制地面下沉。

对于上海这种高出海平面不多的城市而言，借大搞地下、地面基础建设的好机会，重新布置排水管道，垫高各种新建住宅、办公楼等各类建筑物的地基，加高防洪墙等等地面建设对策的实施等，这些也将对控制地面沉降有一定的帮助。