



通用流域负荷模型 (GWLF 模型)

理论方法与应用案例

TONGYONG LIUYU FUHE MOXING

(GWLF MOXING) LILUN FANGFA YU YINGYONG ANLI

王玉秋 沙 健 谢阳村 刘 敏 / 主编

中国环境出版社

通用流域负荷模型 (GWLF 模型) 理论方法与应用案例

王玉秋 沙 健 谢阳村 刘 敏 主编

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

通用流域负荷模型 (GWLF 模型) 理论方法与应用案例/
王玉秋等主编. —北京: 中国环境出版社, 2013.8
ISBN 978-7-5111-1501-0

I. ①通… II. ①王… III. ①流域模型—负荷模型
IV. ①P344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 142390 号

出 版 人 王新程
责任编辑 黄晓燕 李兰兰
文字编辑 张 娣
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (环评与监察图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 12.5
字 数 290 千字
定 价 48.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

本书编写委员会

主 编 王玉秋 沙 健 谢阳村 刘 敏

编 委 陆宇超 赵 罡 谢汝芹 李 川 王 东

赵 越 徐 敏 陈 岩 姚瑞华 马乐宽

赵康平 孙运海 杨文杰 赵琰鑫 路 瑞

前 言

水是人类赖以生存和发展的基本条件，水环境质量的优劣关系着人类的健康状况和生命安全。随着社会经济的发展，人类与水环境之间的矛盾日益突出，水问题已经成为关系人类社会持续发展的重要战略问题。目前，基于水资源开发和水环境管理的模型在水资源开发利用、水库、防洪减灾以及非点源污染解析等诸多方面得到了广泛应用。

通用流域负荷模型（GWLF）是一个中尺度（单次模拟 1 万 km^2 以下）、适于中小流域的负荷模型，属于半分布式（机理性）半经验（集总参数式）模型。GWLF 模型自诞生以来已经在不同平台下进行了开发，并基于某些实际情况进行了修正。目前该模型的不同版本已经广泛应用到流域的径流产出、营养盐负荷模拟与预测以及非点源污染解析等诸多方面。

GWLF 模型在国际上有较完善的理论方法与实践验证，模型复杂度适中，其结果精度尺度能够满足我国的环境管理需要，数据需求量与我国数据可获取量匹配，可操作性强，能够在实践层面上实现科学客观性与管理有效性的结合，推进流域的模型化与数字化管理，为中小流域水环境综合治理与保护提供方法指导。

本书介绍了 GWLF 模型及基于其开发的 ReNuMa 模型的框架结构、核心算法以及模型建立与运行等方面的内容，并附有翔实案例。全书分为 4 章。第 1 章主要对 GWLF 模型进行数学描述，并进行了模型数据来源及参数估计的介绍；第 2 章主要介绍 ReNuMa 模型算法以及模型的获取、输入及运行；第 3 章介绍了模型在美国德拉瓦河西布兰奇流域、中国于桥水库流域及新安江流域的应用，具体说明了模型操作过程；第 4 章主要介绍了模型的中国化以及基于 GWLF 模型的中小流域水管理流程并总结了模型在中国应用的可行性；附录中提供了模型软件故障排除方法以及案例研究所需数据和结果输出表。

由于编者水平有限，书中难免有错漏之处，欢迎各位专家和读者批评指正。

编 者

2012 年 8 月

目 录

1	GWLF 模型原理与方法	1
1.1	模型概述	1
1.2	模型架构（模型的数学描述）	3
1.2.1	农村径流负荷	3
1.2.2	城市径流（固态）	6
1.2.3	地下水水源	8
1.2.4	腐生排水系统	9
1.3	数据来源与参数估计	11
1.3.1	土地利用数据	11
1.3.2	气象数据	12
1.3.3	传输参数	12
1.3.4	营养盐参数	23
2	ReNuMa 模型原理与方法	28
2.1	绪论	28
2.1.1	概述	28
2.1.2	新特性	30
2.1.3	系统需求	31
2.2	模型总论	31
2.2.1	综述	31
2.2.2	氮排放量计算	33
2.2.3	大气氮沉降	33
2.2.4	地表径流氮通量	34
2.2.5	地下水氮通量	37
2.2.6	反硝化作用损失	37
2.3	模型启动	39
2.3.1	获取 ReNuMa 模型	39
2.3.2	创建数据文件夹	39
2.3.3	设置安全性选项	39
2.3.4	安装规划求解宏	40
2.3.5	打开模型	41

2.4	用户界面概述.....	43
2.4.1	菜单项	43
2.4.2	工作表	45
2.5	模型输入	46
2.5.1	设置模拟属性选项	46
2.5.2	定义传输参数	50
2.5.3	定义营养盐参数	52
2.5.4	提供气象数据	56
2.6	运行 ReNuMa 模型	58
2.6.1	运行标准模拟	58
2.6.2	查看输出的模拟结果	58
2.7	特殊功能与模型特色	63
2.7.1	运行校准	64
2.7.2	运行不确定分析	67
2.7.3	运行灵敏性分析	70
2.8	功能与帮助	74
2.8.1	“工具”下拉菜单	74
2.8.2	“打印”下拉菜单	77
2.8.3	“帮助”下拉菜单	78
2.9	VBA 程序实现.....	79
2.10	ReNuMa 2.0 模型更新	80
2.10.1	提出多个农业用地	82
2.10.2	月氮沉降的详细说明	83
2.10.3	年土地利用面积的说明	84
2.10.4	输出结果的改变	85
2.10.5	校准功能的变化	87
2.10.6	使用地形指数作为输入	87
2.10.7	贝叶斯参数估计	92
3	GWLF 模型应用实例.....	97
3.1	德拉瓦河西布兰奇流域	97
3.1.1	案例研究	97
3.1.2	验证研究数据和输出表	104
3.2	美国 16 个流域的溶解性氮模拟	104
3.2.1	研究点位	104
3.2.2	参数估计	105
3.2.3	获取气象数据	113
3.2.4	批处理设置	115
3.2.5	数据比较	116

3.3	于桥水库	120
3.3.1	于桥水库流域基本特征	121
3.3.2	流域水环境问题评估	125
3.3.3	于桥水库营养盐负荷来源解析	125
3.3.4	于桥水库负荷输入与库区水质动态响应关系构建	132
3.3.5	于桥水库库周流域治理工程措施及其环境效益评估	135
3.3.6	天津市饮用水水源地管理实践方案设计	137
3.4	新安江流域	151
3.4.1	新安江流域基本特征	151
3.4.2	流域水环境问题评估	152
3.4.3	流域营养盐负荷来源解析	153
3.4.4	总氮污染物负荷源解析	160
3.4.5	总氮污染负荷分配动态响应变化	165
4	模型在中国的应用展望	171
附录 A	ReNuMa 故障排除	173
附录 B	德拉瓦河西布兰奇流域验证研究数据和结果输出表	178
参考文献		187

1 GWLF 模型原理与方法

1.1 模型概述

利用数学模型，对河流中的氮磷进行非点源负荷估计，一般包括输出系数法、负荷函数法和化学仿真模拟。输出系数是指单位面积年平均营养盐负荷，其与流域土地利用类型有关。系数可以提供对营养盐负荷的总量估计，但是在对确定季节性负荷或评估水污染控制措施效率上缺乏有效性。化学仿真模拟采用机械性的（质量平衡）方式，描述营养盐的可利用性、冲刷、传输和流失（转化）。化学仿真模拟可以对营养盐负荷进行最完整的描述，但对于许多水质研究来说其数据需求量太大。负荷函数法是对经验主义输出系数法和复杂的化学仿真模拟在实践上的优化妥协。数学模型仅限于对水体及沉积物移动的模拟，营养盐的化学行为或是被忽略，或是通过简单的经验关系式描述。当化学仿真模拟方法不可行时，负荷函数法为对营养盐负荷进行估计提供了有效手段。

本章所描述的“通用流域负荷模型”（GWLF）可以评估复合流域水系中的溶解性氮磷和总氮、总磷月负荷量。模型综合考虑了地表径流、地下水、点源负荷以及腐生排水系统的影响与贡献。此外，模型还提供月均水量数据、土壤侵蚀和沉积物量数据。

本章所描述的模型是基于 1987 年 Haith 和 Shoemaker 的 GWLF 模型初始版本。

本章的主体部分描述了模型架构、输入输出文件和选项，并分别介绍了 GWLF 的数学结构、估计模型参数的方法、方法有效性研究的结果以及输入输出文件的样本清单。

GWLF 模型包括对河川径流中的溶解态和固态氮磷的模拟，其负荷来源如图 1-1 所示。

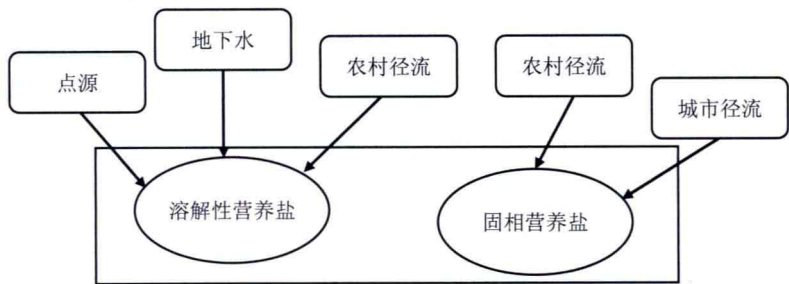


图 1-1 GWLF 污染源负荷来源

农村营养盐负荷以径流水体和被侵蚀土壤的形式从多种来源被传输，每一种源都被认为其土壤和覆盖是一样的。每一种源的溶解性负荷通过不断累积的径流的浓度来计算获

取。径流量则使用“Soil Conservation Service Curve Number Equation”平衡方程来计算。固相的农村营养盐负荷通过月均沉积物产量及沉积物平均营养盐浓度给出。侵蚀量通过“Universal Soil Loss Equation”计算,而最后的沉积物产量则通过侵蚀量与沉积物传输比率(erosion and sediment delivery ratio)的计算得到。任意一个月的沉积量均与该月内的总日径流传输能力成正比。假定城市营养盐负荷全部是固相的,通过指数积累(exponential accumulation)和冲刷函数(washoff functions)模拟。腐生排水系统则分为下列4种类型:普通系统、池塘系统、短途系统、直接排放系统。由腐生排水系统产生的营养盐负荷通过估计每种类型系统所服务的单位人口日负荷量以及相应的每种类型所服务的人口数计算。日蒸腾量按照对覆盖系数(cover factor)和潜在蒸腾量(potential evapotranspiration)的运算给出。潜在蒸腾量是日照时间、饱和水蒸汽压和日气温的函数。

河川径流由地表径流和地下水水流构成。后者是通过流域水平衡集总参数法获得的。日水量平衡是通过不饱和区和浅层饱和区进行计算的。渗透进不饱和区和浅层饱和区的水量与除去径流和蒸发外的降水和融雪量(如果有剩余)相平衡。当不饱和区水量超过其最大田间持水量时,向饱和区的渗透作用发生。浅层饱和区被看做是一个线状的地下水库来进行模拟。

输入数据

GWLF 模型需要:

- 日降水量和气温数据;
- 径流源及其传输与化学参数:

传输参数:每一径流源的面积、水分前提条件II的径流CN值、侵蚀产量 $K \cdot LS \cdot C \cdot P$;

必需的流域传输参数:地下水退水系数和渗滤系数、不饱和区最大持水量、沉积物传输比率、每月的蒸腾覆盖系数值、平均日照小时数、生长季指数、降雨侵蚀系数;

- 不饱和区和浅层饱和区的初始值、覆雪情况以及模拟开始前5天的降水及融雪量;
- 农村地区的输入营养盐数据包括径流中的溶解性氮磷浓度和沉积物中的固相营养盐浓度,如果任意农村区域在冬季月份(非生长季)存在肥料输入,则径流中的溶解浓度同样要针对每一种肥料进行定义;
- 对于城市土地利用,日营养盐累积速率是必需的;
- 腐生排水系统需要估计单位人口排水系统排放负荷,由于植物吸收导致的单位人口负荷的损失,以及每种类型排水系统的服务人口;
- 氮磷的点源负荷假定为溶解态的,并且需要每月进行定义;
- 保持不变(remaining)的营养盐数据是地下水中的溶解性氮磷浓度。

模型输出

GWLF 程序能以表格和图像的形式给出其模拟结果,可以给出下列主要的变量:

- 月河川径流量;
- 月流域侵蚀量和沉积量;
- 月河川径流总氮、总磷负荷量;
- 每种土地利用类型的年侵蚀量;
- 每种土地利用类型的年氮磷负荷量。

程序还可以提供:

- 月降水和蒸发量;
- 地下水对河川径流的月贡献量;
- 月流域径流量;
- 月河川径流溶解性氮磷负荷量;
- 每种土地利用类型的年溶解性氮磷负荷量;
- 每种排水系统类型的年溶解性氮磷负荷量。

1.2 模型架构 (模型的数学描述)

河川径流的营养盐通量包括溶解态和固态。溶解态营养盐与径流、点源和地下水有关。固相营养盐来自点源、农村土壤侵蚀和城市地表冲刷。GWLF 使用分布式模型来描述非点源的径流、腐蚀与城市冲刷;使用集总参数模型模拟线型地下水库。点源作为一个假定已知的质量守恒的负荷添加。水量平衡通过日气象数据进行计算,但是不考虑水流路径。因此,日数据被累加起来,提供对河川径流、沉积物和营养盐通量的月估计(这里作出如下假定:河川径流的流动全程时间远远小于1个月)。

任意一年的河川径流氮或磷月负荷如下

$$LD_m = DP_m + DR_m + DG_m + DS_m \quad (1-1)$$

$$LS_m = SP_m + SR_m + SU_m \quad (1-2)$$

式中: LD_m ——溶解性营养盐负荷;

LS_m ——固相营养盐负荷;

DP_m ——点源溶解性营养盐负荷;

DR_m ——农村径流溶解性营养盐负荷;

DG_m ——地下水溶解性营养盐负荷;

DS_m ——腐生排水系统溶解性营养盐负荷;

SP_m ——固相点源营养盐负荷, kg;

SR_m ——农村固相径流负荷, kg;

SU_m ——城市径流负荷, kg;

m ——月份 ($m=1, 2, \dots, 12$)。

注意: 上述等式假设: ① 点源、地下水和腐生排水系统负荷全部为可溶性的; ② 城市营养盐负荷(城市径流)全部为固相的。

1.2.1 农村径流负荷

农村营养盐负荷在径流和被侵蚀土壤中传播,其来自多个源区,每个源区内的土壤和覆盖类型都被认为是一样的。

溶解性负荷: 来自每一源区的溶解性负荷通过计算不断累积的径流的溶解物浓度来获得。流域的月负荷通过加和所有源区的日负荷来实现。

$$DR_m = 0.1 \times \sum_k \sum_{t=1}^{d_m} Cd_k \cdot Q_{kt} \cdot AR_k \quad (1-3)$$

式中: Cd_k ——来自源区 k 的径流营养盐浓度, mg/L;

Q_{kt} ——第 t 天来自源区 k 的径流量, cm;

AR_k ——源区 k 的面积, hm^2 ;

d_m —— m 月的天数。

径流量通过日气象数据进行计算, 运用 CN 值平衡方程

$$Q_{kt} = \frac{(R_t + M_t - 0.2 \times DS_{kt})^2}{R_t + M_t + 0.8 \times DS_{kt}} \quad (1-4)$$

式中: R_t ——第 t 天的降水量, cm;

M_t ——第 t 天的融雪量, cm (以水态计);

DS_{kt} —— k 源区第 t 天的滞留参数, 由该天该区域的 CN 值决定。

R_t 和 M_t 通过日降水量和气温数据进行估算。当日均气温 T_t ($^{\circ}\text{C}$) 高于 0°C 时, 认为降水形式为降雨, 否则认为是降雪。融雪量通过 degree-day 平衡计算

$$M_t = 0.45 \times T_t \quad T_t > 0 \quad (1-5)$$

滞留参数 DS_{kt} 由 CN 值 CN_{kt} 决定:

$$DS_{kt} = \frac{2540}{CN_{kt}} - 25.4 \quad (1-6)$$

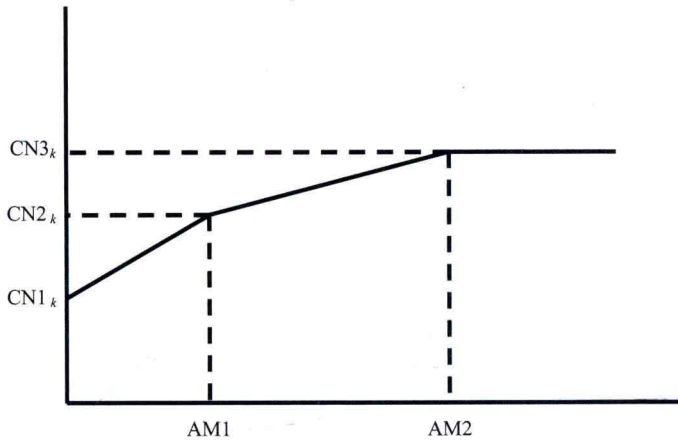


图 1-2 基于先期水分条件函数的 CN 值选择

CN 值是先期水分条件的函数, 如图 1-2 所示。先期水分条件为 1 (干燥)、2 (平均)、3 (潮湿) 的 CN 值分别为 $CN1_k$ 、 $CN2_k$ 和 $CN3_k$ 。对于 k 源区第 t 天, 其实际的 CN 值 CN_{kt} 是之前 5 天先期降水量 A_t 的一个线性函数, 其中:

$$A_t = \sum_{n=t-5}^{t-1} (R_n + M_n) \quad (1-7)$$

式中: R_n ——第 n 天的降水量, cm;

M_n ——第 n 天的融雪量, cm (以水态计)。

对于图 1-2 中的突变点的推荐值：在非生长季，AM1=1.3 cm，AM2=2.8 cm；在生长季，AM1=3.6 cm，AM2=5.3 cm。

对于融雪的情况，假设最湿先期条件优先，因此无论 A_t 为何值，当 $M_t > 0$ 时， $CN_{kt} = CN3_k$ （即假定第 t 天存在融雪现象时，必然有 $A_t > AM2$ ）。

在模型使用时，需要用户指定 $CN2_k$ 的值。 $CN1_k$ 和 $CN3_k$ 的值通过霍金斯近似式计算获得：

$$CN1_k = \frac{CN2_k}{2.334 - 0.01334 \times CN2_k} \quad (1-8)$$

$$CN3_k = \frac{CN2_k}{0.4036 - 0.0059 \times CN2_k} \quad (1-9)$$

固相负荷：固相农村营养盐负荷（ SR_m ）通过月流域沉积物量（ Y_m ，kg）和平均沉积物营养盐浓度（ C_s ，mg/kg）的计算结果得到：

$$SR_m = 0.001 \times C_s \times Y_m \quad (1-10)$$

月沉积物量通过 Haith1955 年开发的模型确定，该模型基于以下三点基本假设：

- （1）沉积物源于片状侵蚀和细沟侵蚀（沟渠和河岸侵蚀被忽略）；
- （2）沉积物传输能力与径流量的 $5/3$ 次幂成比例；
- （3）沉积物量由当年的土壤侵蚀产生（沉积物不能跨年累积）。

第 t 天源区 k 的侵蚀量（ X_{kt} ，mg）可以通过下式计算：

$$X_{kt} = 0.132 \times RE_t \times K_k \times LS_k \times C_k \times P_k \times AR_k \quad (1-11)$$

式中： K_k ， LS_k ， C_k 和 P_k ——分别是土壤侵蚀因子、地形地貌因子、植被覆盖与管理因子、支持效应（耕作模式）因子的标准值；

AR_k ——源区 k 的面积；

RE_t ——第 t 天的降雨侵蚀力， $MJ \cdot mm / (hm^2 \cdot h)$ ；

0.132——对应降雨侵蚀力国际单位的空间转换因数。

降雨侵蚀力可以通过部分经验平衡确定性评估：

$$RE_t = 64.6 \times a_t \times R_t^{1.81} \quad (1-12)$$

式中： a_t ——侵蚀系数（erosivity coefficient），随季节和地理位置的变化而改变；

R_t ——第 t 天的降雨量。

第 j 月产生的总的流域沉积物可供应量（ SX_j ，mg）为

$$SX_j = DR \sum_k^{d_k} \sum_{t=1}^{d_j} X_{kt} \quad (1-13)$$

式中： DR ——流域沉积物传输比率（sediment delivery ratio），其值与流域面积有关；

X_{kt} —— k 源区第 t 天的侵蚀量；

d_j ——第 j 月的天数；

d_k ——流域源区的个数；

SDR——沉积物传输系数, $SDR = 0.45(b^{-0.298})$;

b ——流域面积, km^2 。

来自流域内的上述沉积物的传输基于当月径流的传输能力。传输因数 TR_j 定义如下:

$$TR_j = \sum_{t=1}^{d_j} Q_t^{5/3} \quad (1-14)$$

式中: d_j ——第 j 月的天数;

TR_j ——第 j 月总的传输能力。

沉积物可供应量 SX_j 被分摊到之后的 12 个月 (包括 j 本身) 被传输, 与其各自月内的径流传输能力相对应。自第 j 月至第 12 月总的传输能力可以表示为 B_j :

$$B_j = \sum_{h=j}^{12} TR_h \quad (1-15)$$

对 m 月来说, 在之前第 j 月所累积的, 贡献给 m 月 ($m \geq j$) 沉积物量 Y_m 的第 j 月沉积物可供应量 SX_j 的被传输比例为 TR_m/B_j 。第 m 月的总沉积物量是之前各月沉积物可供应量在该月被传输量的总和。

$$Y_m = TR_m \sum_{j=m-11}^m (SX_j / B_j) \quad (1-16)$$

SX 在该月至年底基于 TR 按比例传输, 传输的部分就转化为 Y , 那么第 m 月的 Y_m , 就是之前各月的沉积物可供应量在该月被传输的部分。

1.2.2 城市径流 (固态)

城市径流模型基于广义的累积-冲刷关系。指数型的累积函数随后被应用于 SWMM 模型, 冲刷函数则同时被用于 SWMM 和 STORM 模型。随着数学的发展, 在 Overton 和 Meadows 中也得到应用。

营养盐随着时间的流逝在城市地表不断累积, 并在径流发生时被冲刷。径流量则通过式 (1-4) 至式 (1-7) 计算。

假设 $N_k(t)$ 是源区 k 在第 t 天的营养盐累积量 (kg/hm^2), 则在干燥期间的累积速率为

$$\frac{dN_k}{dt} = n_k - \beta \times N_k \quad (1-17)$$

式中: n_k ——累积速率常数, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$;

β ——耗损速率常数, d^{-1} 。

求解式 (1-17), 得到:

$$N_k(t) = N_{k0} e^{-\beta \times t} + (n_k / \beta)(1 - e^{-\beta \times t}) \quad (1-18)$$

利用式 (1-18) 可以得到 t 趋近无穷时的近似值 $N_{k, \max}$

$$N_{k, \max} = \lim_{t \rightarrow \infty} N_k(t) = n_k / \beta \quad (1-19)$$

根据 Sartor 和 Boyd 在 1972 年给出的数据 (图 1-3), $N_k(t)$ 在大约 12 天之后可达到其极大值。如果保守地假设 $N_k(t)$ 在 20 天后可达到其最大值 $N_{k,\max}$ 的 90%, 且 $N_{k0}=0$,

$$0.90 \times (n_k / \beta) = (n_k / \beta)(1 - e^{-20 \times \beta}) \quad (1-20)$$

得到 $\beta = 0.12$ 。

式 (1-18) 基于时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 可以写作:

$$N_k(t_2) = N_k(t_1)e^{-0.12 \times \Delta t} + (n_k / 0.12)(1 - e^{-0.12 \times \Delta t}) \quad (1-21)$$

当时间间隔为 1 天时:

$$N_{k,t+1} = N_{kt}e^{-0.12} + (n_k / 0.12)(1 - e^{-0.12}) \quad (1-22)$$

式中: N_{kt} ——第 t 天开始时的营养盐积累量, kg/hm^2 。

式 (1-22) 可以修正为包括冲刷作用的形式:

$$N_{k,t+1} = N_{kt}e^{-0.12} + (n_k / 0.12)(1 - e^{-0.12}) - W_{kt} \quad (1-23)$$

式中: W_{kt} ——第 t 天土地利用源区 k 的径流营养盐负荷。

径流负荷为

$$W_{kt} = w_{kt}[N_{kt}e^{-0.12} + (n_k / 0.12)(1 - e^{-0.12})] \quad (1-24)$$

式中: w_{kt} ——一个一阶冲刷函数。

$$w_{kt} = 1 - e^{-1.81Q_{kt}} \quad (1-25)$$

式 (1-25) 基于假设: 1.27 cm 的径流将会冲刷 90% 的累积污染物。因此, 城市营养盐的径流月负荷为

$$\text{SU}_m = \sum_k \sum_{t=1}^{d_m} W_{kt} \times \text{AR}_k \quad (1-26)$$

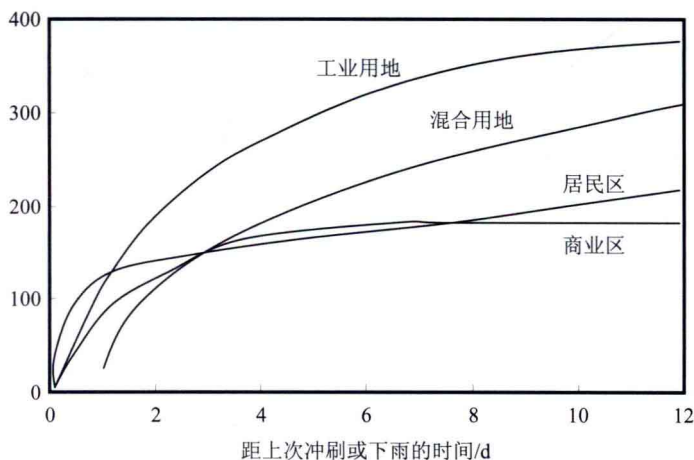


图 1-3 城市地表污染物累积速率 (Sartor & Boyd, 1972; 1981 年重新描述)

1.2.3 地下水水源

m 月地下水对溪流的营养盐负荷 DG_m 为

$$DG_m = 0.1C_g AT \sum_{t=1}^{d_m} G_t \quad (1-27)$$

式中: C_g ——地下水中的营养盐浓度, mg/L;

AT ——流域面积;

G_t ——第 t 天地下水源向溪流的出流量;

d_m —— m 月的天数。

地下水出流量通过图 1-4 所示的集总函数模型进行描述。河川径流包括流域内所有源区的地表径流, 加上浅层饱和区的地下水出流。与 1972 年 Haan 的方法类似, 根据土壤含水量将其分为不饱和区、浅层饱和区和深层饱和区。

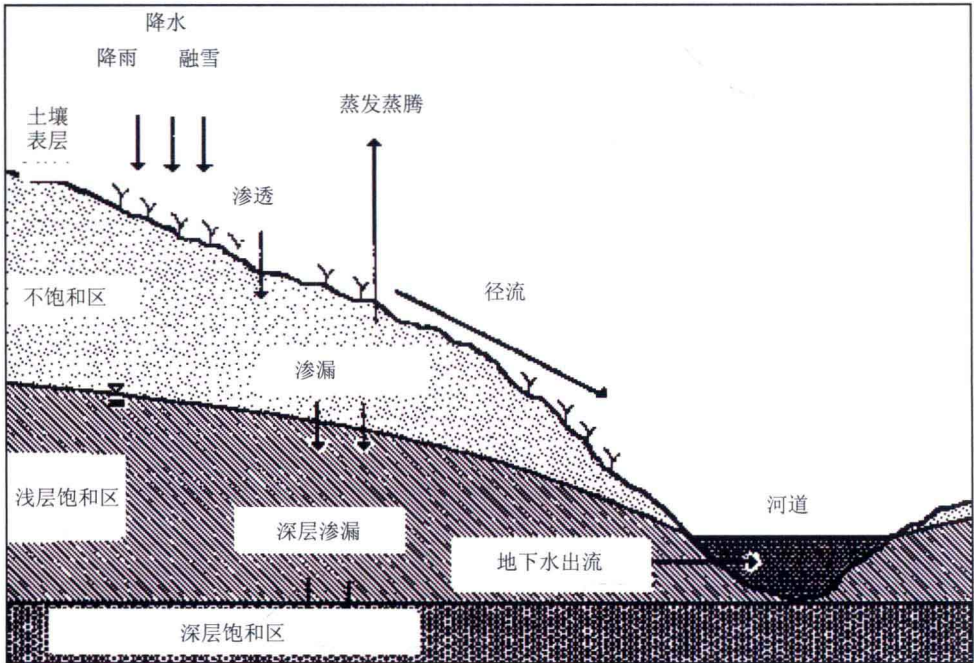


图 1-4 地下水出流的集总参数模型

不饱和区和浅层饱和区的日水量平衡为

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - PC_t \quad (1-28)$$

$$S_{t+1} = S_t + PC_t - G_t - D_t \quad (1-29)$$

式中: U_t ——第 t 天开始时不饱和区的土壤含水量;

S_t ——第 t 天开始时浅层饱和区的土壤含水量;

R_t ——第 t 天的降雨量;

M_t ——第 t 天的融雪量;

Q_t ——流域的地表径流量;

E_t ——蒸发量;

PC_t ——渗透进浅层饱和区的量;

G_t ——地下水源向溪流的出水量;

D_t ——渗透进深层地下水的量, cm。

当不饱和区水量超过其土壤最大蓄水能力(田间持水量) U^* (cm) 时, 发生渗透作用:

$$PC_t = \max(0; U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*) \quad (1-30)$$

蒸发作用受限于不饱和区的有效水分:

$$E_t = \min(CV_t \times PE_t; U_t + R_t + M_t - Q_t) \quad (1-31)$$

式中: CV_t ——覆盖因子;

PE_t ——潜在蒸发量, 由 Hamon 于 1961 年给出, 如下式:

$$PE_t = \frac{0.021 \times H_t \times e_t}{T_t + 273} \quad (1-32)$$

式中: H_t ——包含第 t 天的该月每天日照小时数;

e_t ——第 t 天的饱和水蒸气压, 10^2Pa ;

T_t ——第 t 天的摄氏温度, $^\circ\text{C}$ 。

当 $T_t \leq 0$ 时, 定义 PE_t 为 0。饱和水蒸气压可由下式近似得到:

$$e_t = 33.8639[(0.00738T_t + 0.8072)^8 - 0.000019(1.8T_t + 48) + 0.001316], T_t \geq 0 \quad (1-33)$$

根据 Haan 于 1972 年的描述, 浅层饱和区被作为一个简单的线型水库来进行模拟。地下水出流 G_t 和向深层饱和区的渗流 D_t 分别为:

$$G_t = r \times S_t \quad (1-34)$$

$$D_t = s \times S_t \quad (1-35)$$

式中: r ——地下水退水系数, d^{-1} ;

s ——地下水渗滤系数, d^{-1} 。

1.2.4 腐生排水系统

GWLF 的腐生排水系统单元基于 Mandel1993 年开发的模型。为了估算对流域水质的影响, 腐生排水系统负荷可分为以下 4 种类型:

$$DS_m = DS_{1m} + DS_{2m} + DS_{3m} + DS_{4m} \quad (1-36)$$

式中: DS_{1m} ——第 m 月由普通(normal)系统排出的溶解性营养盐负荷, kg;

DS_{2m} ——第 m 月由短循环(short-circuited)系统排出的溶解性营养盐负荷, kg;