

城市水土流失综合评估模型研究

许有鹏, 都金康, 张立峰, 王腊春

(南京大学 城市与资源系, 南京 210008)

摘要: 主要分析了城市水土流失评估模型的研制方法和途径, 并以深圳市为例, 探讨并建立了深圳市水土流失综合评判模型。最后以该城市水土保持系统作支持, 进行了模型应用分析, 从而使该模型为城市水土流失实时评估和预测创造条件。本研究为城市水土流失评估方法研究提供了经验。

关键词: 综合评判模型; 城市水土流失; 水土保持系统

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2000)04-0016-04

中图分类号: S157

Comprehensive Evaluation on Urban Soil and Water Loss Models

XU You-peng, DU Jin-kang, ZHANG Li-feng, WANG La-chun

(Department of Urban and Resources Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008, PRC)

Abstract: The methods and approaches of soil and water loss evaluation models are analyzed. Meanwhile, taking Shenzhen city as an example, the comprehensive evaluation model is built. The examination analyses of the model are carried out with system of urban soil and water conservation in Shenzhen city. The model creates favorable conditions for urban soil and water loss estimating and forecasting.

Keywords: comprehensive evaluation model; urban soil and water loss; soil and water conservation system

1 前言

由于近些年我国经济高速发展, 各地城市化和工业化进程速度加快, 大量土地被开发成为城市建筑和工业用地。许多土地是无序开发, 土地开发后资金无法到位, 建设和水保措施没有及时跟上, 形成大量松散堆积层, 遇到暴雨后极易冲刷, 造成大量水土流失, 其中深圳市就是一个典型城市。

深圳市位于广东省沿海中部, 土地面积 2 020 km², 是我国改革开放的窗口城市。短短十几年深圳就由一个小镇发展成为现代化的大城市。随着农村城市化的快速推进, 超常规的大规模无序开发, 不可避免地造成了城市大量水土流失。深圳市地处北回归线以南, 属南亚热带海洋性季风气候, 降雨多为台风暴雨, 雨量较大且强度高, 暴雨洪水冲刷能力强, 加上该市地层多为厚层花岗岩风化物组成, 一旦开垦极易被冲刷, 造成开发后严重的水土流失, 目前开发区侵蚀模数已高达 $2.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ t/(km² · a), 河流泥沙淤积率高达 70 cm/a 以上。泥沙造成河道淤塞, 加剧了洪水的危害, 破坏了城市的基础设施, 影响了城市经济和环境的持续发展。

2 水土流失评估模型

城市水土流失和一般水土流失相比, 具有流失强度大, 危害严重以及治理难度大等不利因素。并且城市水土流失评估既要涉及到自然因素, 又涉及到许多人类活动影响因素, 目前城市大部分水土流失是人为造成, 主要表现为不适当的土地开发、采石取土以及道路建设等, 不同开垦类型引发的水土流失也是不同的。常用的水土流失评价模型已无法适用这类地区的水土流失评估。因此对城市水土流失评估模型就是要分析不同人类活动情况下水土流失评估问题。本文拟在深圳城市水土治理规划基础上, 以深圳城市水土保持信息系统数据库和 DTM 空间分析模型作支持, 开展深圳城市水土流失系统评估模型研究。根据深圳市水土流失现状特点, 重点开展水土流失强度综合评判模型的研究, 并以此为基础进行土壤侵蚀量和河流泥沙量的估算, 最后利用实测资料进行了验证分析。

2.1 侵蚀强度等级划分和综合评判模型

按照深圳市水土保持规划, 深圳市土壤侵蚀强度可划分为 3 级: 级, 较少级; 级, 一般级; 级, 严重级。并根据深圳市水土流失成因分析, 重点考虑了

土地开发区、采石场、建设开挖面、自然流失等几种情况,对每种都赋予不同评价因素指标来确定流失强度。本文即以此为基础建立多因素综合评判模型。水土流失强度模糊综合评判基本模型可表示为: 设给定 2 个有限论域 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$; 其中 U 代表综合评判因素组成的集合, V 代表对评判因素所做的评语组成的集合。模糊综合评判则表示为下列模糊变换

$$B = A \cdot R$$

式中: A —— U 上的模糊子集, $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, $0 \leq a_i \leq 1$; B —— 评判结果, 是 V 上的模糊子集, $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$, $0 \leq b_j \leq 1$ 。 a_i —— u_i 对 A 的隶属度, 它表示单因素 u_i 在总评定因素中所起作用的大小, 也在一定程度上代表根据单因素 u_i 评定等级的能力; 而 b_j 则为等级 v_j 对综合评定所得模糊子集 B 的隶属度, 表示综合评判的结果。而评判矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nm} \end{bmatrix}$$

式中: r_{ij} —— 因素 u_i 的评价对等级 v_j 的隶属度; R_{ij} —— 对第 i 个因素 u_i 的单因素评判结果 $R_{ij} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ 。

2.2 评判因素的选取和分级

根据深圳市水土保持规划中土壤侵蚀强度等级划分标准,产生侵蚀的原因不同,其评判因素也不同。因此,必须按发生水土流失的原因分别进行评判。

(1) 无序开发的开发区判别因素: 因无序开发而引起的水土流失,是引起水土流失的最主要原因,其评判因素选择下列 3 个: 植被覆盖率 $f(u_1)$, 即植被覆盖面积占总面积之比例(%); 人造平台(原)的斜坡高差 $\Delta h(u_2)$; 人造平台面积 $a(u_3)$ 大小。一般开发区的平台越大,形成松散堆积物越多,土壤侵蚀强度越大。并且分为开放式,即开发平台处有明显冲积沟和堆积坡等,易于水土流失。反之,若仅有局部堆积坡且没有集中冲刷,则划为封闭式。(2) 采石场判别因素: 采石场水土流失的判别只选取尾砂防护距离 $L(u_1)$ 一个因素。(3) 建设开挖面判别因素: 因建设需要开挖而出露的新鲜坡面,即为建设开挖面。其土壤侵蚀强度判别主要选择了开挖面的坡度(u_1)、坡面的高差 $\Delta h(u_2)$ 以及岩性特征(u_3) 3 个因素。(4) 自然流失区评判因素: 自然流失区水土流失强度评判选择坡度(u_1)、植被覆盖率(u_2) 和水保措施(u_3) 3 个因素。上述各因素在评判时,为了统一,均分 4 级,即 V_1, V_2, V_3, V_4 详细分级指标见表 1。

根据表 1 中深圳市水土流失强度等级划分评价标准,各评价因素在综合评定时,取等权平均,即取 A 为 u 上的模糊子集, $A = \{0.333, 0.333, 0.334\}$ 。

2.3 评判矩阵 R 的推求与计算

根据上述分析,评价因素集 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ 对应着评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, 而评判矩阵 R 中 r_{ij} 即为某因素 u_i 对应等级 j 的隶属函数,其值的推求可根据各评价因素的实际数值或实际状况,对照表 1 中各因素的分级指标来分析推算。

表 1 深圳市水土流失强度分级评判标准

流失原因	评价项目	V_1	V_2	V_3	V_4	栏号
开发区(边界相对封闭式)	植被覆盖率 $f / \%$	> 50	30 ~ 50	10 ~ 30	< 10	(1)
	斜坡高差 $\Delta h / m$	< 1	1 ~ 2	2 ~ 3	> 3	(2)
	平台面积 $a / 10^4 m^2$	< 1	1 ~ 4	4 ~ 6	> 6	(3)
开发区(边界相对开放式)	植被覆盖率 $f / \%$	> 70	50 ~ 70	50 ~ 30	< 30	(4)
	斜坡高差 $\Delta h / m$	< 1	1.0 ~ 1.5	1.5 ~ 2.0	> 2	(5)
	平台面积 $a / 10^4 m^2$	< 0.5	0.5 ~ 1.0	1 ~ 4	> 4	(6)
采石场	尾砂防护 L / m	> 500	> 500	200 ~ 500	< 200	(7)
	坡度 $\alpha / (^\circ)$	< 30	< 30	30 ~ 38	> 38	(8)
建设开挖面	高差 $\Delta h / m$	< 3	< 3	3 ~ 6	> 6	(9)
	岩性特征	新鲜岩体	坚硬风化壳	裂隙发育的半风化物	全风化破碎带、堆积、残积物或松散土	(10)
	坡角 $\alpha / (^\circ)$	< 15	< 15	15 ~ 25	> 25	(11)
自然流失	植被覆盖率 $f / \%$	> 75	50 ~ 75	30 ~ 50	< 30	(12)
	措施或流失特征		有挖穴水平沟等	侵蚀沟不明显	明显的侵蚀沟	(13)

为了消除各等级间数值相差不大,或状况区别不明显,而评价等级可能相差一级的跳跃现象,使隶属函数在各级之间能平滑过渡,故将其进行模糊化处理。能用定量指标来描述评价因素等级的,处理方法如下:对于 V_2, V_3 级(即中间区间),令其落在区间中点的隶属度为 1,两侧边缘点的隶属度为 0.5,中点向两侧按线性递减处理。对于 V_1 和 V_4 两侧区间,则令距临界值越远,属两侧区间隶属度越大。而在临界值上,则属两侧等级的隶属度都为 0.5。令评价因素 V_1 和 V_2 等级的临界值为 k_1 ; V_2 与 V_3 的临界值为 K_3 ; V_3 与 V_4 的临界值为 K_5 ; 等级 V_2 区间中点值为 K_2 , $K_2 = (K_1 + K_3)/2$; 等级 V_3 区间中点值为 K_4 , $K_4 = (K_3 + K_5)/2$ 。如表 1 中第 1 栏 U_1 (植被覆盖率),有 $K_1 = 50\%$, $K_2 = 40\%$, $K_3 = 30\%$, $K_4 = 20\%$, $K_5 = 10\%$ 。按上述构想,(1),(4),(7),(12) 栏评价因子的各评价等级的隶属函数可按下式计算:

$$r_{i1}(u_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{u_i - k_1}{u_i - k_2}) & u_i > k_1 \\ 0.5(1 - \frac{k_1 - u_i}{u_i - k_2}) & k_2 < u_i < k_1 \\ 0 & u_i < k_2 \end{cases}$$

$$r_{i2}(u_i) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{u_i - k_1}{u_i - k_2}) & u_i > k_1 \\ 0.5(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_1 - k_2}) & k_2 < u_i < k_1 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_3 < u_i < k_2 \\ 0.5(1 - \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_4}) & k_4 < u_i < k_3 \\ 0 & u_i < k_4 \end{cases}$$

$$r_{i3}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i > k_2 \\ 0.5(1 - \frac{k_2 - u_i}{k_2 - k_3}) & k_3 < u_i < k_2 \\ 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_4}) & k_4 < u_i < k_3 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_5}{k_4 - k_5}) & k_5 < u_i < k_4 \\ 0.5(1 - \frac{k_5 - u_i}{k_4 - u_i}) & u_i > k_5 \end{cases}$$

$$r_{i4}(u_i) = \begin{cases} 0 & u_i > k_4 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_5}{k_4 - k_5}) & k_5 < u_i < k_4 \\ 0.5(1 + \frac{k_5 - u_i}{k_4 - u_i}) & u_i < k_5 \end{cases}$$

而(2),(3),(5),(6),(8),(9),(11) 栏评价因子的各评价等级的隶属函数,只需将函数的取值条件中的“>”改为“<”;“<”改为“>”;“=”改为“>”;即可运用。对于只能用定性指标描述的因素,如表 1 中(10),(13) 栏可首先将定性指标赋予一个评语代码,如(10)

栏中,新鲜岩体(V_1)用评语代码值 0 表示;坚硬风化壳(V_2)用 1 表示;裂隙发育的半风化物(V_2)用 2 表示;全风化破碎带、堆积物、残积物或松散土(V_4)用 3 表示。其次是确定各评语的隶属度(表 2)。

表 2 各评价因素的隶属度矩阵

评语代码	0	1	2	3
0	0.7	0.3	0	0
1	0.25	0.5	0.25	0
2	0	0.25	0.50	0.25
3	0	0	0.30	0.70

为了更好地描述各等级侵蚀强度的大小,对各评价因素的评价等级,采用了表 1 专家评分的方法,即: V_1 评价等级对应的评分为 $F_1 = 0$ (为计算方便 F_1 取为 0.001); V_2 对应 $F_2 = 1$; V_3 对应 $F_3 = 2$; V_4 对应 $F_4 = 3$ 。这样就可以定量地反映各因素侵蚀强度等级的描述。分值越高,侵蚀强度越大,强度等级也越高。综合评定时,按上述 F_j 的值以及 B 矩阵中各等级隶属度 b_j 值,即可得出综合评判值:

$$F = \sum_{j=1}^4 b_j F_j / \sum_{j=1}^4 b_j$$

根据综合评判值 F ,按深圳市城市水土流失强度等级判别标准(见表 3),即可判定其水土流失强度等级。如某地块水土流失强度的综合评判分值 $F = 2.6$,该地块相应的水土流失强度可判定为 级。整个水土流失强度评判过程如图 1 所示。

表 3 深圳市城市土壤侵蚀强度等级判别标准

侵蚀等级	侵蚀模数/ ($t/km^2 \cdot a^{-1}$)	侵蚀厚度/ ($mm \cdot a^{-1}$)	参考指标 (分值)
级	2 000 ~ 8 000	2.0 ~ 5.9	0.5 ~ 1.5
级	8 000 ~ 20 000	5.9 ~ 14.8	0.5 ~ 2.5
级	20 000 ~ 60 000	14.8 ~ 44.3	> 2.5

2.4 土壤侵蚀量及河道流泥沙估算分析

土壤侵蚀量的估算模型研制,采用了该区实际调查到的典型地段不同等级水土流失强度资料,利用水土流失强度等级的综合评分结果,再根据土壤侵蚀强度等级、土壤类型和成土母质,估算其土壤侵蚀量。在所有土壤侵蚀量中将相当大一部分进入河道,河流泥沙估算包括归槽泥沙量的估算、河流输沙量估算、河道泥沙淤积量估算几个部分。目前要想精确估算每部分泥沙量还较为困难。为此本次建模中利用本区内已设的几个典型河段及其上游的实测资料,通过率定反推淤侵比,输沙率等系数,据此推算进入河道的泥沙数量,经实测资料检验估算精度基本能满足要求。

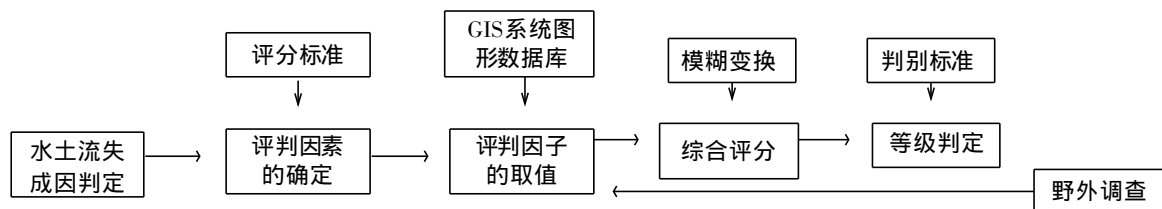


图1 深圳市水土流失强度等级判定流程图标

2.5 土壤侵蚀模型的检验

为了检验模型的有效性,根据深圳市横岗镇育马城等 4 个开发区地段实际调查的水土流失和区内特征有关资料,利用本次评判模型程序对其进行验证分析,计算结果见表 4,其中土壤侵蚀模数计算值是由土壤侵蚀量模型估算值反推出的,用于比较。从表中

表 4 水土流失评判模型计算成果分析表

序号	流失区位置	综合评分	流失强度 (评估值)	流失强度 (实际值)	侵蚀模数 (评估值)	侵蚀模数 (实际值)	估算误差/ %
1	平山镇中心城	2.26			16483	14331	15%
2	坑梓香港城旁	2.62			37584	34138	10%
3	横岗育马城	2.89			58094	61367	-5%
4	布吉镇灯芯坑	2.72			46382	41615	12%

3 模型的应用

利用上述水土流失评估模型,借助深圳市水土保持系统,即可进行城市水土流失状况动态评估和实时监测工作。深圳水土保持信息系统,以地理信息空间技术为支持,建立了该市地形数据库以及土壤、植被和水土流失专题数据库,实现了城市土流失基本信息的计算机管理,整个系统信息存储管理均以图形为基础,属性数据和图形信息有机地联系在一起,分析查询成果均以图形方式显示表达,做到了基本信息的可视化。上述模型作为系统应用分析的一部分,系统可利用此模型进行深圳市水土流失动态评估分析,从而使系统实现了该市内任一地块的侵蚀等级和侵蚀模数的预测评估、河流泥沙量的估算、全市水土流失特征分析等功能。整个系统具有形象直观,功能齐全,操作简单等特点。同时系统具较强的空间分析和水土流失评估和预测能力。

在系统进行地面水土流失预测评估时,用户只要选择确定需要分析的流域或地块,系统首先采用人机对话窗口输入方式确定其流失原因、斜坡高差等需人工确定的要素,同时利用 DTM 模型计算该区域坡度,并通过植被图等叠置分析,计算出该区域植被覆盖率和平面积等参数,然后通过水土流失综合评估模型预测确定该地块的水土流失强度等级,再以该区域内土壤类型和水系相叠加,最后完成该区的侵蚀模

数,土壤侵蚀强度等级评判模型评判结果,4 个地块综合评分 F 分别为 2.26, 2.62, 2.89 和 2.72,按评判标准划分为 2 类和 3 类流失区,和实际调查结果相同。而土壤侵蚀模数和侵蚀量估算误差可在 15% 以内。因此上述评价模型估算结果可基本满足要求,可以投入实际应用。

数和侵蚀量以及河道泥沙量的估算等。此外,系统利用上述模型即可计算出深圳市各典型岩性土壤侵蚀模数分布图表。并和深圳市水土保持系统中的“水土流失现状图”,“土壤图”以及“水系图”等 3 幅图叠加,可建立流失图斑侵蚀模数数据库,将每块图斑侵蚀模数 M_i 存入相应数据库中,需要时即可查询并在各流失区地块显示对应的面积(S_i)以及 M_i 值。若某水土流失区的侵蚀等级,土壤类型及成土母质等资料已知时,根据侵蚀等级的综合评判分值,即可估算出其土壤侵蚀量的大小。

王志明、李连发同志也参加了本文的研究工作,同时本文还得到了郝明龙、陈法扬和史运良等先生的帮助,特此致谢!

[参 考 文 献]

- [1] 王礼先主编. 水土保持学[M]. 中国林业出版社, 1995. 435—473.
- [2] 陈法扬, 等. 论我国城市化过程中水土流失问题[J]. 水土保持研究, 1997, 4(1): 16—18.
- [3] 唐克丽. 城市水土流失和城市水土保持[J]. 水土保持通报, 1997, 17(5): 1—2.
- [4] 王光远. 论综合评判几种数学模型的实质和应用[J]. 模糊数学, 1984(4): 81—88.
- [5] Thomas W. Haster Wesley James P. Predicting Sediment Yield in Storm - Water Runoff from Urban Areas. Journal of Water Resources Planning and Management, 1994, 120(5): 630—650. 0