

# 深圳市土壤侵蚀预测模型的建立<sup>\*</sup>

党晨席, 郝明龙, 何伟, 郭睿

(深圳市水利规划设计院, 深圳 518036)

**摘要:** 根据深圳市水土流失调查资料和产沙观测数据, 通过选取影响水土流失的主要因子: 地形、植被、降雨、土壤、城市化人为影响因子等, 建立了符合深圳地区的多元回归方程, 其中城市化人为影响因子是根据城市水土流失现状提出的, 并通过深圳 3 个水保试验站的调查资料反推求得。通过两组实测资料检验, 表明建立的模型具有较高的精度, 能够较好的反映深圳地区的水土流失特点。

**关键词:** 深圳市; 城市土壤侵蚀预测模型; 经验统计模型; 城市化人为影响因子

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)04-0215-04

## The Establishment of Soil Erosion Predication Model in Shenzhen City

DANG Chen-xi, HAO Ming-ling, HE Wei, GUO Rui

(Shenzhen Water Resources Planning Institute, Shenzhen 518036, China)

**Abstract:** According to the survey data of soil erosion and measured water and soil loss in Shenzhen City, the key factors associated with soil and water loss, namely landform, vegetation, rainfall, soil and urbanization artificial element, were collected and an empirical model was established based on these factors. The factor of urbanization artificial element was obtained from the measured data from 3 local stations in Shenzhen City. The precision of the prediction model was tested by two sets of measured data, showed that it has a high precision and can represent the characteristics of soil erosion in Shenzhen City.

**Key words:** Shenzhen City; forecast model of urban soil erosion; empirical statistical model; human-caused influence factor of urbanization

## 前言

土壤侵蚀模型是对水土流失量进行预测的重要工具。自 20 世纪 60 年代以来, 国内外已经开发出许多实用的土壤侵蚀预报模型<sup>[1]</sup>。根据土壤侵蚀模型的建模手段和方法, 可分为经验统计模型与物理成因模型。经验统计模型是通过观测资料和数理统计方法, 选定影响因素, 得出计算土壤流失量的方程式, 它简单实用, 在实际应用中发挥着巨大的作用。物理成因模型则以土壤侵蚀的物理过程为基础, 根据已知影响条件来描述土壤侵蚀产沙过程, 预报土壤侵蚀量。但由于自然界本身的复杂性和人类对自

然认识的局限性, 土壤侵蚀规律未能认识清楚<sup>[2]</sup>, 所以物理成因模型距离实际应用尚有较大距离。

自 20 世纪 40 年代开始, 中国开始建立经验统计模型, 大多是在美国通用水土流失方程(USLE)的基础上建立的<sup>[3]</sup>。这些模型反映出了土壤侵蚀的过程、强度及流失量, 但地域移植性差、通用性薄弱, 而且所选因子主要是降雨、地形、土壤、植被、人类活动等土壤侵蚀因子, 很少有依据城市土壤侵蚀情况建立的。

深圳市水土流失是典型的城市土壤侵蚀类型。自上世纪 90 年代中期以来, 在城市水土保持方面做了大量工作, 但在土壤侵蚀预测模型方面研究很少。

\* 收稿日期: 2007-03-19

作者简介: 党晨席(1981-), 男, 2004 年毕业于北京林业大学水土保持专业, 从事开发建设项目的水土保持方案编制及城市水土保持生态环境建设研究等工作。

目前,深圳市对于城市开发建设项目水土流失量的预测基本上采用类比法,即通过实地水土流失现状调查,估测水土流失强度范围,并依据水土流失强度分级标准,估算水土流失量,人为主观影响较大。

水土流失受到多种因素的影响,其类型和强度在时空尺度上存在巨大差异。深圳市发展日新月异,人为影响日益增大,水土流失特性也不断发生改变。依据固定的标准计算水土流失量,其结果与实际情况必将产生差异。在分级标准中,各指标尺度缺乏严格规定,预测结果受人为主观因素影响很大,计算结果的准确性更加难以保证。因此,类比法难以适应城市快速发展的需要,建立符合城市水土流失特点及发展变化的预测模型,对各类流失类型和强度进行科学量化,对流失量进行准确计算显得非常必要。

但依据目前的条件,建立经验统计模型,可更好地满足工程上的需求。本文创新性地提出城市化人为影响因子,补充了目前开发建设项目水土流失模型,并建立一个符合深圳地区特性的经验统计模型,为工程建设所产生的水土流失预测提供准确的方法。

## 1 深圳市城市土壤侵蚀模型建立

### 1.1 模型建立方法

深圳地区缺乏水文、泥沙资料,也没有建立水土流失预报模型。本文以美国通用土壤流失方程(USLE)为基础,结合深圳市具体情况,建立符合深圳地区水土流失特点的简化经验统计模型。

由于在城市发展所造成的水土流失中,人为影响非常大,故在模型中特别提出城市化人为因子。主要考虑的土壤侵蚀影响因子为:降雨、土壤、地形、植被和城市化人为因子。模型基本表达式为:

$$A = M R K L S P \quad (1)$$

式中:  $A$  ——年平均土壤侵蚀量;  $M$  ——城市化人为因子;  $R$  ——降水因子;  $K$  ——土壤侵蚀因子;  $L$  及  $S$  ——地形因子;  $P$  ——地表植被覆盖因子。

### 1.2 主要因子的确定

#### 1.2.1 降雨侵蚀力因子 $R$

在水力侵蚀中,降雨因子(Rainfall erosivity)的作用非常重要。深圳降雨量大,且分布不均。本文使用年内月平均降雨量及降雨总量数据,根据魏斯曼经验公式计算  $R$  因子。

$$R = \sum 1.735 \exp[1.51 \lg(P_i^2/P) - 0.8188] \quad (2)$$

式中:  $P$  ——年降雨量(mm);  $P_i$  ——月平均降雨量(mm)。

我们以 1 800 mm 为界,将深圳地区划分为多

雨区和少雨区,分区计算  $R$  值。多雨区以 1995 年深圳水库站雨量计算,少雨区以 1995 年石岩水库站雨量计算,  $R$  值分别为 68.78, 52.89。

#### 1.2.2 土壤可蚀性因子 $K$

土壤可蚀性因子(soil erodibility,  $K$ )体现土壤对于冲蚀分离(detachment)和搬运作用(transportation)的忍受程度,它可以充分地反映出土壤本身对于冲蚀破坏的抵抗能力。该因子受到土壤本身理化性质的影响,值越低表示该土壤的抗蚀能力越强。根据 Wischmeier 和 Mannering<sup>[4]</sup>用人工降雨测定的 55 种土壤的可蚀性指数,选定 13 个进行回归分析,得出下式(即诺谟方程):

$$100 \times K = 2.1 \times [d \times (d + e)]^{1.14} \times 10^{-4} \times (12 - 4) + 3.25(b - 2) + 2.5 \times (c - 3) \quad (3)$$

式中:  $K$  ——土壤可蚀性因子;  $d$  ——粉粒和细砂的含量百分比;  $e$  ——沙粒含量百分比;  $b$  ——土壤结构系数;  $c$  ——土壤渗透系数;该方程尤其适用于温带中质土壤<sup>[5]</sup>。台湾学者对以上方程进行修正(4),使其适合台湾省的土壤状况<sup>[6]</sup>。

$$100 \times K = 0.1317 \times \{2.1 \times [d \times (d + e)]^{1.14} \times 10^{-4} \times (12 - 4) + 3.25(b - 2) + 2.5 \times (c - 3)\} \quad (4)$$

深圳和台湾地区纬度相近,气候和自然地理状况也相近,土壤发育的状况也应该相同。所以式(4)可以应用到深圳土壤可蚀性因子的求算中。

深圳地区主要土壤类型为花岗岩赤红壤和红壤,有机质含量中等(2.0% ~ 3.5%)。根据中国、加拿大在广东德庆县深涌水保试验基地合作项目《广东省花岗岩地区土壤侵蚀与整治》的土壤资料<sup>[7]</sup>,统计分析得出深圳地区土壤有机质含量为 2.26%,  $a$  即取此值。

由中加项目资料可知,深圳地区粒径 < 1.0 mm 的土壤占 56.99% 左右,据土壤结构系数取值标准<sup>[6]</sup>可知,土壤结构参数  $b$  取 1,为极细颗粒。

深圳地区花岗岩赤红壤、侵蚀赤红壤、红壤一般都质地粗,孔隙度大,疏松而通透性强;而另一种土壤砂页岩赤红壤土体紧实,通透性较差。综合来看,深圳地区土壤渗透性能中等,根据渗透等级表<sup>[6]</sup>可知土壤渗透系数  $c$  取值为 4,为中等慢速。

根据广东省花岗岩颗粒粒度特征分析表<sup>[7]</sup>及深圳土壤类型,查出深圳地区土壤颗粒特征。同时,结合深圳河道淤积物颗粒分析<sup>[8]</sup>,拟定深圳地区主要侵蚀土壤花岗岩赤红壤中粉沙及很细砂(0.002~0.1mm)所占百分比  $d$  为 31.28%,砂粒(0.1~2.0mm)所占百分比  $e$  为 35.32%。

将以上参数值式代入式(4),求得深圳四河流域

内土壤抗侵蚀参数  $K$  为 0.015 37。

### 1.2.3 地形 $LS$ (坡长、坡度) 因子

由于地形因子对土壤的影响地域性差异较小, 所以直接采用美国通用土壤流失方程地形因子的计算式(5)<sup>[9]</sup>来求流域各侵蚀斑块的地形因子值。

$$\begin{aligned} \text{坡度因子 } S &= 65.4\sin^2 a + 4.56\sin a + 0.0654, \\ \text{坡长因子 } L &= (l/22.13)^{0.5} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $a$ ——平均坡度;  $l$ ——平均斜坡长。

### 1.2.4 植被覆盖因子 $P$

南京土壤所杨艳生、史德明研究员对南方花岗岩地区进行了调查, 得出在其他流失条件大致相同情况下, 土壤流失量与植被覆盖度的关系<sup>[10]</sup>, 由此可推出植被覆盖因子  $P$  值与覆盖度  $C$  的关系为:

$$P = 18982.63 C^{-2.3} \quad (6)$$

表 1 城市人为开发因子  $M$  值计算

河名	水土流失 试验斑块	$R$ 因子	$K$ 因子 $/(t \cdot km^{-2})$	$LS$ 因子 $/m$	$P$ 因子	$A$ 土壤侵蚀量 $/(t \cdot km^2 \cdot a^{-1})$	$M$ 值	$M$ 平均值
水径水	九矿开发区	68.78	0.01537	27.75	18982.63	54053	0.097	0.1252
简坑水	育马娱乐城	68.78	0.01537	15.30	18982.63	61367	0.1999	
石岩水	石龙工业区	52.89	0.01537	25.83	18982.63	31366	0.0787	

综合以上各河流域内的  $M$  值, 得出深圳城市土壤侵蚀人为开发因子  $M$  为 0.1252 ( $M$  为表示城市水土流失人为影响因子的概化值)。

## 1.3 侵蚀模型建立

已知侵蚀模型的基本方程为  $A = MRKLS P$  式中:  $A$ ——土壤流失量 ( $t/km^2 \cdot a$ );  $R$ ——降雨冲刷指数 ( $MJ \cdot mm/km^2 \cdot h \cdot a$ );  $K$ ——土壤可蚀性指数 ( $t \cdot km^2 \cdot h/km^2 \cdot MJ \cdot mm$ ), 取值 0.01 537;  $L$ ——坡长因子;  $S$ ——坡度因子;  $P$ ——植被覆盖因子,  $P = 18982.63 C^{-2.3}$ ,  $C$ ——植被覆盖度;  $M$ ——城市土壤侵蚀开发因子, 取值 0.125 235。

将各因子计算值代入公式, 得到简化侵蚀模型方程为:

$$A = 36.5389 RLS C^{-2.3}$$

据雨量分区分别进行计算, 对于 1 800 mm 年降雨量线以上的深圳雨量丰沛地区:

$$\begin{aligned} A_{\text{多雨}} &= M \times R_{\text{多雨}} \times K \times LS \times P \\ &= 2512.45 \times LS \times C^{-2.3} \end{aligned}$$

对于 1 800 mm 年降雨量线以西的深圳雨量较少地区:

$$\begin{aligned} A_{\text{少雨}} &= M \times R_{\text{少雨}} \times K \times LS \times P \\ &= 1932.00 \times LS \times C^{-2.3} \end{aligned}$$

## 1.4 侵蚀模型适用范围

该模型是建立在土壤侵蚀理论及大量实地观测数据统计分析的基础上, 模型建立以 USLE 为基

## 1.2.5 城市土壤侵蚀人为开发因子 $M$

由于深圳地区的水土流失主要是由人为作用所造成, 且有强度大、增加速度快等特点, 这与山区水土流失有很大不同。建立符合深圳的侵蚀模型, 就必须考虑城市化人为影响因子, 所以我们提出人为开发因子  $M$  来反映城市水土流失的人为影响。

$M$  因子主要体现场平工程、线性工程、采石取土等人为开发活动引起的产沙量大的特点, 代表城市水土流失的特征。目前尚不能对上述各类人为开发活动产沙量大的各个细节因素进行详细计算, 但可以通过已知土壤侵蚀模数的地块, 用城市土壤侵蚀模型反推而求之。本次利用 1995 年 3 个临时水保试验站(茶寮、沙吓苓、石岩)实地调查资料反推出  $M$  值, 计算结果见表 1。

础, 同时又考虑城市水土流失特点。根据调查水土流失斑块特性, 该模型适用范围也仅限于坡度小于  $15^\circ$ 、面积小于  $1 \text{ hm}^2$  的城市开发建设缓坡地。

## 2 模型实用性检验

侵蚀模型实用性检验是利用两组实测资料进行, 其一是采用观澜河流域茜坑水引水水渠历年泥沙清淤资料进行检验; 其二是采用布吉河水径支流历年清淤资料进行检验。

### 2.1 利用茜坑水泥沙量检验模型

茜坑水引水渠全长 850 m、宽 6 m、高 7 m, 位于茜坑水出口处, 接纳上游来水来沙, 并在汛期抽取观澜河水入茜坑水库。根据 2004 年我们对茜坑水库—引水渠区间的水土流失及斑块调查, 表明这一地区由于开发建设, 水土流失严重, 茜坑水库引水渠上游来沙在引水渠口大量淤积, 据清淤统计, 近期(1995~2003 年)年淤积量的变化范围为  $3\ 284 \sim 4\ 898 \text{ m}^3$ , 平均值为  $4\ 173 \text{ m}^3$ , 扣除 10% 的杂物, 则为  $3\ 756 \text{ m}^3$ , 折合  $4\ 695 \text{ t}$  (干容重取值为  $1.25 \text{ t/m}^3$ )。

利用建立的深圳土壤侵蚀模型推算出水土流失斑块产沙量为  $5\ 896 \text{ t}$ , 再乘以输移比 0.74(输移比 = 1995 年 3 个实验站实测河道泥沙量/实测产沙量), 得出进入引水渠的泥沙为  $4\ 363 \text{ t}$ , 与清淤值  $4\ 695 \text{ t}$  的误差仅为 7.07%。所以, 建立的城市水土

流失预报模型具有相对较高的实用精度。

### 2.2 利用布吉河水径支流清淤资料验证

水径支流是布吉河,同时也是全市水土流失最严重的地区之一。布吉水务所从 2000~2003 年每年都对水径支流清淤。最近一次清淤是 2003 年清淤量  $23\,670\text{ m}^3$ ,扣除建筑垃圾、生活垃圾等杂物后,则为  $17\,752\text{ m}^3$ ,折合  $22\,190\text{ t}$  泥沙(干容重取值为  $1.25\text{ t/m}^3$ )。

表 2 布吉河水径支流各流失斑块侵蚀量计算表

斑块编号	Bja			BJd				Bje	BJf				BJb			
	027	028	050	004	005	011	012	004	001	005	007	008	004	010	011	012
产沙量/t	1643	204	562	86.13	153	41.61	78	16217	2914	399	202.8	1389	110	34.82	84	1225

  

斑块编号	BJb																	
	015	014	016	018	019	020	021	022	023	028	029	030	031	032	033	054	065	076
产沙量/t	5472	7660	2402	6198	712	320	109	4155	433.6	146	234	116	142.5	193	107	191	25.47	82

比较模型计算结果和清淤统计结果,布吉河水径支流入河泥沙量模型计算值为  $19\,999\text{ t}$ ,河道清淤量为  $22\,190\text{ t}$ ,两者误差为  $9.87\%$ 。

## 3 结 论

深圳地区虽为全国城市水土保持工作的先行者,但土壤侵蚀模型尚未建立。在 USLE 的基础上,借鉴台湾侵蚀模型数据库建立模式,通过河道归槽泥沙量反推确定的侵蚀模型,能够较科学的反映出城市开发建设水土流失的特点。通过对茜坑引水渠和布吉水径支流泥沙量清淤值和模型计算值的对比,表明所建立的深圳城市土壤侵蚀模型的误差,均小于  $10\%$  ( $7.07\%$  和  $9.87\%$ ),说明精度良好,结果可信,可以为开发建设项目水土保持方案编制及土地利用规划提供依据。诚然,土壤侵蚀和水土流失规律是复杂的,模型中各因子之间的函数关系还需要在实践中进一步验证和优化,模型形式有待根据项目类别、立地条件特点统计出分类模型,需要在今后的水土保持工作中不断探索、总结。

根据 2004 年调查的水径支流水土流失斑块资料(表 2),利用建立的深圳侵蚀模型推算出水径支流水土流失斑块的产沙量为  $54\,052\text{ t}$ ,再乘以输移比  $0.74$  后,有  $39\,998\text{ t}$  泥沙进入河道,其中  $19\,999\text{ t}$  泥沙进入水径支流,另有  $19\,999\text{ t}$  泥沙进入布吉河干流(泥沙干支流分配取  $50\%$ ,由深圳河、布吉河二河干、支流清淤资料统计得出)。

### 参考文献:

- [1] 蔡强国,刘纪根.关于我国土壤侵蚀模型研究进展[J].地理科学进展,2003,22(3):242-250.
- [2] 宋颖.土壤侵蚀模型研究进展及发展方向[J].山西水利科技,2006,(3):39-41.
- [3] 中华人民共和国水利部,美国农业部.中美水土保持研讨会论文[C].北京,2003.
- [4] Wischmeier W H, Mannerling J V. Relation of soil properties to its erodibility[J]. Soil Science of American Proceeding, 1969, 33(1):15-17.
- [5] 于兴修,杨桂山.通用水土流失方程因子定量研究进展与展望[J].自然灾害学报,2003,12(3):14-18.
- [6] 林俐玲,林文弘.红壤可蚀性因子之量测[J].水土保持学报(台湾),1998,30(1):41-58.
- [7] 姚清尹.中国、加拿大国际合作项目-广东省花岗岩地区土壤侵蚀与整治总结[R].1989.
- [8] 郝明龙,党晨席,赵兵.深圳市四河流域入河泥沙量估算[R].深圳市水利规划设计院,2004.
- [9] 游松财,李文卿.水土流失之土壤侵蚀因子的计算[R].中国科学院自然资源综合考察委员会.
- [10] 杨艳生,史德明,南方花岗岩区的土壤侵蚀及其防治[J].水土保持学报,1991,5(3):63-72.