

# 山区高速公路弃土场形态研究及区域差异分析

董建志<sup>1,2</sup>, 张科利<sup>1,2</sup>, 张卫香<sup>3</sup>, 邵社刚<sup>3</sup>

(1. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学 地理学与遥感学院, 北京 100875; 3. 交通部公路科学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 公路弃土场水土流失是公路建设水土流失的重要组成部分, 弃土场的形态决定了其侵蚀特点, 因而对公路弃土场形态的合理评估与模拟是准确预测预报区域内公路弃土场水土流失量的前提。利用公路弃土场堆放的位置及地貌特点, 建立了估算区域弃土场形态的方法, 并使用常德至张家界高速公路的弃土场的设计资料对该方法进行了检验, 最后比较了东南丘陵区与西南山区在修建相同长度公路下所形成的弃土场的特点。结果表明, 用该方法所计算的弃土场高度来代替弃土场设计高度的平均相对误差为 37.67%, 计算高度与设计高度的相关系数为 0.94; 平均每修建 100 km 公路, 东南丘陵区所产生弃土量约为西南山区的 2.1 倍; 相对西南山区, 东南丘陵区弃土场呈现出多集中于沟谷, 弃土场个体体积较大, 高度较低, 数量较少的特点。

**关键词:** 弃土场形态; 地形特征; 区域差异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0163-05

中图分类号: S157.1

## Highway Waste Dump Shape and Regional Differences in Mountain Areas

DONG Jian-zhi<sup>1,2</sup>, ZHANG Ke-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Wei-xiang<sup>3</sup>, SHAO She-gang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China;

2. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 3. Research Institute of Highway Ministry Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Soil erosion of soil dump during highway construction is one of the most important parts of road erosion, and the terrain features of the dump determines its erosion characteristics. The evaluation and prediction of the dump shape is therefore the prerequisite for precise soil erosion estimation of the soil dumps. An approach was established to estimate the shapes of soil dumps according to the characteristics of highway excavation and soil piling, and it was then tested with the data obtained on Changde—Zhangjiajie Highway. At last, the regional differences of dump shapes were compared between southwest mountainous areas and southeast of China. The results show that the method well predicted the height of waste dumps, with a mean relative error of 37.67% and correlation coefficient of 0.94. The waste soil production during highway construction in the mountainous areas was 1.5 times more than that in the hilly regions. The waste dumps of the mountainous areas were mainly located in gullies and valleys, with relatively larger volumes and occupancy areas and lower heights.

**Keywords:** shape of waste dump; terrain characteristic; regional differences

随着我国经济发展, 公路事业的发展突飞猛进, 其建设规模在“十五”期间达到  $1.92 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, 并预计在“十一五”期间达到  $2.30 \times 10^6$  km<sup>2</sup> [1]。在为经济做出突出贡献的同时, 公路建设也引发了较为严重的水土流失问题, 据统计, 公路建设所引起的水土流失量占总水土流失量的 15.1% [1]。而弃土场是公路建

设重要的侵蚀单元之一 [2], 因而对公路弃土场水土流失量的准确计算是准确预报公路建设水土流失量的前提。目前国内外的研究多集中于单个弃土场水土流失量的计算与预测 [3-7], 其研究成果尚不能解决区域内公路弃土场的水土流失量计算的问题。弃土场水土流失量决定于其堆放形态特征, 包括受侵蚀面

收稿日期: 2010-08-23

修回日期: 2010-10-26

资助项目: 西部交通建设科技项目“山区公路弃土场设计与施工技术研究”(200731822313); 国家自然科学基金项目“西南喀斯特地区坡面土壤侵蚀机理及估算模型”(41071184)

作者简介: 董建志(1987—), 男(汉族), 辽宁省沈阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: dongjianzhi@163.com。

通信作者: 张科利(1962—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土壤侵蚀。E-mail: keli@bnu.edu.cn。

积、斜坡坡度和坡长等因素,研究并量化弃土场形态特征是进行区域弃土场水土流失准确预报的前提。

弃土场主要可分为平地弃土场、坡面弃土场、沟道弃土场、填洼弃土场共 4 类<sup>[8]</sup>。其中平地弃土场、坡面弃土场、沟道弃土场所造成的水土流失危害较大,本研究结合不同类型弃土场的堆放形态特点以及地形条件,重点讨论平地弃土场、坡面弃土场、沟道弃土场 3 种弃土场形态的估算方法。旨在提出推算区域弃土场形态与体积的模型及其方法流程,为比较我国公路弃土场的区域形态差异及弃土场水土流失量的估算提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 DEM 数据来源

本研究所使用的地形数据为中国科学数据服务平台所提供的分辨率为 30 m 的 DEM 数据,所选择的区域分别为四川省广元市至巴中市高速公路(105°45′—106°49′E, 31°49′32″—27′N)与湖南省常德至张家界市高速公路(110°29′—111°43′E, 29°1′—29°25′N)所对应区域。

### 1.2 弃土场体积与形态关系

1.2.1 平地弃土场 平地弃土场的形态可以简化为圆台形,并根据弃土场体积与其占地面积,建立弃土场体积与占地面积、高度及边坡比之间的关系:

$$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + Rr + r^2) \quad (1)$$

$$R = \sqrt{S/\pi} \quad (2)$$

$$r = R - \frac{h}{k} \quad (3)$$

式中: $V$ ——弃土场体积( $m^3$ ); $S$ ——弃土场占地投影面积( $m^2$ ); $h$ ——弃土场高度( $m$ ); $k$ ——弃土场边坡比; $R, r$ ——上、下底半径( $m$ )。

1.2.2 坡面弃土场 为了对坡面弃土场的形态进行简化,假设坡面弃土场的宽度是一致的,且下伏坡面简化为直线,简化后的坡面弃土场的纵、横断面形态可分别表示为图 1a 与图 1b。

根据弃土场体积和其占地面积可得出坡面弃土场体积与高度、占地面积、边坡比等之间的关系:

$$V = \int_0^{c_1} dx \int_{k_2 x}^{kx+h_0} dz \int_{\frac{x}{k_1} - \frac{w}{2}}^{\frac{x}{k_1} + \frac{w}{2}} dy + \int_{c_1}^{c_2} dx \int_{k_2 x}^h dz \int_{\frac{x}{k_1} - \frac{w}{2}}^{\frac{x}{k_1} + \frac{w}{2}} dy \quad (4)$$

$$c_1 = \frac{h-h_0}{k} \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{h}{k_z} \quad (6)$$

$$w = S/c_2 \quad (7)$$

式中: $V$ ——弃土场体积( $m^3$ ); $w$ ——弃土场宽度( $m$ ); $h$ ——弃土场高度( $m$ ); $h_0$ ——拦渣墙高度( $m$ ); $S$ ——弃土场占地投影面积( $m^2$ ); $c_1, c_2$ ——为图 1 中所标示位置( $m$ ); $k_z$ ——原坡面边坡比; $k_1, k$ ——弃土场边坡比。

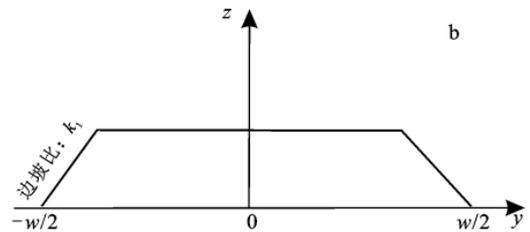
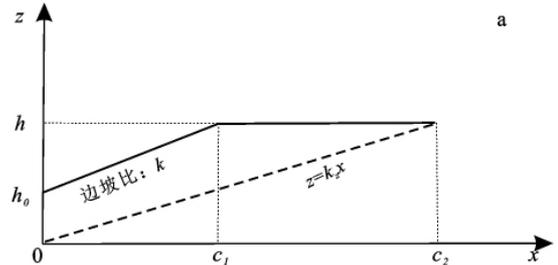


图 1 坡面弃土场形态简化(a:纵断面;b:横断面)

由于坡面弃土场形态较为复杂,对于占地面积较小而堆放体积相对较大的弃土场,即图 1 所示弃土场形态所能堆放的最大弃土体积小于实际堆放的弃土体积时,也可能形成形态如图 2 所示的弃土场。为了简化计算,首先通过计算在一定占地面积  $S$  下坡面弃土场所能堆放的最大体积,在此基础上进一步推算弃土场高度  $h'$ 。其参数意义与上述相同,计算方法与公式(4—7)相似。

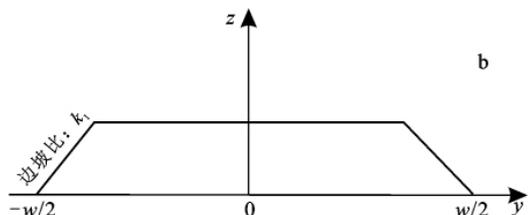
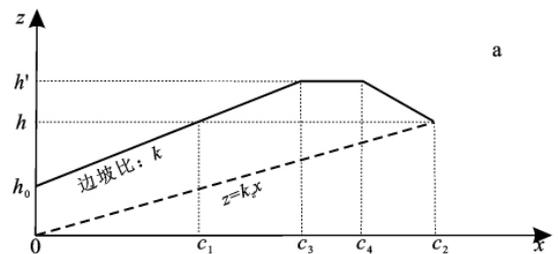


图 2 坡面弃土场形态简化(a:纵断面;b:横断面)

1.2.3 沟道弃土场 将沟道的横断面简化为“V”型,并以平均坡度代替,并将沟道纵断面简化为直线,其简化后的形态如图 3 所示。

由图 3 可见,影响沟道弃土场体积的因素较多,其中包括弃土场占地面积、高度、边坡比、沟道的横、纵断面坡度等,同时满足上述变量之间的关系较为困难。因而将沟道弃土场模型简化为弃土场体积与弃土场高度、边坡比及沟道横纵断面坡度之间的关系,其关系式可表达式为:

$$V = \int_0^{c_1} dx \int_{k_z x}^{k_x + h_0} dz \int_{-\frac{z}{k_1} - \frac{w}{2}}^{-\frac{z}{k_1} + \frac{w}{2}} dx + \int_{c_1}^{c_2} dx \int_{k_z x}^h dz \int_{-\frac{z}{k_1} - \frac{w}{2}}^{-\frac{z}{k_1} + \frac{w}{2}} dy \quad (8)$$

$$c_1 = \frac{h - h_0}{k} \quad (9)$$

$$c_2 = \frac{h}{k_z} \quad (10)$$

式中:  $V$ ——弃土场体积( $m^3$ );  $k_h$ ——沟道横断面边坡比;  $k_z$ ——沟道纵断面边坡比;  $k$ ——弃土场边坡比;  $h_0$ ——拦渣墙高度( $m$ );  $h$ ——弃土场的高度( $m$ )。

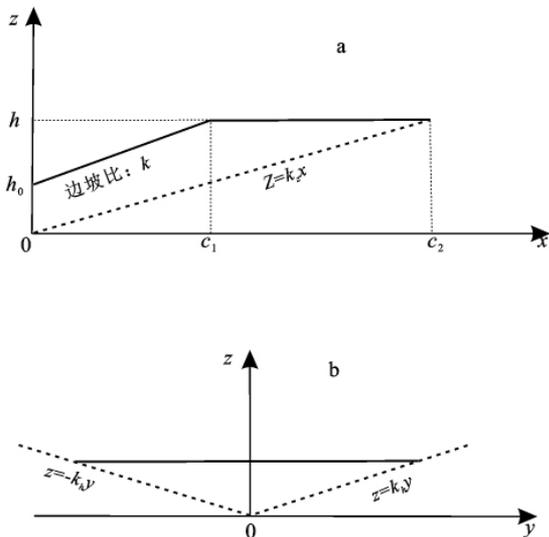


图 3 沟道弃土场形态简化(a:纵断面;b:横断面)

### 1.3 弃土量、弃土场数目及占地面积估算

使用回归分析分别建立常德至张家界及广元至巴中高速公路弃土量、弃土场数目、弃土场占地面积与公路长度之间的函数关系。

首先将各高速公路各个标段长度及其产生的弃土量、弃土场数目、弃土场占地面积分别进行累加,得出公路长度与各个参数之间的关系。为了简化计算,并认为当公路长度为 0 km 时,弃土量、弃土场占地面积、弃土场数目均为 0,因而均用过原点的一次曲线通过最小二乘法对公路长度与各个参数之间的关系进行拟合。

### 1.4 地形特征的提取方法

通过水文分析<sup>[9]</sup>,根据该区域的 DEM 提取其沟谷所在位置,并反复比较得出将积累流量阈值设定为 500~5 000 时与弃土场出现可能出现的位置较为一致。将二值化后的沟谷位置图转为 ASCII 文件,导入 Matlab,沿与沟谷垂直的方向,在每一点两侧分别提取 4 个栅格,作为该点的横断面位置(图 4),之后分别提取 DEM 沟道部分与沟道横断面中各点对应的横断面置的高程。

采用公式(11)分别计算沟谷横断面与纵断面的坡度。

$$\beta = \frac{180}{(n-1)\pi} \sum_{i=1}^n \arctan\left(\left|\frac{h_i - h_{i-1}}{30}\right|\right) \quad (11)$$

式中:  $\beta$ ——断面平均坡度;  $h_i$ ——第  $i$  点的高程( $m$ )。

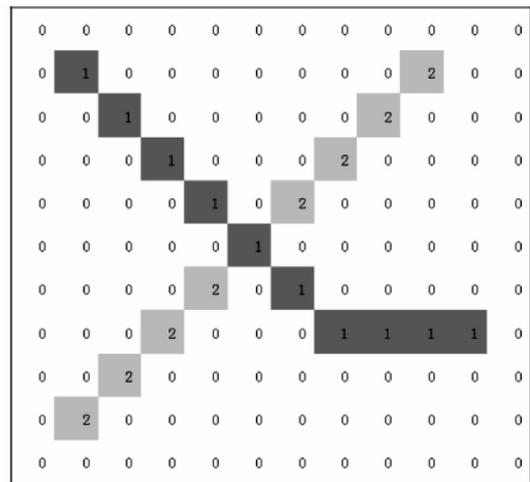


图 4 沟谷断面提取示意

注: 1 为沟谷位置, 0 为非沟谷位置, 2 为某一点对应横断面位置。

### 1.5 非线性方程组求解方法

对弃土场形态模拟通常是根据体积来求解其它参数的值,如已知弃土场体积求解弃土场高度或者边坡比等。而将公式(1),(4)及(8)表示为高度或边坡比的函数较为复杂,因而本研究通过构造函数(12)并使用二分法对其求解<sup>[10]</sup>。

$$F(\alpha) = f(\alpha) - V \quad (12)$$

式中:  $\alpha$ ——弃土场形态特征,如高度,边坡比等;  $f(\alpha)$ ——原函数。

### 1.6 模型其它参数的确定

通过确定体积,地形及边坡比等参数来分析区域内弃土场高度的变化情况。据统计,公路弃土场的边坡比在 1:1.5~1:2.5 之间,本研究将弃土场的边坡比  $k$  取其平均值,设定为 1:2;西南山区与东南丘陵区弃土场中平均石块比例均较高,相关研究表明含碎屑较高的堆积体休止角均在 30°以上<sup>[5,11]</sup>,因而取坡面弃土场侧面边坡比  $k_1$  为 1:1.7;由于沟谷平均

坡度受到极值影响较大,因而均以众数来表示沟谷的横、纵断面坡度;拦渣墙高度  $h_0$  取值为 5 m。

## 2 结果与分析

### 2.1 区域地形特征

通过 1.4 中的方法分别提取了四川省广元至巴中市高速公路与湖南省常德至张家界市高速公路所在区域的沟谷横断面平均坡度,并进行统计分析。结果表明,四川省广元至巴中市与常德至张家界高速公路所在区域横断面坡度与纵断面坡度相关性较小,相关系数分别为 0.129 与 0.177,可认为该两个区域沟谷的横断面与纵断面的边坡比是不相关的。广元至巴中高速公路所在区域的沟谷横断面的平均坡度为  $13.6^\circ$ ,众数为  $10.5^\circ$ ,标准差为  $7.7^\circ$ ;纵断面的平均坡度为  $11.2^\circ$ ,众数为  $5.7^\circ$ ,标准差为  $7.5^\circ$ 。湖南

省常德至张家界市高速公路区域的横断面的平均坡度为  $13.1^\circ$ ,众数为  $11.1^\circ$ ,标准差为  $7.9^\circ$ ;纵断面的平均坡度为  $8.6^\circ$ ,众数为  $3.8^\circ$ ,标准差为  $6.9^\circ$ 。

### 2.2 弃土场平均体积、数目及占地面积估计

通过统计文献<sup>[13-14]</sup>,可以得出弃土量与公路长度,弃土场占地面积与公路长度以及弃土场个数与公路长度之间的关系(表 1),以及不同形态弃土场的弃土量、占地面积、弃土数量所占总量的比例(表 2)。

表 1 弃土场体积、占地面积及个数与公路长度关系

参数	西南山区		东南丘陵区	
	关系方程	$R^2$	关系方程	$R^2$
弃土量/ $10^4 \text{ m}^3$	$y=2.339 0x$	0.972	$y=4.964 3x$	0.920
占地面积/ $\text{hm}^2$	$y=0.375 0x$	0.943	$y=0.999 4x$	0.908
弃土场数目/个	$y=0.411 6x$	0.966	$y=0.289 2x$	0.918

表 2 各类型弃土场面积、体积、个数所占比例

类型	体积比例/%		面积比例/%		数量比例/%	
	东南丘陵区	西南山区	东南丘陵区	西南山区	东南丘陵区	西南山区
平地弃土场	7.14	21.95	11.37	22.98	12.76	31.74
坡面弃土场	17.86	45.88	13.80	43.30	10.37	36.51
沟道弃土场	75.00	32.17	74.83	33.72	76.87	31.75

### 2.3 模型精度检验

使用上述模型对常德至张家界设计资料中的 7 个弃土场所可能出现的平均的高度进行计算,结果见表 3。

从表中可以看出,计算结果与设计结果平均相对误差为 37.67%,计算高度与设计高度的相关系数高达 0.94。表明使用该方法可以较好地反映出该区域内弃土场的高度与体积、边坡比、地形坡度等关系。

表 3 模型计算结果与设计结果比较

弃土场位置	地形	体积/ $\text{m}^3$	设计高度/m	计算高度/m	相对误差/%
黄家老屋	山坳	103 881	16	21.1	31.88
梅田谷	山坳	43 104	14	16.1	15.00
麦田湾	山坳	102 031	15	20.9	39.33
甘堰	山坳	24 643	10	13.6	36.00
石家荣	山坳	48 227	11	16.6	50.91
李家山	坡面	547 860	10	15.2	52.00
伊家方	河滩	59 780	7	9.7	38.57

### 2.4 弃土场形态预测及区域差异比较

根据表 1 计算可以得出,东南丘陵区平均每修建 100 km 公路将产生弃土场 29 个,弃土量  $4.96 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,占地  $99.93 \text{ hm}^2$ ,与西南山区相比,东南丘陵区产生的弃土场数目较少,而弃土量与占地面积分别为西南山区的 2.1 倍和 2.6 倍(表 4)。

通过计算可得出东南丘陵区 and 西南山区弃土场的平均体积、占地面积以及平均高度。由表 5 可见,东南丘陵区弃土场个体体积,占地面积均大于西南山区弃土场,而平地弃土场、坡面弃土场的平均高度均

小于西南山区,沟道弃土场的平均高度略大于西南山区,弃土场的总平均高度小于西南山区。

表 4 公路建设每 100 km 所产生弃土量,占地面积与弃土场数目

形态参数	东南丘陵区			西南山区		
	平地	坡面	沟谷	平地	坡面	沟谷
体积/ $10^4 \text{ m}^3$	34.75	89.35	372.32	51.46	107.59	74.85
占地面积/ $\text{hm}^2$	10.99	13.99	74.95	8.63	16.13	12.75
数量/m	4	3	22	13	15	13

表5 东南丘陵区与西南山区弃土场平均形态

形态特征	东南丘陵区			西南山区		
	平地	坡面	沟谷	平地	坡面	沟谷
平均体积/ $10^4 \text{ m}^3$	8.68	29.78	16.92	3.96	7.17	5.76
平均占地面积/ $\text{hm}^2$	2.75	4.66	3.41	0.66	1.08	0.98
平均高度/m	3.45	17.60	24.50	9.19	18.25	17.31

### 3 结论

(1) 使用该模型可以较为准确地估算出区域内弃土场的平均高度,对常德至张家界高速公路弃土场设计高度计算的平均相对误差为 37.67%。

(2) 平均每修建 100 km 公路,东南丘陵区所产生的弃土量约为西南山区所产生弃土量的 2.1 倍,占地面积约为西南山区的 2.6 倍,而西南山区所产生弃土场数目略多于东南丘陵区;东南丘陵区以沟道弃土场为主,而西南山区弃土场形态分布较为均匀。

(3) 东南丘陵区弃土场个体体积与占地面积均大于西南山区,而平地弃土场、坡面弃土场的平均高度均小于西南山区,沟道弃土场的平均高度大于西南山区。

(4) 区域地形条件的差异造成了公路建设所产生弃土量的差异,进一步形成了东南丘陵区与西南山区弃土场的形态的区域差异。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 余海龙,阿力坦巴根那,顾卫,等. 高速公路道路建设中土壤侵蚀问题研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 15-18.
- [2] 储小院,张洪江,王玉杰,等. 高速公路建设中不同类型弃土场的土壤流失特征[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(2): 102-106.
- [3] 肖建芳,张洪江,江玉林,等. 沪蓉西高速公路弃土场渣体侵蚀特征:以宜(昌)至长(阳)段为例[J]. 水土保持研究, 2007, 14(3): 121-123.
- [4] 高鹏,刘作新,于素荣. 高速公路建设区的水土流失与防治技术[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2005, 24(4): 543-545.
- [5] 史东梅. 高速公路建设中侵蚀环境及水土流失特征的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 5-9.
- [6] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia[J]. Applied Geography, 1995, 15(4): 309-323.
- [7] Ghose M K. Indian small-scale mining with special emphasis on environmental management [J]. Journal of Cleaner Production, 2003, 2: 159-165.
- [8] 田育新,李正南,周刚,等. 开发建设项目借土场、弃渣场的分类、选择及防治措施布局[J]. 水土保持研究, 2005, 12(2): 149-150, 153.
- [9] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社, 2006: 429-441.
- [10] 王正林,龚纯,何倩. 精通 Matlab 科学计算[M]. 北京:电子工业出版社, 2003: 181-183.
- [11] 李树武,聂德新,刘惠军. 大型碎屑堆积体工程特性及稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S2): 4126-4131.
- [12] 湖南省水利水电勘测设计研究院. 湖南省常德至张家界高速公路工程水土保持方案报告书[R]. 长沙:湖南省水利水电勘测设计研究院, 2002.
- [13] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. 四川省广元至巴中高速公路水土保持方案报告书[R]. 成都:公路规划勘察设计研究院, 2005.