

# 乔木侧根对土体的斜向牵引效应<sup>\*</sup>

## I 原理和数学模型

周 跃<sup>1</sup> 徐 强<sup>2</sup> 络华松<sup>2</sup> 李玉辉<sup>2</sup>

(1 云南省地理研究所 昆明 650223; 2 云南教育学院地理系 昆明 650223)

**提 要** 为证实植物侧根对周围土壤的斜向牵引效应是乔木根系抗蚀护坡机械效应的重要内容,以云南松林为例对这种效应及其量值进行了野外观测和模型计算,并对其在克服林地浅层坡面的不稳定性以及控制侵蚀保护坡面的作用进行了讨论。

**关键词** 乔木根系 牵引效应 侵蚀控制 模型计算

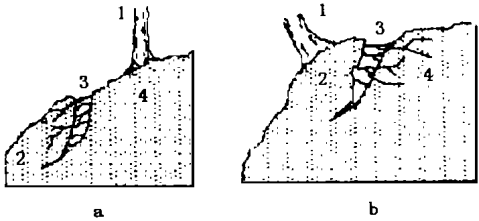
**分类号** 《中图法》S157

### 1 前 言

斜向牵引效应是指侧向伸延的根系(通常在浅层)以侧根牵拉力的形式提高根际土层斜向抗张强度从而提高土体抗滑力的作用。这里的根际土层可以理解为一个连续的并且具有增强了抗张强度的根土复合层。斜向牵引效应与赛德尔<sup>[1]</sup>提出的斜向增强作用相似。侧根的斜向牵引效应不同于垂直根的机械锚固效应;后者是通过提高根际土层在剪切面上的抗剪强度而达到加固土体的目的。如果把垂直根的效应看成是抗剪强度的增强作用,我们可以把侧根的斜向牵引效应理解为抗张强度的增强作用。

通常情况下,土壤滑动和蠕移可能首先在坡地表面产生若干张力缝隙<sup>[2]</sup>。在林地上,这些缝隙中从相对稳定土体延伸到潜在滑移土体中(或沿相反方向延伸)的侧根,通过本身的抗张强度和根土粘合力,具有牵制滑移和加固土体的作用(图1)。在这种情况下,侧根通过牵引效应增强了土体水平向抗滑力,提高了抗张强度,加固了根际土层。这种作用的强度与侧根的密度呈正比。

云南松(*Pinus yunnanensis* French.)广布于滇西北高山峡谷区,根系发达,垂直主根长1.2~1.5m。在地表面下40cm土层中,侧根密集,一般占总根系生物量的60%以上<sup>[3]</sup>。这些侧根顺坡伸延,相互盘绕,与土壤一起形成基本与坡面平行的根际土层。多数侧根从主根分出后向四周幅射,逐级分支,少有帚状根出现。基于这样的结构与分布特征,云南松侧根极可能具有明显的水平牵引效应,对高山峡谷陡坡侵蚀控制和坡面保护有重要意义。为了证明这个假设并进行定量分析,我们对虎跳峡地区云南松林进行了野外观测和模型预测。



a—来自稳定土体的侧根的作用  
b—来自滑动土体的侧根作用  
1. 松树; 2. 滑动地体; 3. 侧根和张力的缝隙; 4. 稳定土体

图1 浅层土体滑动与侧根的牵引效应  
Fig 1 Traction effect of lateral roots and sloping shallow soil layers

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(编号49201003, 49871054)、云南省应有基础研究基金(编号98D007M)、云南省科委主任基金(编号97D006R)、国家教委留学回国人员科研启动基金和英中文化协会联合资助项目。  
收稿日期: 1998-05-01; 改回日期: 1998-07-24。

2 研究方法

2.1 实验地选择

虎跳峡为 V 形峡谷, 坡度一般为  $30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。在强烈的重力和水动力作用下, 坡面物质强烈而又频繁地向下迁移。在多数地段坡面的不稳定性主要表现为表面及浅层的物质运动。作为该地区主要植被类型的云南松林分布在海拔 1 950 ~ 2 800m 的坡地上, 以西北岸为主, 多以纯林出现。林冠覆盖度为 50 ~ 90%。密林的垂直结构简单, 通常只有乔木层, 树高 8 ~ 12m, 胸径 10 ~ 20cm。林下灌木及草本稀疏。在峡谷西北岸的上中段, 我们选择了野外实验点, 海拔 2 480m, 坡度  $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ , 坡向 SE, 土壤为暗红壤, 粉壤土质地, 容重  $1.19\text{g}/\text{cm}^3$ 。在实验点, 我们选取了一块  $30\text{m} \times 40\text{m}$  的林地片段, 片段内的坡度、坡向、土壤条件和松林群落特征大致相同, 林冠覆盖度为 90%。实验期间, 10 ~ 20cm 深土层土壤湿度为 7.94%。

2.2 模型组建

Ennos<sup>[4, 5]</sup>, Waldron<sup>[6]</sup> 和 Wu<sup>[7]</sup> 曾提出了受牵拉单根与土壤的机械性相互作用的数学模型, 这些单根模型是本研究构建斜向牵引效应模型的基础。在建模当中, 我们把所有侧根设想为线性伸延的直根(野外观察证明这一假设对大多数侧根是真实的)并假定它们以同样方式参予牵引效应, 而且都在同一时候被拉断或拔出土壤。

土层中的单根在受牵拉时将持续产生一个牵引阻力( $F_T, \text{N}$ ), 直至侧根被拉断或拔出土壤; 牵拉力( $F_{pr}, \text{N}$ )与该  $F_T$  的大小相等方向相反。因此通过测算对侧根施加的  $F_{pr}$ , 可以确定侧根的牵拉阻力  $F_T$ 。在一给定面积的土壤横截面上由若干侧根产生的  $F_T$  的总量确定后, 该截面单位面积上侧根提供的  $F_T$ , 即根际土层抗张强度的增加值( $\Delta\tau_T, \text{kPa}$ )可由计算得到。该  $\Delta\tau_T$  即侧根斜向牵引效应的量值。野外实测发现, 云南松侧根大多受力拉断而不拔出土壤。因此本研究着重考查侧根在被拉断时需要的拉断力( $F_b, \text{N}$ ), 该力是侧根所能承受的最大牵拉力。

受力单根在拉断时, 拉断力  $F_b$  是根横断面积( $A_r, \text{mm}^2$ )的函数<sup>[9]</sup>

$$F_b = A_r \cdot T \tag{1}$$

式中的  $T$  是侧根抗张强度。通常情况下, 在给定面积的土壤垂直面上有许多条根穿过, 拉断所有这些根的总拉断力( $\Sigma F_b, \text{N}$ )受  $T$ 、 $A_r$  和侧根数目影响

$$\Sigma F_b = \Sigma(n_i \cdot F_{b_i}) = (\pi/4)\Sigma(n_i D_i^2 T_i) \tag{2}$$

$$T_i = F_{b_i} / A_{r_i} \tag{3}$$

式中  $n_i$  是在平均根直径组  $i$ (表 1)中的所有侧根数,  $F_{b_i}$  是直径组  $i$  中所有单根的平均拉断力  $F_b$ ,  $D_i$  和  $T_i$  分别是直径组  $i$  中侧根的平均直径和平均抗张强度,  $A_{r_i}$  为  $i$  组中侧根的平均横断面积。一旦得到  $\Sigma F_b$ , 在给定面积的土壤垂直截面上, 所有侧根被拉断从而使根际土层增加的斜向抗张强度的增加量可由下式获得

$$\Delta\tau_T = \Sigma F_b / A_b \tag{4}$$

式中  $A_b$  是给定土壤垂直横截面的面积( $A_b = 10^5 \text{mm}^2$ )。

为了确定上述公式中的  $T$  和  $n$ , 我们进行了土层中侧根分布和根抗张强度的实测。在选定的林地片段内开凿了 15 个随机分布的土壤垂直探槽, 槽宽 50cm, 深 120cm, 分为 6 个深度间隔: 0 ~ 20cm, 20 ~ 40cm, 40 ~ 60cm, 60 ~ 80cm, 80 ~ 100cm 和 120cm。探槽各深度间隔上的土壤横截面积是  $20 \times 50 \text{cm}^2$ 。侧根分布可以通过统计不同根直径组出露在不同深度间隔的  $A_b$  上的侧根数目  $n$  得到;  $n$  值越大则根密度越大。侧根密度以根面积比(MRA)表示, 它指全部侧根横断面积之和占  $A_b$  的百分比。 $T$  的求算要求两个实验点采集若干 10cm 长的根样并进行拉伸测试。10cm 长的根样分 5 个直径组: A 组(直径  $D$  为  $0 < D \leq 3\text{mm}$ )、B 组( $3 < D \leq 6\text{mm}$ )、C 组( $6 < D \leq 10\text{mm}$ )、D 组( $10 < D \leq 18\text{mm}$ )、和 E 组( $18 < D \leq$

30mm)。所有  $D \leq 6\text{mm}$  的细根在野外就地用标定后的数字式手称进行拉伸侧试,  $D \geq 6\text{mm}$  的根送实验室用 YG026—250 纤维张力仪测试。我们一共测试了 204 个有效样根(表 1)。

表 1 侧根拉断力与根直径的关系

Table 1 Relationship between the breaking force and the root diameter of the lateral roots

项 目	侧 根 直 径 分 组												
平均根直径 (mm)	1	2	3	4	5	61)	62)	7	8	9	12	14	17
根直径范围 (mm)	1	2±0.5	3±0.5	4±0.5	5±0.5	6±0.5	6±0.5	7±0.5	8±0.5	9±0.5	12±2	14±2	17±2
根样数量 (条)	17	40	31	43	23	9	6	5	2	6	10	6	6
平均拉断力 (N)	22.21	29.20	49.54	98.41	141.89	177.50	198.50	177.70	199.07	489.80	579.40	1094.20	1170.80
样方标准方差	1.12	1.23	2.29	3.09	6.0	2.95	36.06	5.32	0.99	170.47	63.79	283.93	307.76

1)在野外测量拉断力的 6mm 根样组; 2)在实验室测量拉断力的 6mm 根样组

3 结果与分析

3.1 云南松侧根抗张强度

采测的 10cm 侧根根样的直径范围为 0.5~19mm, 分布在 13 个直径区段(表 1)。

根据 204 条样根测算的结果,  $Fb$  与  $D$  有极高的相关性和紧密的回归关系:

$$Fb = 3.84D^2 + 10.15D - 13.06$$
$$(r = 0.975, n = 204)$$

(5)

与  $Fb$  不同, 根的抗张强度 ( $T$ ,  $\text{N}/\text{mm}^2$  或  $\text{MPa}$ ) 随  $D$  的增加而降低, 两者的变化关系见图 2。鉴于这样的关系, 本研究用一个指数函数(即  $Y = Ae^{B/X}$ )模拟  $T$  随  $D$  的变化。自变量  $X$  和因变量  $Y$  分别代表  $D$  和  $T$ 。用所有的  $D$  值和  $T$  值进行回归计算, 可得到常数  $A = 4.57$  和回归系数  $B = 1.73$   $D - Fb$  模拟回归关系可写为

$$Tm = 4.57e^{1.73/D} \quad (r = 0.987, n = 204)$$

(6)

式中  $Tm$  是  $T$  的模拟值, 随  $D$  呈指数关系减小。图 2 指出,  $Tm$  是  $T$  较好的逼近值, 确定系数  $r^2 = 0.974$ 。因此我们用  $Tm$  代替  $T$  进行  $Fb$  和  $\Sigma Fb$  的计算。

3.2 云南松侧根在土层中的分布

根据实验点的土壤探槽观测, 在 0~60cm 深度范围的根密度较大, 在给定的  $Ab$  上的侧根  $MRA$  值占全土壤剖面积的绝大部分(表 2)。

表 2 云南松侧根的分布和平均根面积比

Table 2 Distribution and mean root area ratio of the lateral roots of Yunan pine

土壤深度 cm	按根直径分组的各组侧根数量					平均根面积比 <sup>1)</sup> (%)
	1mm	4mm	8mm	14.5mm	24.5mm	
0~20	32.50	11.88	3.63	1.38	0.13	0.64
20~40	33.13	8.50	4.38	1.50	0.13	0.65
40~60	15.25	5.75	1.50	0.88	0.24	0.42
60~80	9.88	2.63	0.5	0.88	0	0.21
80~100	3.75	0	0	0	0	0.003
100~120	0.75	0	0	0	0	0.003

1)指在给定的土壤面积上给定根组中全部侧根横截面积之和占土壤面积的百分比。

3.3 云南松侧根的总拉断力及相应的牵引效应量值

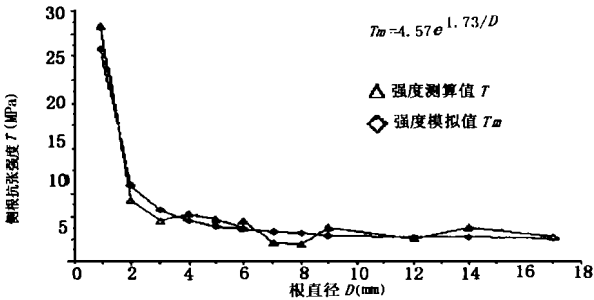


图 2 侧根抗张强度测算值与模拟值的比较以及它们随根直径的变化

Fig. 2 Comparison between the measure and calculation of the tensile strength of lateral roots

用公式(2)并以  $T_m$  代替  $T$ , 可以得到出露在给定土壤垂直截面上的全部侧根总拉断力  $\Sigma Fb$  (图3)。由于  $\Sigma Fb$  的存在, 侧根在不同深度不同程度地提高了根际土层的斜向抗张强度(图4)。根据公式(4),  $\Delta\tau_T$  的平均值在 0~20cm 和 20~40cm 分别为 41.69kPa 和 41.94kPa。

4 讨论与结语

在森林下的浅层土壤中, 树木的侧根组成了连续的和具有斜向牵引作用的根网, 对根际土层的强度有重要意义<sup>[8]</sup>。它对浅层滑坡, 特别是土壤蠕移的控制作用在新西兰已引起人们的注意<sup>[9]</sup>。小直径的侧根组成的密集根网如同具有斜向抗张强度的张力膜, 既加固根际土层, 又把下层土壤固持在原有位置<sup>[10, 11, 1]</sup>。这层张力膜的斜向加强与垂直根的垂直锚固作用共同加固坡面。人们已观察到, 在森林遭破坏后的山坡, 许多浅层滑坡的滑动面多发生在最大根系密集层与下层土体之间; 这一现象被认为是侧根与垂直根联合作用的佐证<sup>[12, 13]</sup>。人们指出<sup>[14, 15]</sup>, 根系对潜在滑动斜坡薄弱土层的斜向增强作用可能是克服浅层甚至是深层不稳定性的重要机制。

云南松的侧根具有一定的抗张强度, 在浅层土壤中形成了这样一个根网或张力膜。通过牵引效应, 这些侧根提高了根系土层的斜向抗张强度。野外观察发现, 在松林地段云南松垂直根系穿过上层土壤, 把斜向根网锚固到较深层和较稳固的土体上。在这个锚固作用的参予下, 云南松侧根在一定程度上具有克服浅层不稳定性例如浅层滑坡和土壤蠕移的。虎跳峡地区频繁的浅层侵蚀是峡谷坡面不稳定的主要表现, 因此林区云南松的斜向牵引效应对控制侵蚀和保护坡面有重要意义。

这一研究通过对云南松的考察证实了乔木树种的斜向牵引效应, 并且给出了它的预测值。在过去20年中, 国外对垂直根的机械增强作用已有不少研究和实验结果, 但对树木侧根的斜向增强作用却认识较少, 不但从未进行过模型预测和野外实测<sup>[8]</sup>, 而且对这种作用的力学机制也没有作过专门分析。本研究在国内外最早对乔木侧根的斜向机械增强作用(斜向牵引效应)进行了模型预测<sup>[16, 17]</sup>, 首次提出了云南松侧根的牵引效应量值。尽管还有待完善, 该研究成果为植物根系机械固土作用的研究提供了新思路和技术手段, 在水土保持和土木工程建设方面有重要意义。

致谢 作者感谢国家自然科学基金、云南省应用科学基学、云南省科委主任基金、国家教委留学回国人员科研启动基金和英中文化协会的资助和支持; 感谢云南省地理研究所和英国赫尔大学地理学院给予的帮助; 赫尔大学地理学院前院长 D. Watts 教授亲自指导了本研究的工作, 昆明理工大学土木工程系提供了有关设备并派人参加了野外测试; 还有美国俄亥俄州立大学的 T. Wu 教授, 英国曼切斯特大学生物系的 R. Ennos 博士及英国森林委员会的 C. Cutts 博士也对本研究给予了帮助与支持, 一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

[ 1 ] Sidle R. C. . A conceptual model of changes in root cohesion in respinse to vegetation management. *J. Environ. Quai*.1991. 20. 43~52.  
[ 2 ] 河南水利勘测设计院. 边坡工程地质. 北京: 水利出版社 1983.  
[ 3 ] 周跃, Effect of the Yunnan Pine(*Pinus yunnanensis* Franch.) on Soil Erosion Control and Soil Reinforcement in the

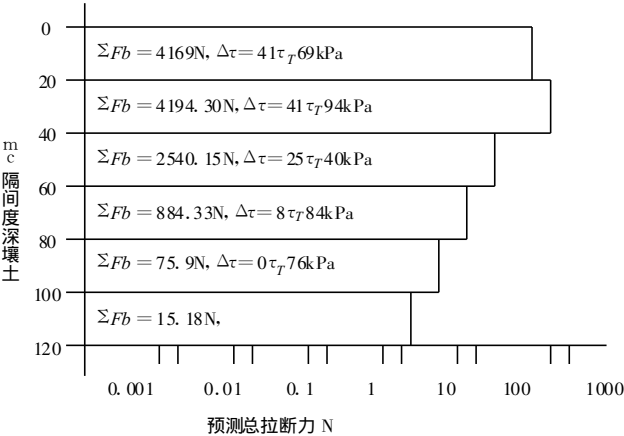


图 3 总拉断力和抗张强度增量  
Fig. 3 Breaking force and the increase of tensile strength

Hutiaoxia Gouthwest China. Ph. D Thesis. The University of Hull, March 1997.

- [ 4 ] Ennos, A. R. . The mechanics of anchorage in seedlings of sunflower, *Helianthus annuus* L. *New Phytol.* 1989. 113, 189~192.
- [ 5 ] Ennos, A. . R The anchorage of seedlings; the effect of rootlength and soil strength. *Analof Botany.* 1990. 65, 409~416.
- [ 6 ] Waldron, L. J. . The shear resistance of root permeated homogeneous and stratified Soil *J. Soil Sci. Soc. Am.*, 1977. 41, 843~9.
- [ 7 ] Wu, T. H. . Slope stabilisation. In: Morgan, R. P. C. and Richson, R. J. (eds.) *Slope Stabilisation and Erosion Control a Bioengineering Approach.* E & FN Spon, London, 1995. 221~263.
- [ 8 ] Coppin, N. J. and Richards, I. G. . Use of vegetation in civil engineering. CIRIA, Butterworths. 1990.
- [ 9 ] O'Loughlin, C. L. . Landslide and erosion in New Zealand' s steepplands. In *Symp. Effects of Forest Land USE on Erosion and Slope Stadiity*, Honolulu. 1984
- [ 10 ] O'Loughlin, C. L. . Tree roots and slope stability. *Whats new in Forest Research Institute*, 1981, No. 104.
- [ 11 ] Sidle, R. C. Pearce A. and O' Loughlin, C. L. *Hillslope Stability and land use.* Am. Geophy. Union. Water Resour. MONOGR. 11. AGU, Washington, DC.
- [ 12 ] O'Loughlin, C. L. Rowe, C. L. and pearce A. J. . Exceptional storm influences on slope erosion and sediment yields in smallforest catchments North Wetland, New Zealand. *Inst. Eng. Natl. Conf. Publ.* 1982. 82/ 6, pp 84~91. Barton, ACT, Australia.
- [ 13 ] Wu, T. H. and Swanston, D. N. . Risk of landslides in shallow soils and its relation to clearcutting in southeastern Alasa. *For. Sci.* 1980. 16, 495~510.
- [ 14 ] Swanson, F. J. and Wanston, D. N. . Complex mass movement terrains in western Cascade range, *Oregon. Rev. Eng. Geol.* 1977. Vol3, *Landslides.* pp113~124. Geol. Soc. Am. Boulder, CO.
- [ 15 ] Schroeder, W. L. The engineering approach to landslide risk analysis. In: Swanston D N (ed) *Workshop slope stability: problems and solutions in for. manage* pp43~55. Seattle, WA. 6~8Feb. 1985. USDA-For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-180. Pacific Northwest Res. Stn, Portland OR.
- [ 16 ] 周跃, 陈晓平, 李玉辉等. 云南松侧根的浅层加固潜能及其计算. *土壤侵蚀与水土保持学报*. 1998, 4 (5): 7~15.
- [ 17 ] 周跃, D. Watts 等. A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management*, 1998. 103. 107~120.

第一作者简介 周 跃, 博士, 研究员。1982 和 1985 年在云南大学获获植物学学士、植物生态学硕士学位, 1991 年在英国赫尔大学留学并获自然地理学博士学位, 之后留英工作至 1997 年。研究方向为植被侵蚀控制和坡面生态工程。1988 和 1989 年曾分别获得国家基金委青年基金和云南省应用基础研究基金资助, 主持开展了云南高山峡谷区土壤植被系统生态特征研究。1993 年以来又先后 4 次获得国家基金和云南省基金资助, 主持云南山地主要森林类型侵蚀控制机制及潜能和坡面生物工程原理方面的研究。

## TRACTION EFFECT OF LATERAL ROOTS OF TREES I PRINCIPLE AND CALCULATION

ZHOU Yue<sup>1</sup> XU Qiang<sup>2</sup> LUO Hua-song<sup>2</sup> LI Yu-hui<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> *Yunnan Institute of Geography, 20 Xuefu Road, Kunming 650223, P. R. China;*

<sup>2</sup> *Yunnan College of Education, 6 Xuefu Road, Kunming 650223, P. R. China)*

### Abstract

The use of vegetation has been a major approach in tackling the even more serious erosion problem in the upper stream of Yangtze River, Southwest China. An indigenous pine

tree(*Pinus yunnanensis* French, called ‘Yunnan Pine’) has been used as one of the best and most highly recommended species for this purpose, because its suitable bio-ecological characteristics. During the last few years large areas of suitable mountain slopes have been reforested, using this pine tree. However, the mechanical effect of this tree on erosion control is not clear, and lack of this knowledge has greatly hampered research and practice in conservation, using the pine forest. There is, therefore, a great and urgent need to investigate the role and the effects of the Yunnan pine, and this need is addressed in this paper.

A traction effect, arising from mechanical interaction between lateral roots and the soil, refers to the mechanical effect of lateral to horizontal roots, normally in shallow soil, to enhance the in-plane tensile strength of soil in the rooted soil zone. It is an important aspect of soil reinforcement, and believed to exist also in the Yunnan pine trees, which could be able to provide stabilizing role on the rooted soil, through their traction effect. This study further developed a model for quantifying the root traction effect, based on some previous models, which quantify the mechanical interaction between soil and single roots being extracted from the soil. To quantify the traction effect of the Yunnan pine, a number of coefficients were obtained from field. The quantification of this kind and the model developed are used for the first time in the world, and some preliminary results have been achieved.

According to some field samplings, the result indicates that the force required to break thin roots rises rapidly with an increase to the root diameter, and the root tensile strength decreased as the diameter increase. A mathematical strength-diameter relationship was obtained, with which and the examining results of root distribution in the soil profile, the potential magnitude of traction effect was predicted. The modeling results show that, in the upper soil layers(0~60cm), the lateral roots can provide an average pull-resistance force of up to average 3634.63N on a vertical cross-section area of 1000cm<sup>2</sup>. The total traction force is tremendous, up to 4169.44 N in the top depth interval of 0~21cm, and is even slightly higher in the interval of 20~40cm depth, corresponding to the denser roots there. The force then falls quickly with increasing soil depth and root density. Under the influence of the force, the lateral roots increase the tensile strength of the rooted soil to different extents at different depth intervals. The calculation shows that, the increased values of maximum tensile strength are most considerable at depths of 0~20cm and 20~40cm. The average increase is 36.35kPa. The results imply that, the lateral roots of trees, through their traction effect, are able to mitigate against shallow instability in the forested slopes, such as shallow slide and creep, at a certain degree.

**Key Word** Trees' lateral roots, Traction Effect, Erosion Control, Model Prediction