

植被对坡面防护作用的机理分析及定量估算

侍 倩¹, 刘文娟², 王敏强¹, 詹长久¹

(1. 武汉大学土建学院, 武汉 430072; 2. 郑少高速公路指挥部, 郑州)

摘 要: 概述了斜坡坡面侵蚀机理, 侵蚀的制约因素, 详细研究了植被对斜坡坡面防侵蚀能力提高所起的作用, 其突出贡献要从植被的水文效应和力学效应来分析研究。通过分析研究, 提出了斜坡抗侵蚀安全系数的估算公式, 并分别讨论了其中的修正系数的取值, 对工程实践有指导意义。

关键词: 植被; 防侵蚀能力; 水文效应; 力学效应; 定量估算

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)03-0126-04

The Mechanism Analysis and Quantitative Estimate of the Slope Protected by Vegetation

SHI Qian¹, LIU Wen-Juan², WANG Min-Qiang, ZHAN Chang-Jiu¹

(1. Civil and Construction College, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Command and Post of Zheng-shao Expressway, Zhengzhou 450020, China)

Abstract: The contents of the soil erosion mechanism and restricting factor of slopes are described. The role of vegetation in raising slope erosion-resistance capability is studied. The outstanding affection of the vegetation should be researched from hydrological effect and mechanical effect. By the analysis and research, we raise an estimated formula of the safety factor, and discuss how to choose the correct factor.

Key words: vegetation; erosion prevention; hydrological effect; mechanical effect; quantitative estimate

1 斜坡坡面侵蚀机理

雨水以及风对坡面的侵蚀过程是逐渐发生的, 是从小到大, 从片到面的过程。雨降于地表以后, 雨滴形成的飞沫侵蚀; 当降雨量大于土壤渗透能力的时候, 开始形成地表径流, 因此地表的细小泥沙被带走, 地表径流量大时, 带走的泥沙也多。随着侵蚀的进行, 地表上会见到小的凹凸不平的现象, 不久便形成小河一样的细流。其后, 一条较大的河流或者包括其它小河, 或者数条小河合流, 从而形成地表径流的集中, 因之侵蚀泥沙量亦随着增多, 形成大规模的沟渠。但当沟渠发展到某种程度后, 侵蚀力与抵抗力达到平衡后, 地表侵蚀不再发生。

所以说侵蚀过程就是侵蚀动力与侵蚀阻力在坡面上的土颗粒或土颗粒集合体间相互消长的过程, 这个过程作用的结果是导致土壤发生分散、输移、沉积。其中侵蚀动力包括: 雨滴击溅力和坡面径流。侵蚀阻力包括: 土壤黏结力和地表摩擦力。现分别叙述如下^[1]:

雨滴击溅力: 击溅力主要是用来破坏土壤黏结力, 使土壤分散、土粒移动; 此外还可以击实地表, 堵塞土壤下渗孔隙, 产生地表径流并扰动水流, 增加水流的紊流。击溅力的作用随时间的增长而减小, 但径流厚度逐渐增大, 水流对雨滴打击力的缓冲作用增强。当径流深超过三个雨滴直径时, 击溅力对坡面的作用就可以忽略了。

坡面径流力: 坡面径流力有下面两个作用: (1) 冲刷: 冲刷力的大小可以用其对土壤的剪切力来表示。土壤结构受剪切力破坏后就变成孤立的土粒, 其效果与击溅力作用相同。(2) 搬运: 径流的另外一个作用就是对坡面上因雨滴击溅力和冲刷力产生的孤立土粒进行搬运, 搬运能力的大小除与径流能量有关外, 还与径流流量关系密切。

土壤黏结力: 土壤黏结力可以表征土壤对水蚀动力的抵抗作用, 其大小与土壤种类、土壤机械组成、有机质含量、土壤密度等一系列因素有关。

地表摩擦力: 同种土壤, 在不同地表下, 当相同的降雨作

收稿日期: 2004-02-25

基金项目: 河南省交通厅科技攻关项目“郑州一少林寺高速公路路基边坡综合治理技术研究”(编号: 210231669)

作者简介: 侍倩(1968-), 女, 副教授, 博士, 现主要从事环境岩土工程、深基坑工程和道路工程方面的教学和科研工作。

用时产生的侵蚀输移结果差异很大; 同一地表, 因水流的不同(流量、流态、水深)也导致摩擦力的不同。

2 斜坡坡面侵蚀的制约因素分析

影响某一地区斜坡侵蚀程度的因素可分为自然因素和人为因素两类。自然因素包括地貌因素、地质因素和气候因素, 而人为因素主要是指人类征服和改造自然的各种活动^[2]。

2.1 自然因素

(1) 地貌因素: 地貌因素主要指斜坡条件, 包括坡度、斜坡的形状及坡长^[3]; 植被条件, 包括覆盖度、高度、根深度、根密度等; 地面破碎程度。

(2) 地质因素: 地质因素主要是指土壤性状和岩性条件的差异对坡面侵蚀的影响。

(3) 气候因素: 气候因素主要体现在降雨、温度的差异上。降雨对坡面侵蚀的影响主要有两方面, 一是降雨强度, 二是降雨量。而温度一般是通过间接作用来影响坡面侵蚀的。

2.2 人为因素

影响斜坡侵蚀的人为因素主要包括生态系统的破坏; 耕作方式的落后; 工程建设的影响; 现代城市的迅速发展等。

2.3 斜坡侵蚀是多因素间的相互关系

侵蚀的自然因素和人为因素并非孤立的, 它们之间相互联系相互制约, 只是在某一时间段或某种情况下, 一方起主导作用, 另一方作用居次而已。总之, 各因素之间的主次关系是随时空关系变化的。

各种不同的地质地貌和气候条件是容易发生侵蚀的自然基础。然而, 当植被良好的时候, 自然侵蚀及水土流失并不严重, 只有在人为因素参与之后, 尤其是生态系统遭到破坏后, 土壤的侵蚀作用才被加强。由此可见, 植被条件的好坏直接影响着土壤侵蚀的程度, 本文即是想从定量的角度研究植被减小坡面侵蚀作用的程度。

3 植被对坡面防护作用的分析

植被尤其是草本植被, 茂密的茎叶和根系分布在土壤表层, 对坡面的固土性及稳定性起到非常重要的作用。其突出作用是通过它的水文效应与力学效应来实现的。

3.1 植被的水文效应

在水文方面, 植被调节近地面气候、地表和地下水文情况, 使植被生长区的水循环途径发生一定的变化, 因而影响到侵蚀过程。

(1) 降雨截留。一部分降雨在达到土壤表面之前就被植被冠枝截留并有部分被暂时储存在植冠中, 以后通过蒸发和蒸腾作用重新回到大气中或者下渗进入土壤深层。植被通过截留作用降低了到达地面的降雨强度和有效雨量, 对控制侵蚀和保护坡面有重要意义。

(2) 削弱滴溅侵蚀。下落的雨滴在打击地表时把动能传递给土壤, 产生的分裂力量使土壤颗粒分离飞溅。在滴溅过程中, 雨滴动能越高, 撞击分裂力就越大, 被溅击的土粒数量就越多。事实上, 降雨强度主要就是通过影响雨滴对地面的

冲击来影响侵蚀和水土流失的。强度越大的雨滴对地面的冲击越强烈, 土壤侵蚀也就越严重。在同一地区, 降雨强度对侵蚀的影响要比降雨量的影响大^[4]。植冠的阻挡作用会使雨滴速度降低、雨滴数量减少, 从而降低雨滴击溅能, 减少土壤侵蚀。

(3) 增加土壤渗透, 抑制地表径流。植物根在生长过程中在土中挤出通道, 根衰老或死亡后枯萎而留出孔隙, 使地表径流能顺着枯萎的根系通道、根土接触面及孔隙渗入土壤。植物凋落的枯叶覆盖地面, 形成保护层, 在它们腐烂分化的过程中, 可以改善土壤的孔隙状况, 有利于水流的分散和入渗, 从而减少坡面径流量。生长良好的植被能够改善土壤性质, 有助于持续保持土壤的孔隙系统, 增加土壤透水性。

土壤入渗能力决定着降雨进入土壤的速度和数量, 不仅关系到植被当季或当年的水分供应, 而且也关系到来年能供给植物利用的深层土壤贮水的数量, 因此若植被生长良好则斜坡上的土—植被—水会形成良性循环, 保持水土作用显著。

(4) 控制土壤流失。如前所述, 降雨影响地面径流, 从而影响土壤流失。例如在黄土地区, 坡高在 2 以上的耕地, 距离分水线以下 10 m 处, 就开始发生细沟侵蚀; 5 以上, 则细沟侵蚀加强, 并开始发生浅沟侵蚀; 15 以上细沟及浅沟侵蚀强烈; 25 以上则极强烈, 并有切沟及冲沟出现; 35 以上土壤发生泻流; 45~75 陡地和沟壑可发生滑坡; 75 以上时可发生崩塌, 可见侵蚀程度之强^[5]。而植被的须根(根系)可以和表土紧密结合覆盖地面, 对于保持水土, 涵养水分是最有效的方法。调查研究可知, 在总降雨量为 340 mm 时, 土壤冲刷量农田为 345 g/m², 草地为 9.3 g/m² (仅为农田的 2.6%); 狗牙根草地比玉米地的保土能力大 300 倍, 保水能力大近 1 000 倍。

然而, 并不是任何覆盖度的坡面都具有很好的抵抗侵蚀能力, 只有盖度达到一定程度时, 才能从根本上减少侵蚀作用。例如, 当盖度小于 50% 时, 即使 15 min 的小雨也会产生边坡冲蚀。当盖度达到 85% 以上时, 坡面侵蚀很小, 几乎可以忽略。

(5) 土壤湿度调节。在生长着植被的土壤上, 有效水的消耗主要是由于植物的蒸腾作用引起的, 其耗水量往往大于地面蒸发。不同的植物类型, 其蒸腾耗水模式和耗水量差异很大。草皮、花卉、苗木等的根系较浅, 蒸腾耗水仅限于土壤表层, 耗水量也小些; 树木根系深, 蒸腾耗水范围可达地下 3~5 m 的深度, 且耗水量也大。显然, 植物对土壤湿度调节作用显著。在高温季节, 绿地内气温较非绿地低 3~5℃, 夏季绿地内湿度比非绿地相对湿度大 10%~20%, 绿地调节湿度的范围, 可达绿地周围相当于树高 10~20 倍的距离。

(6) 调节小气候, 减轻环境污染。植被能吸收太阳辐射, 降低温度, 增加相对湿度。凡是裸露地面, 其温度的上升和下降都很急剧, 空气湿度减少亦快, 这就是为什么市区气温普遍比郊区高 2~4℃。有植被的地方, 夏季气温较裸地低 8~10℃, 冬季则较裸地高 0.8~4℃; 夏季空气湿度比裸地高 10%~20%。植被又是很好的空气过滤器, 草坪上空的粉尘量仅为裸

地的 1/3~ 1/6, 即使冬季植物休眠期, 仍有良好效果。

3.2 力学效应

植被的力学效应源于植物体与土壤的机械相互作用, 具体包括根系的土壤加强作用、锚固约束作用、拱顶和土体支撑作用及表面根网作用。对于草本植物而言, 主要是土壤增强作用。根系对土壤的加强作用并非体现在增加土体内摩擦角上, 而是体现在增加土体的黏聚力上, 从而提高抗滑移抵抗力。

在植被覆盖的坡面上, 植物根系互相缠绕形成具有一定抗张拉强度的根系网, 将根际土壤固结为一个整体; 同时根系把浅层土壤锚固到深处较稳定的土层中去, 更增加了土体的稳定性。植被的这一作用在近地面土层非常重要, 表现为根密度越大而土壤越疏松, 密集根系可以加固疏松的土壤, 保护深层的土壤。

从图 1 中可以看出植被对土壤的加强作用, 图中 A₁ 区为柳树区, A₂ 区为荆豆和金雀花区, 试验是采用手动十字板进行的。

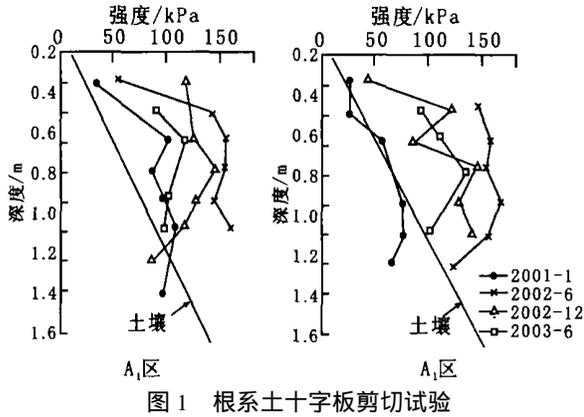


图 1 根系土十字板剪切试验

4 植被减小侵蚀的定量估算

为了定量分析坡面水流对边坡侵蚀作用的强弱, 我们假定: 坡面水流完全是在坡面上均匀降水形成的均匀流; 视坡面水流为坡面中心的质点; 坡面冲蚀的物质视为自坡面中心落到坡脚的质点。

坡面的侵蚀取决于坡面水流的强弱和坡面土颗粒与土体间结合力的强弱等多种因素的相互作用。如前所述, 坡面侵蚀过程就是侵蚀动力与侵蚀阻力在坡面上土颗粒或土颗粒集合体间相互消长的过程, 其中侵蚀阻力包括: 土壤黏聚力和地表摩擦力; 侵蚀动力包括: 雨滴击溅力和坡面径流。

不论侵蚀动力还是侵蚀阻力, 都主要与斜坡条件、降雨条件、植被条件有关。斜坡条件包括坡度、形状及坡长。斜坡的坡度越大, 越易产生径流; 而斜坡的形状不同, 也会导致径流对土壤侵蚀程度的不同, 凸形坡有利于径流分散, 凹形坡则有利于径流汇集; 在其它条件相同的条件下, 斜坡高度越大, 坡长越长, 水流的侵蚀能量越大。降雨对侵蚀的影响主要是, 一是降雨强度, 二是降雨量。降雨强度越大的雨滴对地面的冲击越强烈, 侵蚀越严重; 在同一地区, 降雨强度对侵蚀的影响要比降雨量的影响大, 当然, 降雨时间越长则侵蚀越严重。至于植被条件的影响前已详细论述, 不再多论。根据我们

的分析和研究, 认为为了定量分析坡面的抗侵蚀安全程度, 用式(1)的抗侵蚀安全系数来表达:

$$\eta = \frac{\text{侵蚀阻力}}{\text{侵蚀动力}} = \frac{\text{土壤黏聚力} + \text{地表摩擦力}}{\text{雨滴击溅力} + \text{坡面径流}} \quad (1)$$

(1) 土壤黏聚力估算:

$$T = (\delta R_T + R'_T) \quad (2)$$

式中: T ——土壤黏聚力, kN; δ ——修正系数; R_T ——土壤的抗拉强度, kPa; R'_T ——由于植被根系作用而增加的抗拉强度, kPa;

$$R'_T = \Omega h A f d / k \quad (3)$$

式中: h ——草的长度, cm; A ——草的覆盖面积, cm²; f ——草及腐质层的纤维密度; d ——根的深度, cm; k ——草的柔度或韧性; Ω ——根系作用修正系数。

(2) 地表摩擦力估算:

$$F = \alpha \cdot M \cdot \cos\theta \cdot \mu + \tau \quad (4)$$

式中: F ——地表摩擦力; M ——侵蚀到坡脚的土颗粒的质量, kg; θ ——边坡倾角; μ ——摩擦系数, 取值范围 0.45~ 0.5; α ——经验系数; τ ——草根提供的摩擦力, 大小为 3~ 5 kPa。

(3) 雨滴击溅力估算:

$$P = s \cdot v' \cdot N' \cdot M \quad (5)$$

式中: P ——雨滴击溅力; s ——降雨强度; v' ——植被影响下的降雨速度; N' ——受植被影响的雨滴数; M ——土粒质量。

(4) 坡面径流力估算:

$$Q = m g \sin\theta \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中: Q ——坡面径流; m ——坡面水流质量; θ ——坡角; Δt ——降雨时间, min。

(5) 关于各修正系数:

关于土壤黏聚力修正系数 δ , 可根据 Davidenkoff 公式近似估算, 作者经分析研究和对比认为, δ 值可取 1.5。

关于植被根系作用修正系数 Ω , 从式(3)中可见, 与草的长度、深度、纤维密度和盖度成正比, 而与草的韧性成反比, 因此 Ω 的大小应根据植草类型等经试验确定。

关于地表摩擦力经验系数 α , 这是由于草根作用而产生的影响系数, 取值范围 0.6~ 0.65。则式(1)可以改写为:

$$\eta = \frac{F+T}{P+Q} = \frac{\delta(R_T+R'_T) + (\alpha M \cos\theta \cdot \mu + \tau)}{s \cdot v' \cdot N' \cdot M + m g \sin\theta \cdot \Delta t} = \frac{\delta(R_T + \Omega \cdot h A f d / k) + (\alpha \cdot M \cos\theta \cdot \mu + \tau)}{s \cdot v' \cdot N' \cdot M + m g \sin\theta \cdot \Delta t}$$

5 小结

本文首先分析了坡面侵蚀实质上是侵蚀动力与侵蚀阻力在坡面上相互消长的过程, 而这种程度的强弱取决于自然因素和人为因素之间相互关联相互制约的关系。要想减轻坡面侵蚀, 植被是有效的方法, 而植被的贡献来自于它的水文效应与力学效应。在分析研究了以上内容后, 推导出了估算坡面抗侵蚀的安全系数的计算公式, 此公式对判断坡面的侵蚀有其实用价值的理论意义。不过, 有些修正系数的确定还需进一步研究。

参考文献:

[1] 赵晓光, 吴发启 坡面水蚀过程的力能体系及研究思路[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 23- 25
 [2] 周健, 吴世明, 徐建平. 环境与岩土工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
 [3] 陈业裕, 黄昌发. 应用地貌学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1994
 [4] 谭继清, 刘建秀, 谭志坚. 草坪地被景观设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
 [5] 崔晓明, 方怀龙. 城市绿地土壤及其管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.

(上接第 16 页)

按同样的方法可以计算出天津市各年份水资源承载力 b_j 都是各个评价因素共同影响的结果, 根据 B 中各 b_j 的数值见表 2, 矩阵 B 中所有元素与对应的 α_j 值即可推求出水资源承载能力的综合评分值。

表 2 天津市水资源承载能力的综合评价结果

年份	方案 I				方案 II			
	V_1	V_2	V_3	评分值	V_1	V_2	V_3	评分值
2001 年	0.197	0.662	0.141	0.525	0.197	0.662	0.141	0.525
2005 年	0.121	0.723	0.156	0.484	0.386	0.556	0.058	0.648
2010 年	0.067	0.765	0.168	0.455	0.376	0.542	0.082	0.632
2030 年	0.027	0.674	0.299	0.378	0.368	0.440	0.192	0.579
2050 年	0.027	0.609	0.364	0.348	0.379	0.357	0.265	0.552

表 2 的评判结果表明: 现状年(2001 年)的水资源开发利用已经达到相当规模。水资源承载力综合评价结果 b_j 对 V_2 的隶属度很大, 在现有经济技术条件下, 水资源承载潜力已相对较小, 水资源供需矛盾突出。由于受地下水的大量超采, 水环境破坏, 本地水资源进一步开发利用潜力很小。从社会、经济的进一步发展和保护生态环境出发, 提高水资源承载能力的根本措施是加强全面节水战略的实施, 合理利用本地水资源并实行引、提黄河水工程。

方案 1: 由于人口、社会的发展, 需水总量的逐年增加, 在没有引用黄河水资源的情况, 天津市本地的水资源量已经很难承受社会发展对水资源的需求, 水资源承载力逐年下降, b_j 对 V_1 的隶属度由现状年(2001 年)的 0.197 下降到 2050 年的 0.027, 而对 V_3 的隶属则由 0.141 上升到 0.364, 承载力综合评分值也从 0.525 下降到 2050 年 0.348, 届时水

资源因素将严重制约着天津市的发展。

方案 2: 由于 2005 年前禹门口提水工程的投入使用, 天津市供水量的迅速增加, 水资源承载力得到了很大的提高, 对 V_1 的隶属度由现状年的 0.197 提高到 0.386, 相应的综合评分值也从 0.525 提高到 0.648; 2005 年以后, 虽然引用黄河水量在不断增加, 但由于社会的迅速发展, 需水总量也快速增加, 水资源利用率进一步加大, 天津市水资源承载力综合评分值一直呈下降趋势。但水资源承载力对于 V_1 的隶属度在 2030 年后开始增加, 虽然对 V_3 的隶属度也在增加, 但水资源承载力的综合评分值减少的速度趋于缓和, 2050 年的水资源承载力仍将高于现状年的承载力。2050 年以后随着农业、工业需水零增长期的到来, 需水总量将趋于稳定甚至减少, 天津市水资源承载力有望得到提高。

参考文献:

[1] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 262- 269
 [2] 王煜, 杨立彬, 张海新, 等. 西北地区水资源可利用量及承载能力分析[J]. 人民黄河, 2002, 24(6): 10- 12
 [3] 周爱国, 徐恒力, 甘义群, 等. 西北地区水资源- 生态可持续发展的若干问题探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(5): 419- 425
 [4] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. 27- 59
 [5] 山西省农业区划委员会. 山西省农业自然资源丛书- 运城地区卷[M]. 北京: 中国地图出版社, 1991. 158- 192
 [6] 卞建民, 杨建强. 水资源可持续利用评价地指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 43- 45
 [7] 徐良芳, 冯国章, 刘俊民. 区域水资源可持续利用及其评价指标体系研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 119- 122
 [8] 水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. 78- 103
 [9] 朱玉仙, 黄义星, 王丽杰. 水资源可持续开发利用综合评价方法[M]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1): 55- 57
 [10] 许有鹏. 干旱区水资源承载力综合评价研究- 以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229- 237
 [11] 余卫东, 闵庆文, 张建新. 天津市水资源供需平衡的趋势预测及其对策研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 55- 60