

工程堆积体土壤侵蚀测算 技术研究

汇报人：谢永生

水利部水土保持生态工程技术研究中心

中科院水利部水土保持研究所

2014-10-11

汇报提纲

- 1、项目简介
- 2、研究目标
- 3、研究思路
- 4、技术路线
- 5、工作方案
- 6、研究进展及成果
- 7、研究成果的推广意义

一、项目简介

本项目由水利部公益性行业专项支持：由泥沙中心宁堆虎主任负责牵头。

由中科院水利部水保所、中国水科院、长科院水保所、中科院寒旱所、水利部泥沙中心五单位联合研究。

我们承担“工程堆弃体水土流失测算研究”。

工作分两阶段开展：

2010~2011年 预研阶段

2012~2014年 研究阶段

执行期5年。

二、研究目标

研究不同类型工程堆积体水土流失量及其影响因子。

建立工程堆积体水土流失测算模型，确定模型参数定值方法。

通过模型情景分析和计算，提出工程堆积体水土流失量测算技术规范草案。

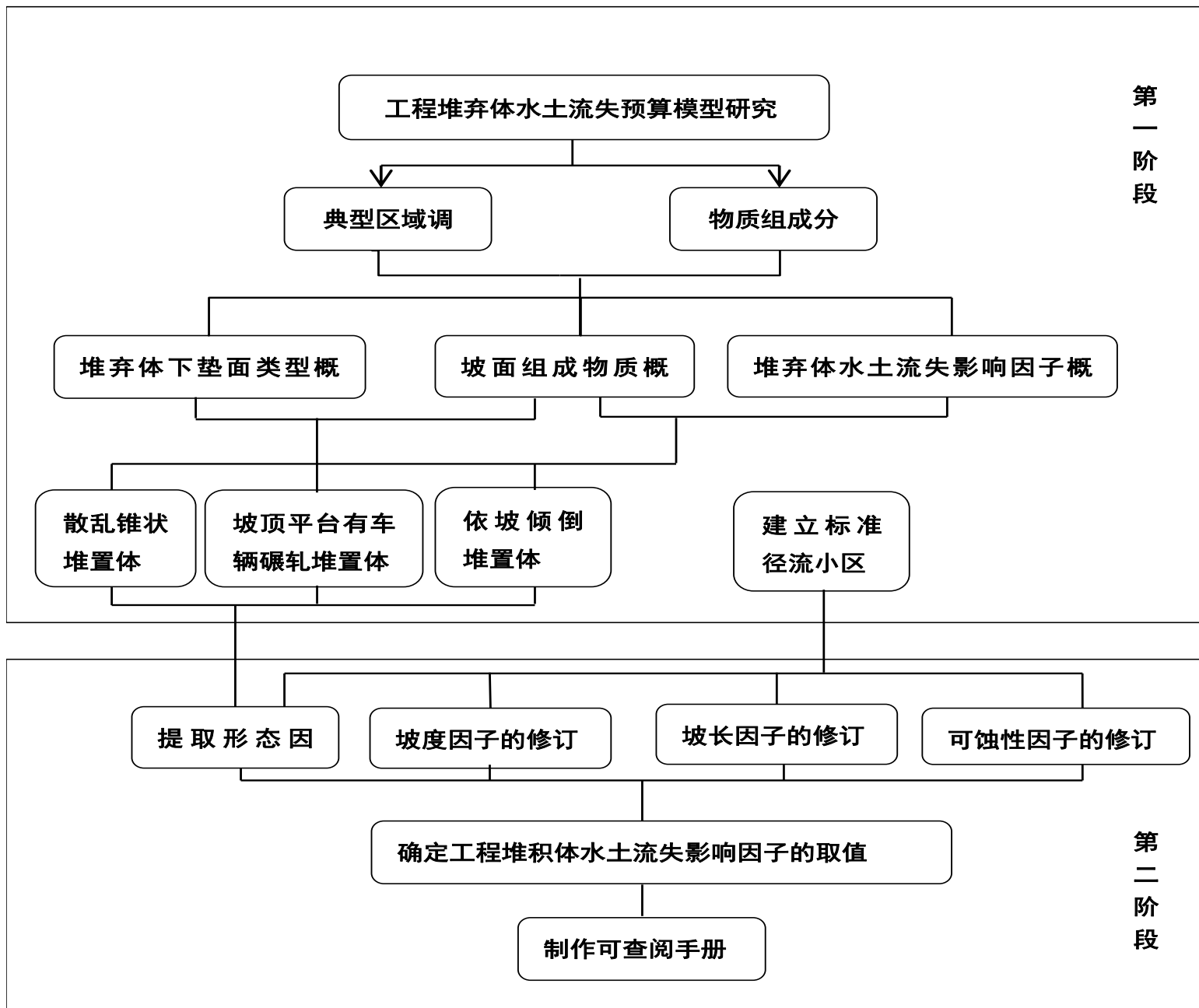
为工程建设项目水土流失量预测、防治措施布设及水土保持监督执法提供科学依据和技术支撑。

三、研究思路

研究思路与技术路线

- 首先：开展堆弃体下垫面形态概化研究，确定不同形态堆弃体下垫面及参数。
- 其次：开展不同形态堆弃体流失规律概化研究，依据不同形态下垫面水土流失规律分异，确定标准堆置体下垫面。
- 第三：设定堆弃体标准小区，对下垫面可蚀性、坡度、坡长等因子进行修订研究，获取模型相关参数取值依据。
- 第四：与野外试验研究小区观测结果对比分析，进一步对模型进行验证。
- 第五：确立评估方法和预测模型，形成试验标准和技术标准。
- 第六：确立不同类型区不同下垫面开发建设项目堆弃体水土流失预报手册。

技术路线



第一阶段

第二阶段

五、工作方案

(1) 室内模拟试验研究工作

团队一： 主要承担堆置体类型概化以及不同工程堆积体类型水土流失特征的概化研究工作，探究不同类型堆置体形态的土壤侵蚀量差异，最终确定模型中形态因子的取值。

团队二： 主要承担标准下垫面水土流失预报模型中各因子修订研究，并最终确定模型各个参数的取值。

(2) 室外观测试验



(3) 室内观测试验



六、研究进展及成果

版块一

不同堆置体类型水土流失规律研究

- 下垫面概化及不同类型堆置体水土流失规律概化研究
- 针对概化结果深入研究不同质地类型水土流失规律
- 形态因子的确立

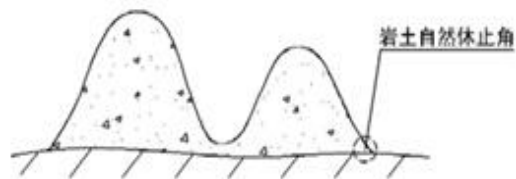
版块二

标准下垫面水土流失影响因子修订研究

- 可蚀性因子
- 坡度因子
- 坡长因子

版块一

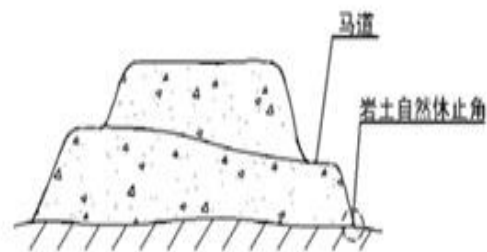
不同堆置体类型水土流失规律研究



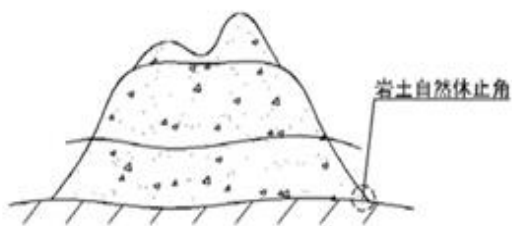
a 散乱锥状堆置



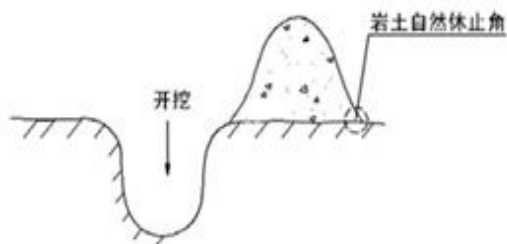
b 依坡倾倒堆置



e 坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置体



c 分层碾压坡顶散乱堆置



d 线性陇岗式堆置

5中不同类型堆置体类型示意图

堆置体侵蚀产沙特征值方差分析（土石比8:2）

堆置类型	降雨强度 (mm/min)	平均径流率 (L/min)	平均侵蚀速率 (g/min)
散乱锥状堆置	1.0	2.57bB	29.84bB
分层碾压坡顶散乱堆置		2.66 bB	29.90 bB
线型垅岗式堆置		3.51 aA	31.49 bB
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		2.69 bB	38.05 aA
散乱锥状堆置	1.5	4.58 bB	56.43 bB
分层碾压坡顶散乱堆置		4.68 bB	56.35 bB
线型垅岗式堆置		4.13 bB	56.37bB
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		5.81 aA	69.03 aA
散乱锥状堆置	2.0	5.50 aA	81.81bB
分层碾压坡顶散乱堆置		5.56 aA	82.49 bB
线型垅岗式堆置		5.54 aA	86.98 bB
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		5.91 aA	107.31 aA
散乱锥状堆置	2.5	6.27 cB	102.29 bB
分层碾压坡顶散乱堆置		6.28 cB	101.33 bB
线型垅岗式堆置		7.43 bB	108.81 bB
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		8.86aA	187.54 aA

堆置体侵蚀产沙特征值方差分析（纯土）

堆置类型	降雨强度 (mm/min)	平均径流率 (L/min)	平均侵蚀速率 (g/min)
散乱锥状堆置	1.0	1.04 c	33.24 b
分层碾压坡顶散乱堆置		1.16 c	33.54 b
线型垆岗式堆置		3.48 a	39.57 a
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		2.79 b	30.16 c
散乱锥状堆置	1.5	4.16	83.65 a
分层碾压坡顶散乱堆置		4.37	75.24 ab
线型垆岗式堆置		4.47	67.18 bc
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		4.54	58.31 c
散乱锥状堆置	2.0	5.70	120.01 b
分层碾压坡顶散乱堆置		6.24	120.41 b
线型垆岗式堆置		7.19	117.22 b
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		5.83	148.94 a
散乱锥状堆置	2.5	7.36 b	169.09 b
分层碾压坡顶散乱堆置		8.06 ab	171.94 b
线型垆岗式堆置		9.26 a	169.79 b
坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置		9.93 a	182.07 a

堆置体水土流失规律概化研究

根据纯土堆置体和8:2土石比堆置体径流率和侵蚀速率的相关性方差分析结果得出：

(1) 散乱锥状堆置、分层碾压坡顶散乱堆置和线型垅岗式堆置3种堆置类型在不同雨强下无显著差异。

(2) 坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置与其它3种堆置体类型有着显著差异，雨强较大时表现更明显。

因此，将前三种形态合并为一种，并在后期检验性试验中核实了其可行性。

堆置体水土流失规律概化结果

经过3年的研究，最终确定标准堆置体下垫面类型为：

- 1、散乱锥状堆置体下垫面
- 2、坡顶平台碾压堆置体下垫面
- 3、依坡倾倒堆置体下垫面

上述三种堆置体类型代表堆置体形态参与预测模型的建立。

标准堆置体下垫面土壤侵蚀规律

实验设计

下垫面类型	坡度 (°)	土壤质地 类型	土石比	降雨强度 (mm/min)	试验 场次
散乱锥状堆置	33±2	轻壤、重壤、 粘土	10: 0, 9: 1, 8: 2, 7: 3	1.0、1.5、2.0、 2.5	48
坡顶平台有车辆碾 压的倾倒堆置	33±2	轻壤、重壤、 粘土	10: 0, 9: 1, 8: 2, 7: 3	1.0、1.5、2.0、 2.5	48

在前面概化的基础上设计试验，结果表明：

- (1) 各类型堆置体的径流率和侵蚀速率均随降雨强度的增大而增大，随着土石比的减小而减小。
- (2) 各类型堆置体总产沙量随着降雨强度的增大而增大；随着土石比的减小，堆置体的总产沙量也逐渐减小。

版块二

标准下垫面水土流失预报因子修订研究

标准小区的确定

- ◆ 本文在借鉴USLE/RUSLE中对标准小区和坡长因子定义的基础上，对我国各类工程堆积体水蚀测算模型选定的标准小区和地形坡长因子做了如下定义：
- ◆ **标准径流小区**：规定坡度为 25° ，坡长为20 m，裸露的工程堆置体作为我国各类工程堆置体水土流失研究的标准小区。

实验完成情况

试验完成情况表

	坡长修订试验				可蚀性试验（场）	
	3m	5m	6.5m	12m		
重壤土	16	16	16	16	-	16
轻壤土	-	-	-	-	16	-
粘土	5	-	5	6	-	16
合计						136

2014年9月，于水土保持研究所人工模拟降雨大厅完成人工模拟降雨试验，实际完成136场。



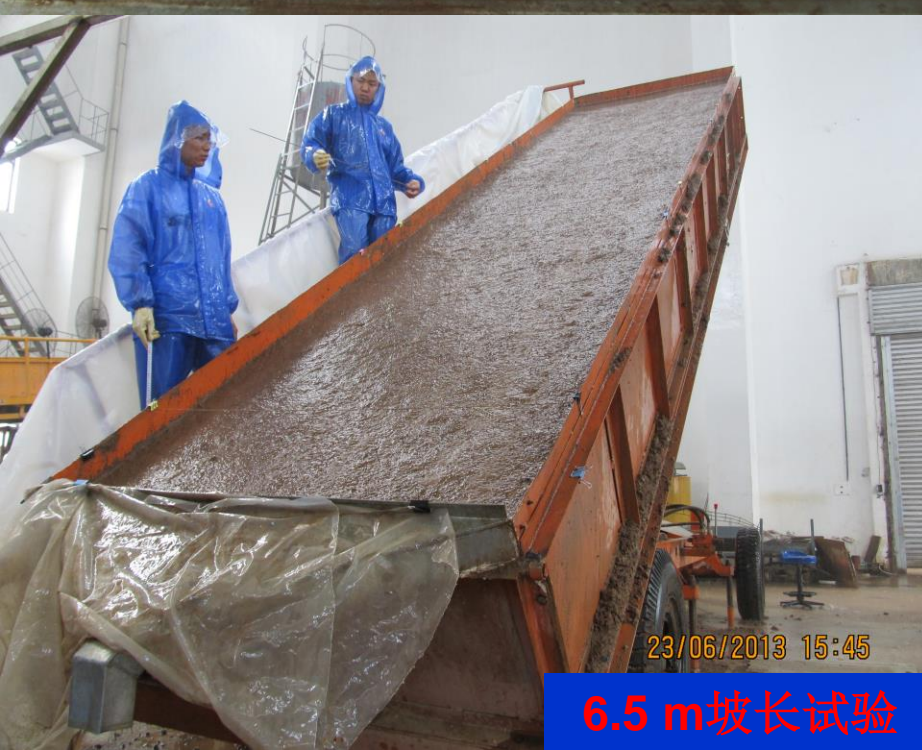
3 m坡长试验

12/09/2013 15:27



5 m坡长试验

04/06/2013 16:03



6.5 m坡长试验

23/06/2013 15:45



12 m坡长试验

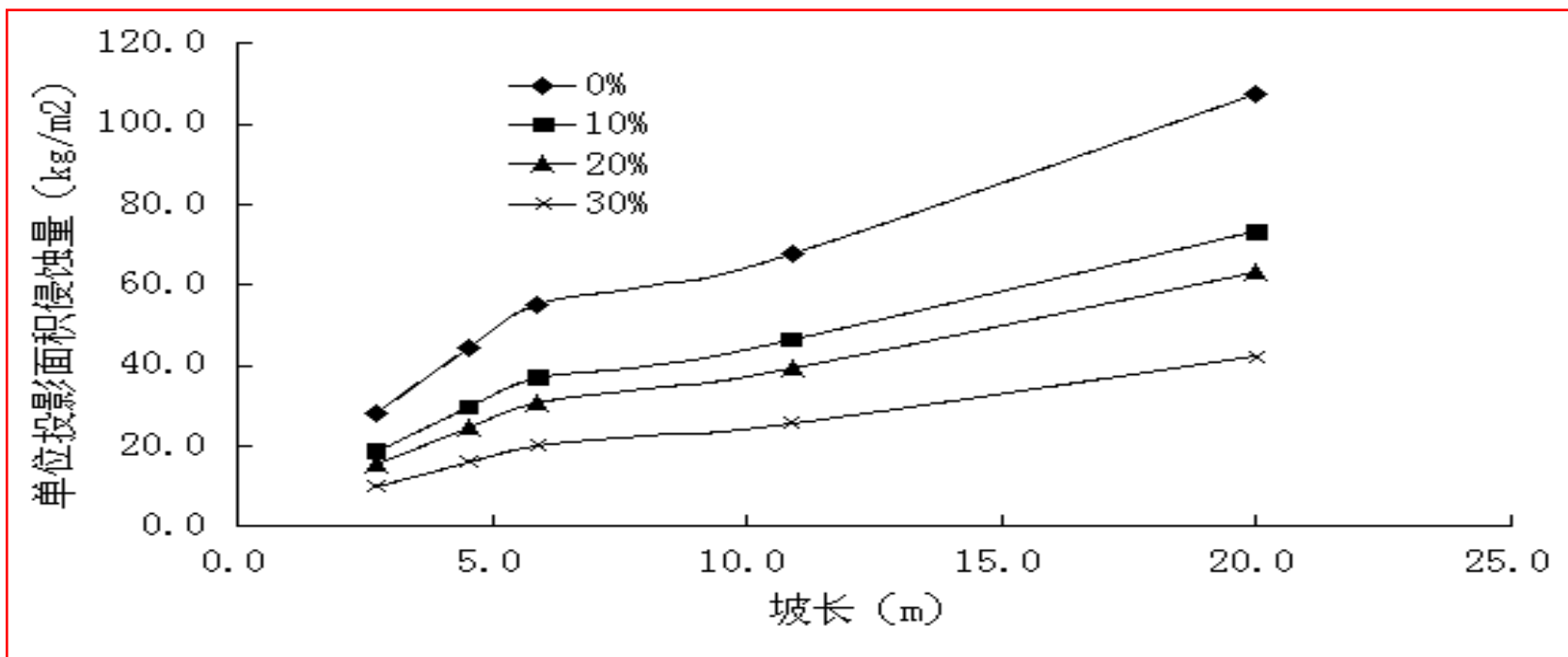
30/07/2013 17:10

坡长因子的定义

美国USLE中坡长因子定义：是指在其他条件相同的情况下，任一特定坡长的坡地产生的土壤流失量与坡长为22.13m的坡地产生的土壤流失量之比。坡长因子L是一个无量纲的因子。

本试验**坡长因子定义**：在其他条件相同的情况下，任一特定坡长的工程堆积体产生的土体流失量与坡长为20m的工程堆积体产生的土体流失量之比。

坡长因子幂函数表达式建立资料



不同石质含量下单位投影面积的侵蚀量随坡长增加呈现显著增加的趋势。根据实测资料，通过趋势法外延得到20m坡长时的侵蚀量，以纯土体的侵蚀量为基准求算各种土石混合体的L值。

坡长因子L值的幂函数通式为：
$$L = (\lambda/20)^m$$

坡长因子L值与 $\lambda / 20$ 的的幂函数查算表

坡长 (m)	石质含量			
	0%	10%	20%	30%
3	0.3681	0.2560	0.1449	0.0338
4	0.4105	0.2981	0.1870	0.0759
5	0.4490	0.3365	0.2254	0.1143
6	0.4848	0.3721	0.2610	0.1499
7	0.5185	0.4056	0.2945	0.1834
8	0.5504	0.4373	0.3262	0.2151
9	0.5808	0.4676	0.3565	0.2454
10	0.6100	0.4967	0.3856	0.2745
11	0.6382	0.5247	0.4136	0.3025
12	0.6654	0.5518	0.4407	0.3296
13	0.6918	0.5781	0.4670	0.3559
14	0.7175	0.6036	0.4925	0.3814
15	0.7425	0.6284	0.5173	0.4062
16	0.7668	0.6527	0.5416	0.4305
17	0.7907	0.6764	0.5653	0.4542
18	0.8140	0.6996	0.5885	0.4774
19	0.8368	0.7223	0.6112	0.5001
20	0.8592	0.7446	0.6335	0.5224

粘土区可蚀性因子研究结果

粘土区不同土石比例可蚀性K值计算数据

土石料含 石量比%	雨强mm/ min	降雨侵蚀力MJ·mm /(hm ² ·h)	坡长因子L	侵蚀量t/hm ²	侵蚀影响因 子RLSCP	可蚀性K值 t·hm ² ·h/(hm ² ·MJ·mm)
0 (纯土)	1.05	724.37	0.48	6.51	344.82	0.0190
	1.54	1650.22	0.48	28.39	785.55	0.0361
	2.05	3046.02	0.48	71.65	1449.98	0.0494
	2.50	4655.75	0.48	128.68	2216.25	0.0581
10	1.00	869.44	0.48	12.05	413.87	0.0291
	1.55	2231.07	0.48	27.68	1062.04	0.0261
	2.05	4061.36	0.48	91.55	1933.31	0.0474
	2.44	5893.73	0.48	150.31	2805.56	0.0536
20	1.07	1005.88	0.48	11.87	478.83	0.0248
	1.43	1876.72	0.48	29.58	893.37	0.0331
	1.94	3609.16	0.48	49.79	1718.05	0.0290
	2.47	6049.62	0.48	114.77	2879.77	0.0399
30	1.05	965.82	0.48	10.42	459.76	0.0227
	1.48	2020.43	0.48	32.86	961.77	0.0342
	1.99	3811.21	0.48	47.74	1814.23	0.0263
	2.49	6154.74	0.48	53.38	2929.81	0.0182

砂壤土区工程堆积体可蚀性研究结果

土料含石量比%	雨强 (mm/min)	可蚀性K值 (t hm ² h/(hm ² MJ mm)
纯土	1.0	0.012
	1.5	0.158
	2.0	0.147
	2.5	0.197
10	1.0	0.121
	1.5	0.053
	2.0	0.082
	2.5	0.098
20	1.0	0.055
	1.5	0.039
	2.0	0.062
	2.5	0.046
30	1.0	0.048
	1.5	0.061
	2.0	0.036
	2.5	0.045

坡度因子定义

美国USLE中坡度因子定义：是指在其他条件相同的情况下，任一特定坡度的单位面积坡地产生的土壤流失量与标准小区坡度下单位面积土壤流失量之比。坡度因子S是一个无量纲的因子。

本试验**坡度因子定义**：在其他条件相同的情况下，任一特定坡度的工程堆积体产生的土体流失量与坡度为25度的标准径流小区产生的土体流失量之比。

坡度因子与坡度的关系图

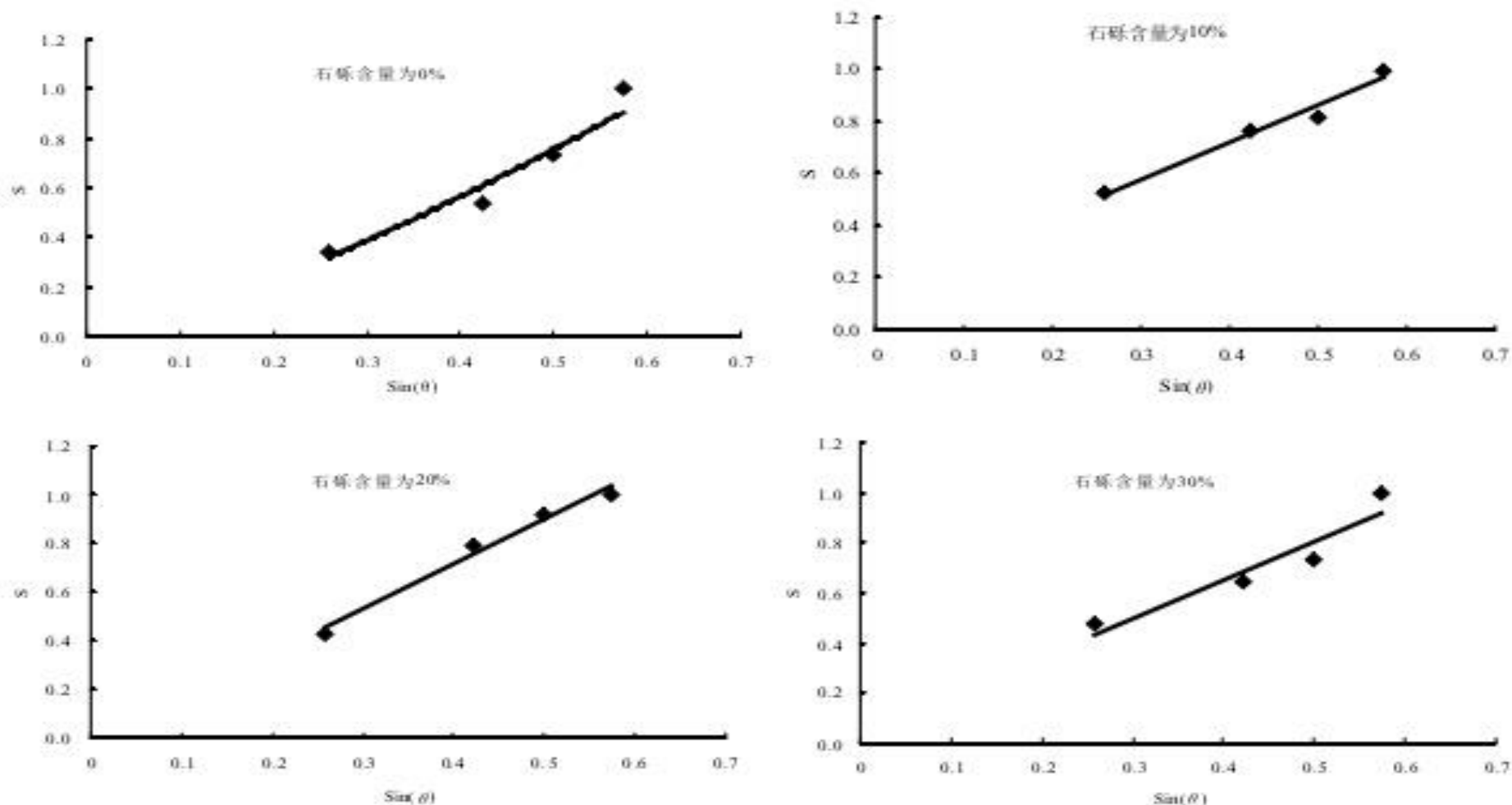


图 5-2 坡度因子 S 值与 $\text{Sin}(\theta)$ 之间的关系

坡度因子表达式

◆ 从图 5-2 可以看出，不同石砾含量条件下，坡度因子 S 值随 $\sin(\theta)$ 的增大基本呈线性关系增大。经回归分析得到了坡度因子 S 值与 $\sin(\theta)$ 的回归方程式，见表 5-3：

表5-3 坡度因子 S 值与 $\sin(\theta)$ 的经验方程式

石砾含量	回归方程	R^2	Sig	样本数
0%	$S=2.025\sin \theta-0.235$	0.933	0.034	4
10%	$S=1.438\sin \theta+0.147$	0.974	0.013	4
20%	$S=1.839\sin \theta-0.023$	0.984	0.008	4
30%	$S=1.543\sin \theta+0.035$	0.894	0.054	4

坡度因子三角函数查算表

表 5-5 土石体类型为基准的坡度因子 S 值与坡度 θ 的三角函数关系查算表

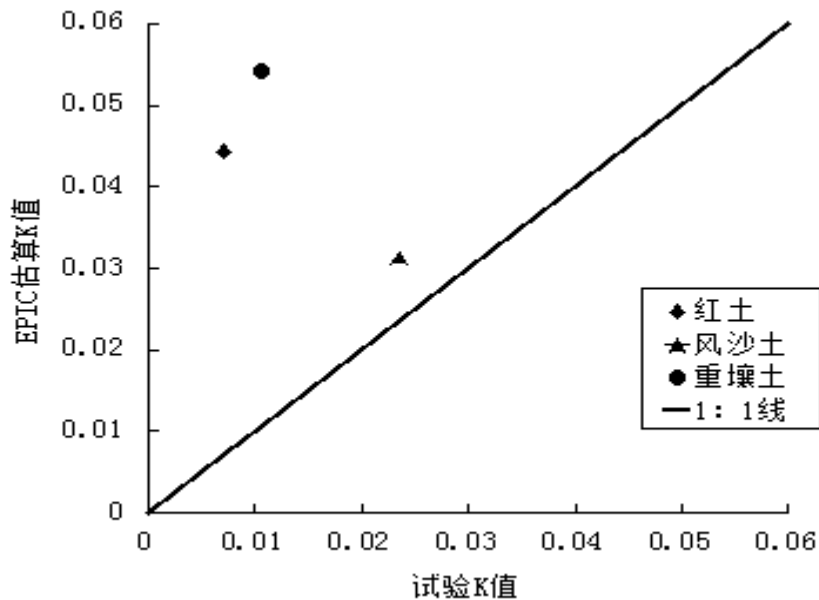
坡度	石砾含量				坡度	石砾含量			
	0%	10%	20%	30%		0%	10%	20%	30%
15°	0.2891	0.2509	0.1981	0.1339	30°	0.7775	0.4185	0.3920	0.2485
16°	0.3232	0.2626	0.2116	0.1419	31°	0.8080	0.4290	0.4041	0.2556
17°	0.3571	0.2742	0.2251	0.1499	32°	0.8381	0.4393	0.4161	0.2627
18°	0.3908	0.2858	0.2384	0.1578	33°	0.8679	0.4495	0.4279	0.2697
19°	0.4243	0.2973	0.2518	0.1656	34°	0.8974	0.4596	0.4396	0.2766
20°	0.4576	0.3087	0.2650	0.1735	35°	0.9265	0.4696	0.4512	0.2834
21°	0.4907	0.3201	0.2781	0.1812	36°	0.9553	0.4795	0.4626	0.2902
22°	0.5236	0.3314	0.2912	0.1889	37°	0.9837	0.4893	0.4739	0.2969
23°	0.5562	0.3426	0.3041	0.1966	38°	1.0117	0.4989	0.4850	0.3034
24°	0.5886	0.3537	0.3170	0.2042	39°	1.0394	0.5084	0.4960	0.3099
25°	0.6208	0.3647	0.3298	0.2117	40°	1.0666	0.5177	0.5068	0.3163
26°	0.6527	0.3757	0.3425	0.2192	41°	1.0935	0.5270	0.5175	0.3226
27°	0.6843	0.3865	0.3550	0.2266	42°	1.1200	0.5360	0.5280	0.3288
28°	0.7157	0.3973	0.3675	0.2340	43°	1.1460	0.5450	0.5383	0.3349
29°	0.7467	0.4079	0.3798	0.2413	44°	1.1717	0.5538	0.5485	0.3410

几种估算模型的适用性研究

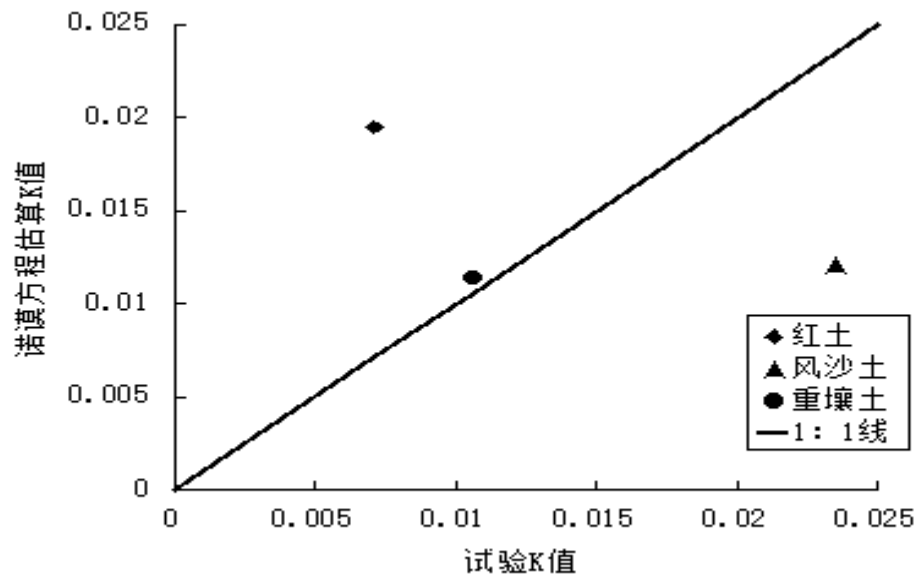
几种模型估算K值和试验实测K值表

土类	轻壤土	重壤土	粘土
EPIC模型估算值	0.0312	0.0542	0.0443
诺谟方程估算值	0.0121	0.0114	0.0195
王彬Dg-OM估算值	-0.0007	0.0200	0.0239
试验值 (22.13m, 5.16°)	0.0235	0.0106	0.0071
试验值 (20m, 25°)	0.1775	0.0800	0.0534

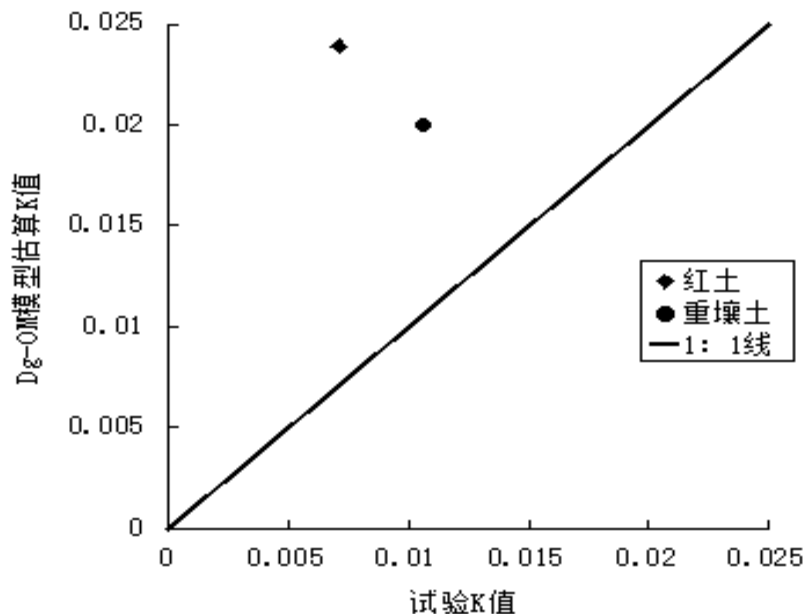
利用实验所测各种土类的颗粒组成和有机碳资料，分别采用国外EPIC模型、诺谟方程及国内王彬建立的Dg-OM模型对几种土类的可蚀性K值进行估算。



EPIC估算值与试验值对比图



诺谟方程估算值与试验值对比图



Dg-OM估算值与试验值对比图

三个模型中EPIC模型的估算值整体偏大于实测值；Dg-OM模型不适用轻壤土，因此在综合三种土类的前提下不适用；诺谟方程的适用性最好，各种土类估算值的正负误差均在可接受范围内，在后续研究中可建立诺谟方程的修正方程，为有关地区工程堆积体可蚀性K值提供一种简便算法。

七、研究成果的推广意义

本项目的初衷就是为更加准确、快速测算工程建设导致的水土流失量的测算、防治措施布设及水行政主管部门水土保持监督执法提供科学依据和技术支撑。

经过3年的研究，修订了影响生产建设项目工程堆弃体水土流失的各因子，并将编报适用于全国的可查阅使用的便利手册，旨在我国生产建设项目水土保持方案编制和堆置体水土流失量测算提供依据。

存在问题及建议

1. 工程堆积体水土流失测算模型是为了预报次降雨造成的土体流失量，本研究受条件所限，对结果的影响较大，坡长因子的修正精度有待进一步完善。
2. 美国农业部手册将石砾对土壤侵蚀的影响分为以下两方面：
 - (1) 石砾存在于坡面表面，相当于作物残渣和地表植被覆盖，起到保护作用，从而减少侵蚀；
 - (2) 石砾存在于土体当中，土石混合土质与纯土体相比，径流增加，从而增加侵蚀。

存在问题及建议

分析试验结果，土体中石砾的存在能够减少侵蚀这种减小作用是以覆盖作用为主导，还是通过影响土质可蚀性从而减少侵蚀为主导。在两种作用并存时，如何将两种影响分离，有待后续进一步研究。

3. 可蚀性确定方法的选取上，使用单位面积侵蚀量 A 与侵蚀影响因子乘积 $RLSCP$ 所拟合正比关系式的斜率作为可蚀性值优于取自不同场次的算术平均值，建议在以后研究中使用此种方法确定

谢谢！

实验设计

- 按4 个雨强，分别为1.0、1.5、2.0和2.5 mm/min；
 - 4 个典型坡度，分别为 15° 、 25° 、 30° 和 35° ；
 - 4 种土石体类型，按石砾所占土石体比重的 0%（纯土体）、10%、20%、30%划分
- 共计完成了64 场次降雨试验。