

水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究^{*}

于国强^{1,2} 李占斌³ 张茂省¹ 裴 亮^{4†}

(1 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054)

(2 西北大学地质学系, 西安 710069)

(3 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(4 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要 采用有限差分软件 FLAC^{3D} 对有无植被及淤地坝的黄土高原小流域重力侵蚀机理进行探索, 揭示了主要工程措施(淤地坝)和生物措施(植被)对重力侵蚀的调控机制。通过对比分析无治理措施和实施淤地坝及生态恢复治理措施条件下, 小流域位移场、应力场和塑性屈服区分布, 揭示了淤地坝和植被措施减缓重力侵蚀的作用。结果表明: 植被可使梁峁顶处位移减 9.8%, 沟坡中下部位移减小 11%, 淤地坝只能使坝址处位移减少 10%; 植被可使塑性区体积减少 46%, 淤地坝可使塑性区体积减少 11%。淤地坝增加了流域的凹形边坡, 而根系加固作用改善了坡面浅层土体应力, 二者均有效降低了坡面土体的应力集中, 减少了塑性屈服区体积, 但均未改变小流域以剪切破坏为主的屈服模式。小流域小尺度范围内, 淤地坝减蚀作用强于植被, 而大尺度范围内, 植被减蚀效果优于淤地坝。研究成果可为小流域水土保持措施的合理配置提供科学依据。

关键词 小流域; 重力侵蚀; 植被根系; 淤地坝; 调控机理

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

黄土高原占中国面积 40%, 该区土壤侵蚀十分剧烈, 严重制约了农业和林业的生产力^[1]。关于该区土壤侵蚀研究, 一直是水土流失研究的难点。其中由于重力侵蚀的复杂性, 对其研究更为薄弱。黄土高原沟壑发育, 坡陡坡碎, 重力侵蚀量占总侵蚀量的比例很大, 是土壤侵蚀的主要组成部分^[1-3]。

植物根系在固土护坡、防止土壤侵蚀方面具有重要的作用, 植物根系能够与环境之间形成一种良性互动, 其对边坡存在力学效应、水文效应、生物及生态作用, 对边坡稳定性影响显著, 因此植物根系对于减缓土壤侵蚀的研究是一项涉及多学科、多因素的系统课题^[4-6]。国内外诸多学者对此展开研究, 但由于问题的复杂性等问题, 目前对植物根系固土机理的认识还不够清楚, 大多数学者所提出的诸多根系强化模型中^[7-8], 许多参数无法测量, 只能根据经验作出假设, 从护坡效应力学机制的视角出发, 根土的相互作用机理以及根系对岩土介质加

固作用的定量化评价工作还很不深入^[9-10]。淤地坝系作为治理水土流失的主要工程措施, 在蓄水拦沙、防洪保收等方面起到了重要作用, 打坝淤地、蓄水拦沙是流域水土保持综合治理的一项重要措施。目前国内外有关淤地坝的研究主要集中在坝系相对稳定和生态环境效应等方面, 而对淤地坝通过抬高侵蚀基准面, 提高系统稳定性, 减缓重力侵蚀特别是滑坡侵蚀方面的研究则少有人提及^[11-12]。

本研究采用有限差分数值模拟方法, 从根系固土效应角度出发, 研究草类植被根系对小流域重力侵蚀分布规律的影响, 对植被根系减缓小流域重力侵蚀发生程度的机理进行探讨; 并对随坝地淤高, 小流域稳定性、侵蚀破坏部位、机理等方面进行研究, 以期对小流域水土保持工程措施配置及生物措施开展提供有益参考, 为评价小流域稳定性提供一定可靠依据。

^{*} 国家自然科学基金项目(40872208、40971161)、国土资源部科研专项项目(201111020)和中国博士后基金项目(2011M501445)资助

[†] 通讯作者: 裴 亮(1982—), 江苏南京人, 博士, 中国科学院助理研究员, 从事环境模拟与污染控制。E-mail: peiliang@igsr.cn

作者简介: 于国强(1979—), 男, 内蒙古包头人, 博士后, 从事土壤侵蚀与地质灾害等方面的研究。E-mail: yuguogiang23@sina.com

收稿日期: 2011-07-02; 收到修改稿日期: 2011-10-23

1 材料与方法

1.1 研究区概况

韭园沟位于无定河中游左岸,沟口距绥德 5 km,流域面积 70.7 km²,主沟长 18 km,海拔 820 ~ 1 180 m,沟壑密度为 5.43 km km⁻²,沟底平均比降为 1.2%,沟长大于 300 m 的支沟有 430 条。地形主要以梁、峁及沟谷组成,坡度在 10° ~ 35°之间,沟间地占总面积的 56.6%,沟谷地占总面积的 43.4%,坡度一般在 35°以上。地层表层主要为马兰黄土,梁峁顶部均有分布,厚度为 20 ~ 30 m;中间为离石黄土,多出露于谷坡上,厚度为 50 ~ 100 m;底层是三叠纪砂页岩,出露于干沟、支沟的下游沟床及其两侧,岩层基本接近水平,在黄土丘陵沟壑区具有一定代表性^[13-14]。据调查,1952 年治理前,该流域多年平均侵蚀模数为 18 120 t km⁻² a⁻¹,林草覆盖率仅为 2.1%,属剧烈侵蚀区,土地资源利用率仅为 68.8%。经过 50 多年的综合治理,在沟壑大力修建大、中、小型淤地坝工程,曾建淤地坝 333 座,到目前为止,调整为 204 座,其中骨干坝 17 座,中型坝 32 座,小型坝 155 座,可淤地 394 hm²,使荒沟变成良田;在 25°以下的坡地上修筑水平梯田,变为高产农田或经济林;荒坡陡洼大力造林种草,使土地利用率达到 82.9%,较治理前提高了 14.1%。至 2004 年林草覆盖率上升为 39.0%。由于提高了林草覆盖率,恢复了大地植被,流域生态环境得到了明显的好转。

1.2 植被调控坡沟重力侵蚀的力学原理

导致边坡滑坡的因素复杂多变,但其根本原因在于土体内部某个滑动面上的剪应力达到其抗剪强度,使稳定平衡遭到破坏^[7-10]。在低载荷区,土壤抗剪强度对于普通载荷是足够的,当载荷进一步增加,土体开始失稳,将多余载荷传递给植物根系,此时植物的抗剪强度被充分调动起来。如图 1 根系加固影响所示,由于植物根系加固能力逐渐增强,使表观黏聚力逐渐增大;根系通过穿透、包络使土体成为一个整体,增加的黏聚力 C_r 主要是增加土体失稳时的剪切强度的主要原因。

图 2 为植物根系加固模型,草类植被根系提高土体的抗剪强度,主要是通过根土接触面摩擦力把土中剪应力转换成根的拉应力。草类植被根系和乔木植物垂直根的锚固作用有所区别,主要是依靠土壤与草本侧根系之间黏合作用所提供阻力,使侧

根对土壤具有牵引效应,增强了根系土层整体抗张强度。侧根牵引效应有 2 个不可缺少前提:根土摩擦作用和根的抗拉强度,前者发生在根土界面上的力学作用,这样应力可以在土壤和侧根之间传递,从而形成整体的抗张强度^[8];后者直接影响到含根土体的抗剪强度值的大小。

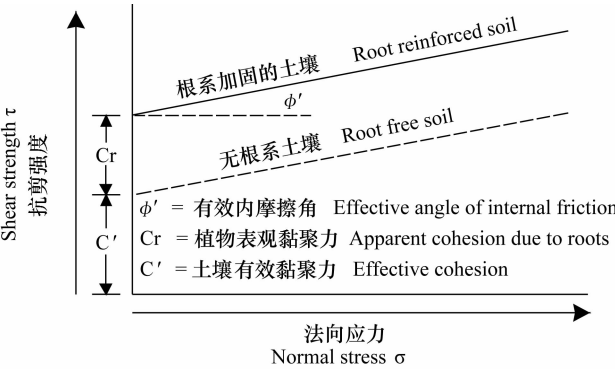


图 1 广义根系加固作用
Fig. 1 Generalized root reinforcement effect

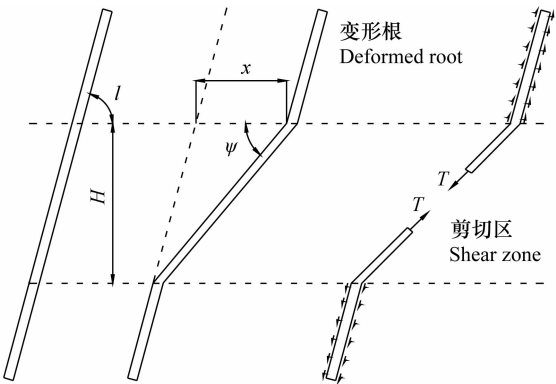


图 2 植物根系加固模型
Fig. 2 Vegetation root reinforce model

以 Wu 等^[9]提出的根土复合介质抗剪强度垂直根模型为基础,认为根系与土体通过根土黏合键作用将抗拉强度传递到周围土之中^[10],如图 2 所示,由于根系存在,土体抗剪强度增加值 C_r 为:

$$C_r = T_r (A_r/A) (\cos\psi \tan\varphi + \sin\varphi) \quad (1)$$

式(1)中: T_r 是穿过剪切面所有起作用的根系平均抗拉强度; ψ 是剪切区剪切变形角度; φ 为土内摩擦角; A_r 为剪切面上所有起作用的根系截面面积之和, A 为土体截面面积, A_r/A 称为根系面积比 RAR (vegetation root area ratio)。根系面积比概念和关系的提出,使穿越土体植物根系的剪切强度和抗拉强度得以应用,从而使植物根系加固作用得以量化。

$$RAR = \frac{A_r}{A_w} = \frac{\sum_i n_i a_i}{A_w}$$

(2)

$$T_r = \sum_i^n T_i n_i A_i / \sum_i^n n_i A$$

(3)

式(2)、式(3)中: A_w 为土体中所有根系所占面积; n_i 代表植物根系直径第*i*径级的数量; a_i 代表第*i*径级别的根的平均截面面积; T_i 是直径为第*i*径级别的根的抗拉强度。

整个土体的抗拉强度相当于在无根系土体的抗剪强度上又增加了一个凝聚力项,若考虑空隙水应力,摩尔—库仑强度准则表达式为:

$$\tau = (C' + C_r) + (\sigma - u) \tan \varphi' + (u - \xi) \tan \phi^b \quad (4)$$

式(4)中: τ 为抗剪强度; C' 为有效黏聚力; C_r 为植物表观黏聚力; σ 法向应力; u 为孔隙水压力; $(\sigma - u)$ 为净法向应力; φ' 为土体有效内摩擦角; ξ 为土壤吸力; ϕ^b 为土壤吸力与孔隙水压力关系角。

草类植被根系具有一定抗拉强度,可视为边坡土体中带预应力的三维加筋材料,其加筋作用一方面表现出增加土层有效黏聚力 C_r ,另一方面表现出对土粒的网兜包裹效应,从而限制土体变形,对边坡土体起到加固作用,提高土体抗剪强度以及边坡稳定性^[10]。

国内外诸多学者对植物根系进行了植物根系分布测试、拉拔测试和剪切测试,取得了一定的研究成果,对黄土高原所在区域的植物根系的力学特性也有诸多研究。考虑到植物种类千差万别,根的直径和生长方向以及生长环境不尽相同,其力学特

性相差颇大。赵丽兵等^[15]通过野外剪切测试和模型预测,得出黄土高原丘陵沟壑区,四种代表性的草类植被草木樨、紫花苜蓿、糜子和冰草根系的平均抗拉强度分别为 35.3 MPa、18.2 MPa、48.56 MPa 和 122.47 Mpa;其土壤抗剪切强度分别增加 8.81 kPa、10.76 kPa、15.33 kPa、5.23 kPa;Gray 等^[16]曾在纤维砂土的强度试验中发现,随着土体中纤维量的增加,抗剪强度也随之增大,并指出在剪切面上当纤维截面积所占比例在 0~1.7% 之间是成立的,而 1.7% 也是自然界中植被根系在所赋存的土体中的根量的上限;程洪等^[17]利用试验研究典型草类植被根系抗拉强度大小,得出香根草、假俭草、白三叶、莎草、宜安草、百喜草、马尼拉、狗牙根抗拉强度大小分别为 85 MPa、27.3 MPa、24.6 MPa、24.5 MPa、19.74 MPa、19.23 MPa、17.5 MPa、13.4 MPa;张宏波等^[18]研究表明,种植香根草之后土的物理力学性质有了明显的改善:黏聚力平均增大 11%;Zhang 等^[7]对黄土高原豆科类植物三类根系的研究表明,根系可以依靠提高黏聚力来增加土体抗剪强度,水平根系增加黏聚力增幅最小为 38%,交叉根系增加黏聚力增幅最大为 155%。

1.3 小流域模型及力学参数

1.3.1 土体物理力学指标及植被力学参数 根据边坡工程经验以及现场资料分析,现场、室内岩土物理力学试验,概化模型各土层材料物理力学参数的具体特征取值见表 1。

表 1 小流域土体计算参数
Table 1 Soil mass calculation parameters of a small watershed

土层类型 Soil types	体积模量 Bulk modulus K (MPa)	剪切模量 Shear modulus G (MPa)	黏结力 Cohesion C (kPa)	内摩擦角 Internal friction angle $\Phi(^{\circ})$	密度 Density ρ (kg m^{-3})
马兰黄土 Malan loess	417	149	23	21.9	1.56
离石黄土 Lishi loess	588	226	37	26.5	1.78

本研究针对黄土高原独有特点,根据前人研究,并结合研究区具体的土体物理力学指标,对植物根系表观黏聚力指标进行选取,最终选取均值 5 kPa 作为草类植被根系的平均表观黏聚力。植被根系层 80%~85% 集中分布在 1.5 m 范围内,因此将根系层厚度 h_R 定为 1.5 m。

1.3.2 小流域概化模型 本研究采用复杂地形建模方法^[19],构建原始小流域、带有植被和带有淤

地坝小流域概化模型(图 3),并采用有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D}对概化模型进行计算。计算模型底部($z = 0$)设为固定约束边界,模型四周设为单向边界,坡面设为自由边界,模型土层从上到下分别为马兰黄土(Q_3^{col})和离石黄土(Q_2^{col}),其土层平均厚度分别为 50 m 和 150 m,坡面坡度主要在 $10^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 之间,x 方向长为 580 m,y 方向长为 760 m,z 方向 290 m。每个单元长为 9 m。其中原始小流域模型

网格共有节点 50 895 个,单元 88 064 个;植被小流域模型中草被根系层为 1.5 m,网格共有节点 73 515 个,单元 132 096 个;淤地坝小流域模型中淤

地坝坝长坝宽皆为 80 m,坝高设为 35 m,淤地坝坝前设为单向边界,网格共有节点 50 895 个,单元 88 064 个。

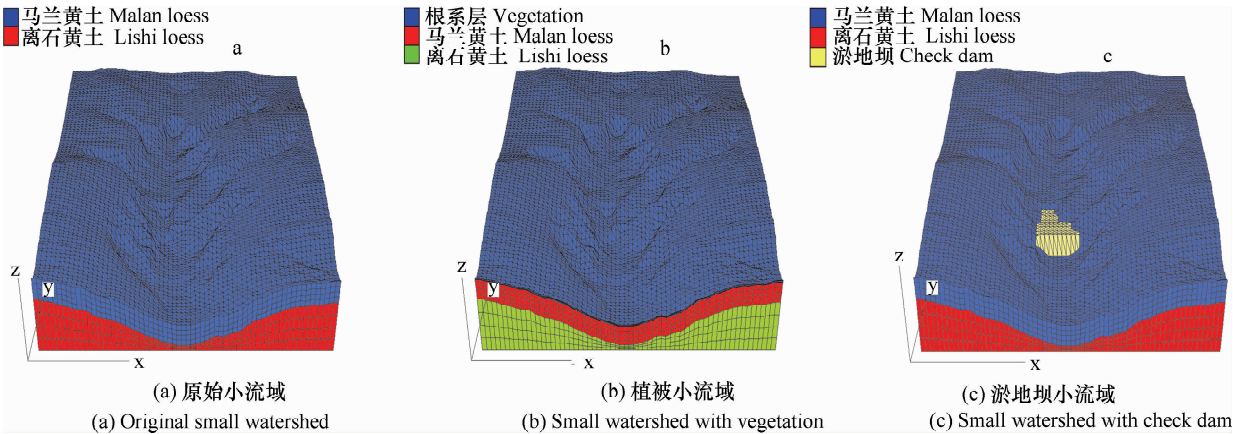


图 3 小流域概化模型
Fig. 3 Conceptual model of a small watershed

2 结果分析

2.1 植被和淤地坝对位移场分布的调控作用

根据小流域有限差分计算模型得出三种情况下小流域整体位移、铅垂方向位移和水平方向位移分布图(图 4 至图 6)。由图 4、图 5 可以看出,小流域整体位移与铅垂方向位移分布规律基本一致,小流域上部位移是以“沉降”模式为主,最大铅垂位移出现在梁峁坡上部和梁峁顶。由图 6 见,最大水平位移基本都呈现对称状分布在沟坡中下部凹陷地带,水平位移以此处为中心呈“同心圆”状逐渐向四周减小扩散,会朝沟底方向滑动,以“剪切”形式为主。

当有植被覆盖时,由于植被固坡的作用,虽然位移场分布规律一致,但梁峁顶和梁峁坡上部铅垂方向大位移分布范围明显减少,小位移分布范围明显增加,沟坡中下部水平方向位移也明显减小,深层土体等值线无明显变化,而坡面浅层土体处的等值线已有明显“上翘”趋势,小位移范围增大,这种趋势在沟坡处更为明显。说明由于植被加固作用,小流域的整体安全性有轻微幅度提高,可以减少浅层土体位移。当有淤地坝时,淤地坝的建成虽然增加了顺沟口方向的河道比降,但仍然可以使坝地上下游附近区域整体位移和铅垂方向位移有所减小,小位移范围增大;并且减少了水平方向的河道比降,使出现在沟坡中下部凹陷地带的两侧最大水平

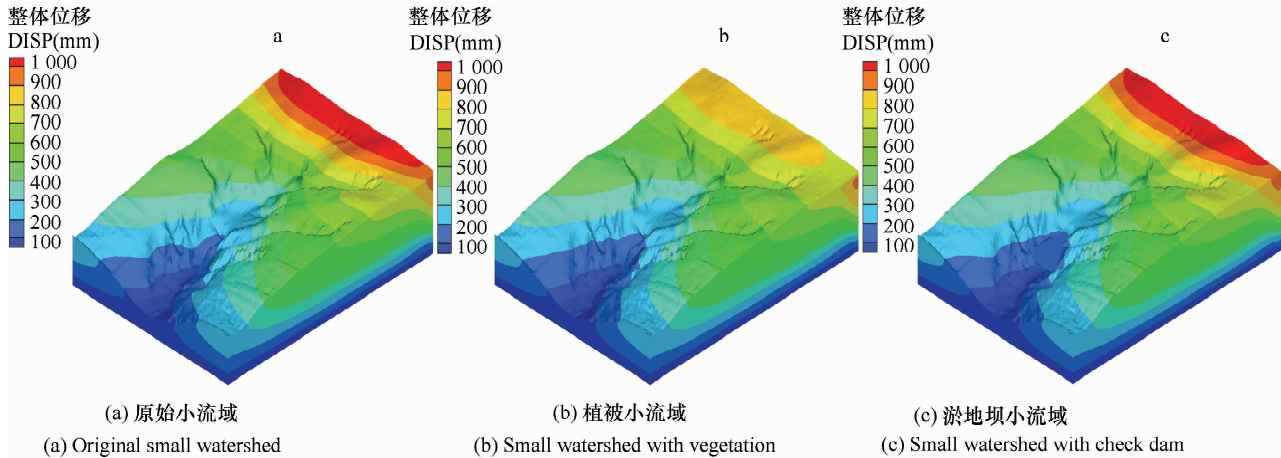


图 4 小流域整体位移分布图
Fig. 4 Overall displacement nephograms of the small watersheds

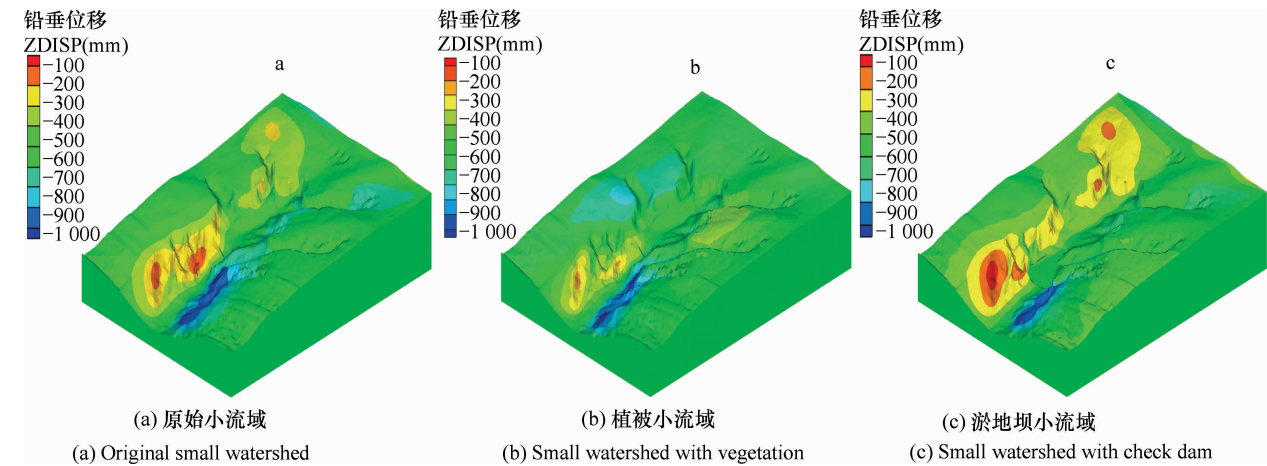


图 5 小流域铅垂方向位移分布图

Fig. 5 Vertical displacement nephograms of the small watersheds

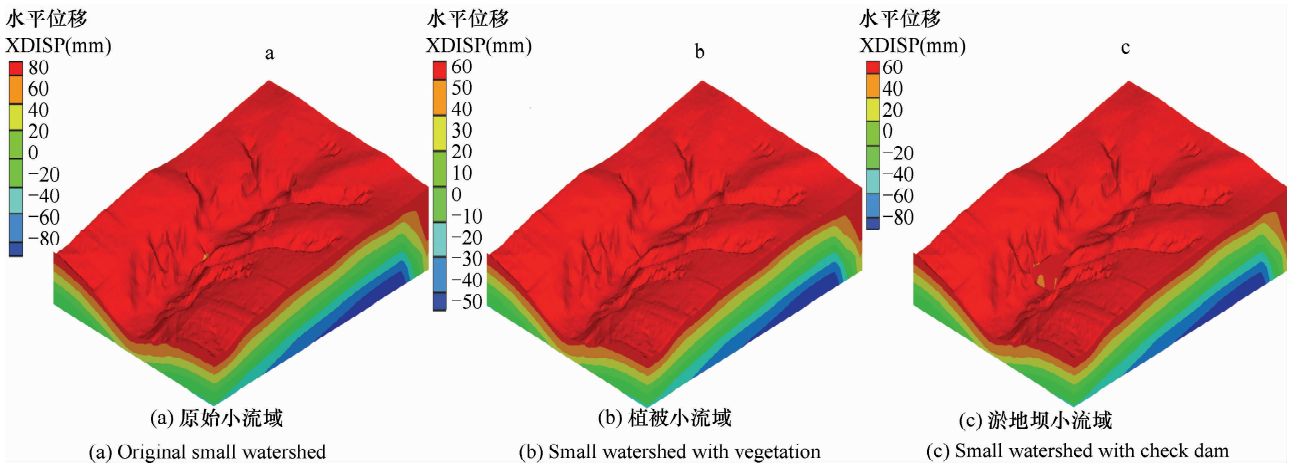


图 6 小流域水平方向位移分布图

Fig. 6 Horizontal displacement nephograms of the small watersheds

位移进一步减小,减小幅度达到 25%。坝址区域、上下游区域以及坝址两侧的沟坡中下部凹陷地带的位移矢量均小幅度变稀变短,小位移矢量分布增多,且水平方向的“剪切”趋势已经有所减缓,说明淤地坝建设可以使得流域内,坝址上下游以及左右两侧的重力侵蚀得到一定程度的缓解,但幅度较小。

在三种情况下,分别在梁峁顶、峁边线及沟坡中部(淤地坝处)设置监测点,观察小流域各点位移变化情况。图 7 点绘了各点整体位移曲线,可以看出,三种情况下,位移变化规律基本一致,都是随运行时步的增加,各点位移均有所增大,且梁峁顶处整体位移最大,沟坡中部处整体位移最小。有植被时,各监测位置处位移均有一定程度减小,其中梁峁顶处位移减小 0.09 m,减小幅度为 9.8%,沟坡中下部位移减小 0.023 m,减小幅度为 11%。有淤地

坝时梁峁顶处和峁边线处位移同原始流域位移一致,没有明显变化,在沟坡中部(淤地坝处),位移要

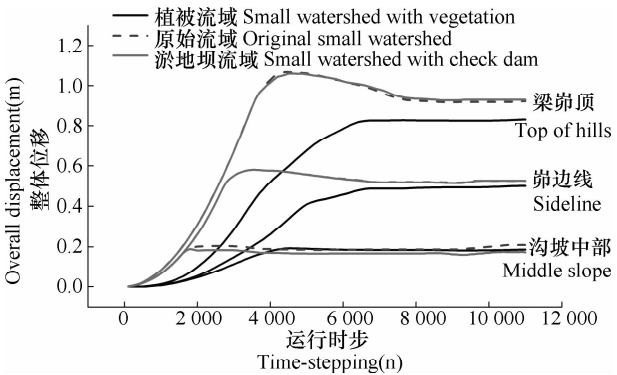


图 7 三种情况下小流域各监测点整体位移

Fig. 7 Overall displacement of monitoring points in the small watersheds different in situation

明显小于有植被覆盖情况,较原始状态,位移平均减小 0.018 m,减小幅度为 10%。

2.2 植被和淤地坝对应力场分布的调控作用

从小流域第一应力云图和第三应力云图可以看出(图 8、图 9),应力分布规律基本一致,最大主应力(压应力),基本顺着坡面方向,并一直延伸到

坡脚。边坡内部,最大主应力方向与水平轴夹角逐渐增大,直至铅直;由于岩土分界面的存在,使得其附近区域的最大主应力方向要较其他区域最大主应力方向的变化大而且迅速得多,但并未影响主应力分布的总体走势,表明深部土体主要受铅垂方向的压应力作用,体现为受压屈服。

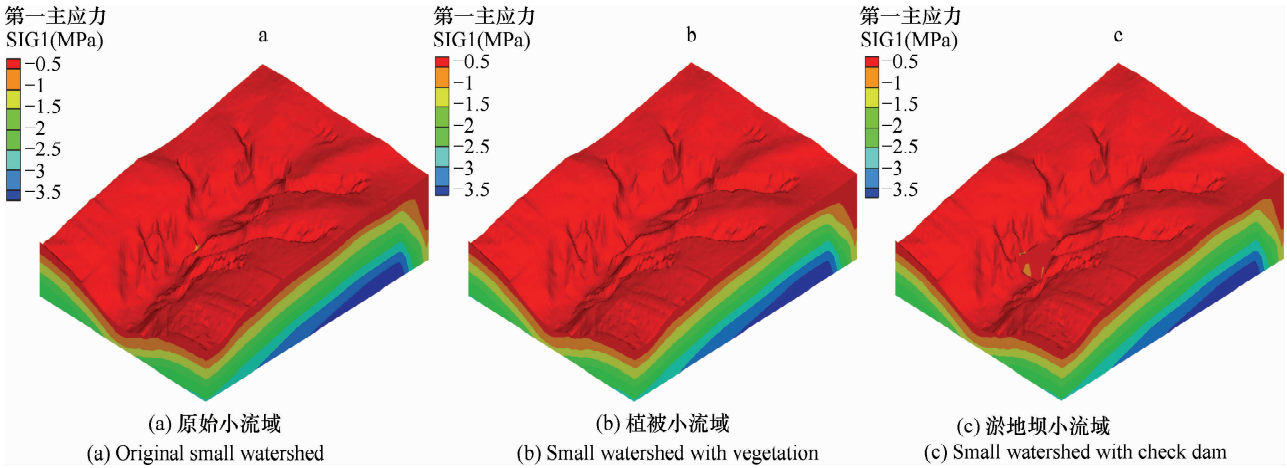


图 8 小流域第一应力分布图
Fig. 8 Primary stress nephograms of the small watersheds

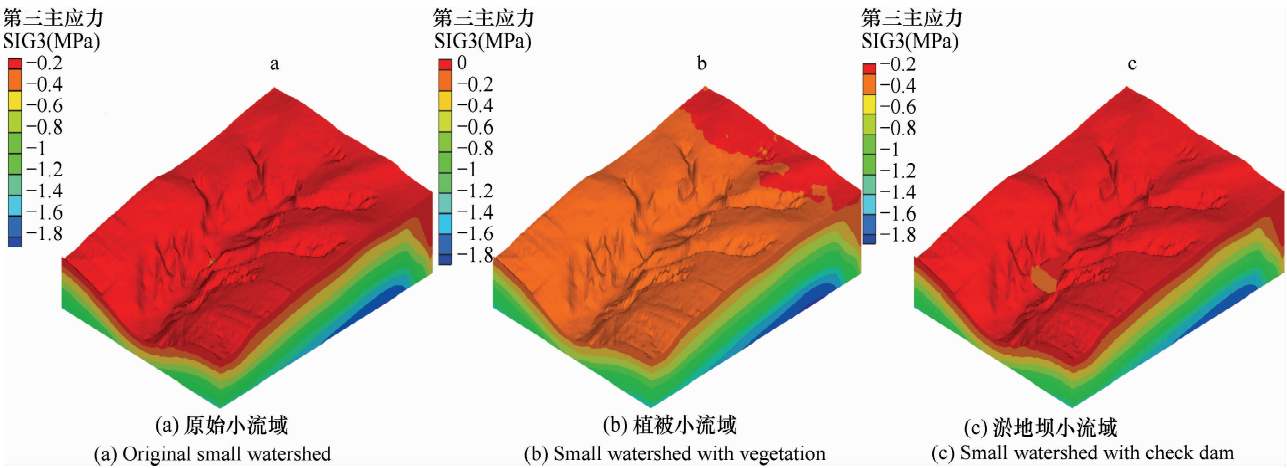


图 9 小流域第三应力分布图
Fig. 9 The third principal stress nephograms of the small watersheds

当植入植被或建有淤地坝时,小流域应力分布规律不变,数值基本一致,当有植被覆盖时,深层土体应力分布及大小无明显变化,而浅层土体应力已有所减小,小应力分布范围增大,尤其在梁峁顶处十分明显,且梁峁顶处下部土体,最大主应力方向与水平轴的夹角略有减小,坡面土体更加稳定。说明根系分担了土体的部分应力,并通过应力扩散作用传递到周围土体,起到弱化根系层应力的作用,增强了根系对土体的分担作用,减小应力集中,对

控制边坡的变形和提高边坡的稳定性有利。淤地坝建成后,增加了流域内凹形边坡,使流域内河道比降发生改变,使得流域内凹形边坡有所增加,坝址处主应力、最大受压屈服区体积有所减少,降低了边坡的应力集中程度,可以在一定程度上减缓重力侵蚀的发生。

2.3 植被和淤地坝对塑性区分布的调控作用

图 10 为小流域单元塑性状态指示图,图中只获得平衡状态时剪切屈服区域 (shear-n) 和张拉屈服

区域 (tension-n),以观察屈服区域对流域的破坏程度。可以看出,张拉塑性屈服区域主要分布在梁崩顶和梁崩坡上部,且分布面积较大,已连成片,说明梁崩顶和梁崩坡上部发生张拉破坏的可能性较

大,破坏程度较为严重;剪切塑性屈服区域分布范围较广,多分布于坡面和沟坡大部分区域,这些区域很容易发生水平剪切变形,且破坏程度较为严重。

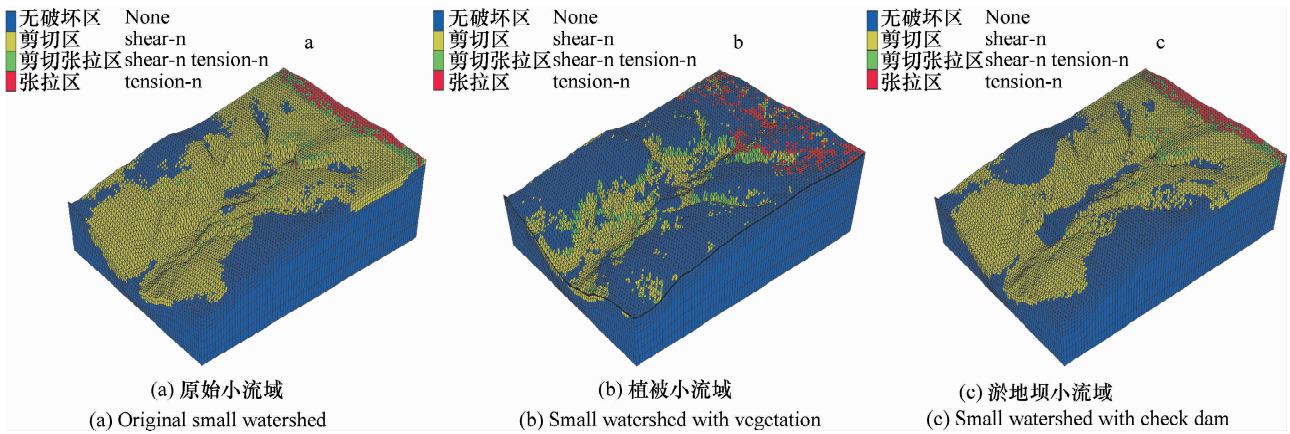


图 10 小流域塑性状态分布
Fig. 10 Distribution of plastic state of the small watersheds

带有植被小流域的屈服区域中,塑性区分布均处于边坡坡面的浅层区域,整个小流域中只有部分位置出现塑性区贯穿坡体的情况,流域内部土体处于正常状态。原先分布于梁崩顶和梁崩坡上部的张拉塑性屈服区域和分布于坡面和沟坡大部分区域的剪切塑性屈服区域,由于植被加固的作用,塑性屈服区域已被打断,不再贯穿坡面浅层,仅零星出现,未连成片,屈服区体积已大幅减少,从而减缓了剪切区域对流域的破坏程度。带有淤地坝小流域的屈服区域中,剪切塑性屈服区域和张拉塑性屈服区域分布规律与流域类似。由于淤地坝存在,淤地坝将原来贯穿坡面的浅层剪切塑性屈服区域打断,并且使得坝址两侧沟坡中下部凹陷地带的剪切塑性屈服区域体积减少,坝址处以及淤地坝附近上下游区域已不在屈服区范围,不会对流域产生破坏

作用,从而减缓了该剪切区域对流域的破坏程度。采用 FISH 语言对模型塑性屈服区域体积进行计算,对原始小流域、植被小流域和淤地坝小流域三种情况下,小流域塑性屈服区域体积进行计算,结果如表 2 所示。可以看出,原始小流域内塑性区多以剪切塑性区为主,占全部屈服区体积的 99.5%,张拉塑性屈服区仅占 0.5%,说明流域主要以剪切破坏的塑性屈服模式为主。当有淤地坝或植被覆盖时,剪切塑性屈服区体积和张拉塑性屈服区体积均有一定程度减少,剪切塑性区体积减少量分别为 $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $6.98 \times 10^6 \text{ m}^3$,张拉塑性区体积减少量为 $10\,800 \text{ m}^3$ 和 $36\,800 \text{ m}^3$,但均未改变小流域的破坏方式,三种情况下剪切塑性屈服区的体积均占全部屈服区体积的绝大部分,重力侵蚀塑性屈服模式均以剪切破坏模式为主。

表 2 原始、植被、淤地坝三类小流域塑性区体积			
Table 2 Volume of plastic state zone of the small watersheds with or without check-dam and/or vegetation			
塑性状态 Plastic state	三类流域塑性屈服区体积		
	Volume of the plastic deformation zone different in situation (m ³)		
	原始小流域 Original small watershed	植被小流域 Small watershed with vegetation	淤地坝小流域 Small watershed with check dam
剪切塑性屈服区 Shear plastic deformation zone	1.52×10^7	8.22×10^6	1.35×10^7
张拉塑性屈服区 Tension plastic deformation zone	7.34×10^4	3.66×10^4	6.26×10^4
总计 total	1.53×10^7	8.26×10^6	1.36×10^7

对比前期的研究成果^[19-20]发现,坡沟系统和小流域重力侵蚀的塑性屈服模式皆以剪切破坏形式为主,当建设淤地坝或植入植被时,并未改变重力侵蚀进入屈服的破坏模式,但淤地坝和植被作用都可以使剪切塑性屈服区体积和张拉塑性屈服区体积有一定程度的减少。需要指出的是,在小尺度范围内,淤地坝减缓重力侵蚀的作用强于植被,而在大尺度范围内,植被减缓重力侵蚀的作用强于淤地坝。综合分析可知,单个淤地坝的减缓重力侵蚀作用范围有限,对于坡沟系统而言,基本处于淤地坝作用范围内,因此减缓重力侵蚀效果较好;大尺度范围内,淤地坝仅对坝址处以及坝址附近区域发挥作用,减缓重力侵蚀效果一般。植被根系通过改善浅层土体的应力分布,从而改变位移场,塑性区分布,以达到减缓重力侵蚀的作用,对于坡沟系统而言,表层土体体积较小,植被的减缓重力侵蚀作用有限,因此效果一般;对于流域而言,整个流域的表层土体皆被植被覆盖,其减缓重力侵蚀作用得以大大增强,减缓重力侵蚀效果较好。

3 结 论

1) 植被根系加固作用改善了浅层土体的部分应力,通过应力扩散作用传递到周围土体,起到弱化根系层应力、增强根系对土体的分担作用,减小土体的应力集中,对控制边坡的变形和提高边坡的稳定性有利,使得流域的坡面浅层土体的位移明显减小,原来贯穿坡面的浅层塑性屈服区域打断,仅零星出现,未连成片,使塑性区体积显著减少,从而减缓了剪切区域的破坏程度。

2) 淤地坝的建设增加了流域内凹形边坡,减少了最大受压屈服区体积,降低了边坡应力集中程度,从而减少了坝址处、坝址附近区域的位移,并且将原来贯穿于坡面的浅层剪切塑性屈服区域打断,使坝址两侧剪切塑性屈服区域体积减少,在一定程度上减缓了流域重力侵蚀的破坏。

3) 淤地坝的建设或植被覆盖,均可使剪切塑性屈服区体积和张拉塑性屈服区体积有不同程度的减少,但并未改变坡沟系统和小流域进入屈服破坏的模式,重力侵蚀屈服模式依然以剪切破坏模式为主。由于工程措施和生物措施的作用机理以及作用范围不同,导致不同尺度内,对重力侵蚀的减缓效果不同;在小尺度内,淤地坝的减缓重力侵蚀作用强于植被,而在大尺度范围内,植被的减缓重力

侵蚀作用优于淤地坝。

4) 对于淤地坝而言,在流域关键位置进行科学、合理的坝系规划,建立好合理的坝控流域,会进一步减缓流域重力侵蚀的破坏程度,提高稳定性;对于植被根系而言,在边坡顶部和底部适当种植合理的植被,可以改善边坡顶部拉应力区分布范围和边坡底部剪应力区范围,以达到减缓流域重力侵蚀的破坏程度。

采用数值模拟方法,分析了植被根系和淤地坝对小流域稳定性的影响,结合位移、应力和塑性区分布规律,对重力侵蚀的破坏部位、机理以及植被和淤地坝对重力侵蚀的调控作用等方面进行了定量研究,为评价小流域稳定性提供一定的理论基础,对工程、生物措施的减缓重力侵蚀机理进行有益的探索。

参 考 文 献

- [1] Govers G, Poesen J. Assessment of interrill and rill contribution to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology*, 1988, 1:343—354
- [2] Zhou Z C, Shangguana Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China. *Ecological Modelling*, 2006, 198:263—268
- [3] Hessel R, van Theo Asch. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 2003, 54:131—146
- [4] Gabet E J, Dunne T. Landslides on coastal sage-scrub and grassland hillslopes in a severe ElNinowinter; The effects of vegetation conversion on sediment delivery. *Geological Society of America*, 2002(114):983—990
- [5] Gray D H, Leiser A T. Biotechnical slope protection and erosion control. Malabar, Fla: Krieger Publishing Co, Inc, 1982
- [6] Su Z A, Zhang J H, Nie X J. Effect of soil erosion on soil properties and crop yields on slopes in the sichuan basin, China. *Pedosphere*, 2010, 20(6):736—746
- [7] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. *Ecological Engineering*, 2010, 36(3):19—26
- [8] Abe K, Iwamoto M. Preliminary experiment on shear in soil layers with a large direct-shear apparatus. *Japanese Forestry Soc.*, 1988, 68(2):61—65
- [9] Wu T H, Beal P E, Lan C. In-situ shear test of soil-root systems. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988(14):1376—1394
- [10] Du Q, Zhong Q C, Wang K Y. Root effect of three vegetation types on shoreline stabilization of chongming island, Shanghai. *Pedosphere*, 2010, 20(6):692—701
- [11] 焦菊英, 王万忠, 李靖. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析. *农业工程学报*, 2003, 19(6):302—306. Jiao J Y, Wang W Z, Li J. Silting land and sediment blocking benefit of

- check dam in hilly and gully region on the Loess Plateau (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 302—306
- [12] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerck H L, et al. Testing the ephemeral gully erosion model for two mediterranean environment. Earth Surface Process and Landforms, 2001, 26: 17—30
- [13] 高鹏, 刘作新, 邹桂霞. 丘陵半干旱区小流域土地资源定量评价研究. 农业工程学报, 2003, 19(6): 298—301. Gao P, Liu Z X, Zou G X. Quantitative evaluation of land resources of small watershed in hilly semi-arid area of China (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2003, 19(6): 298—301
- [14] 崔灵周, 李占斌, 朱永清. 流域侵蚀强度空间分异及动态变化模拟研究. 农业工程学报, 2006, 22(12): 17—22. Cui L Z, Li Z B, Zhu Y Q. Simulation of the spatial differentiation and dynamic variation of watershed erosion intensity (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 17—22
- [15] 赵丽兵, 张宝贵, 苏志珠. 草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 718—722. Zhao L B, Zhang B G, Su Z Z. Quantitative analysis of soil anti-shearing strength enhancement by the root system s of herb plants (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 718—722
- [16] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and soil bioengineering, slope stabilization, a practical guide for erosion control. New York: John Wiley & Son, 1996
- [17] 程洪, 张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究. 水土保持通报, 2002, 22(5): 20—23. Cheng H, Zhang X Q. An experimental study on herb plant root system for strength principle of soil-fixation (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(5): 20—23
- [18] 张宏波, 姚环, 林燕滨. 香根草护坡稳定性效果浅析. 土工基础, 2008, 22(1): 52—55. Zhang H B, Yao H, Lin Y B. Preliminary analysis of the effects of vetiver grass for stabilizing slope (In Chinese). Soil Engineering and Foundation, 2008, 22(1): 52—55
- [19] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 黄土高原小流域重力侵蚀数值模拟研究. 农业工程学报, 2009, 25(12): 74—79. Yu G Q, Li Z B, Li P, et al. Numerical simulation on gravitational erosion of small watershed system in Loess Plateau (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 74—79
- [20] 于国强, 李占斌, 张霞, 等. 黄土高原坡沟系统重力侵蚀数值模拟研究. 土壤学报, 2010, 47(5): 809—816. Yu G Q, Li Z B, Zhang X, et al. Numerical simulation of gravitational erosion in slope-gully system on loess plateau (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(5): 809—816

MECHANISMS OF SOIL AND WATER CONSERVATION MEASURES REGULATING GRAVITATIONAL EROSION IN SMALL WATERSHEDS ON LOESS PLATEAU

Yu Guoqiang^{1,2} Li Zhanbin³ Zhang Maosheng¹ Pei Liang^{4†}

(1 Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, China)

(2 Department of Geology Northwest University, Xi'an 710069, China)

(3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Mechanism of gravitational erosion in small watersheds with or without vegetation or check dam on the Loess Plateau was explored with the aid of FLAC^{3D}, a finite difference software, so as to reveal mechanisms of some major engineering measures (building of check dams) and biological measures (maintenance of vegetation) regulating gravitational erosion. By comparing watersheds with and without controlling measures in distribution of displacement field, stress field and plastic deformation zone, effects of check-dam and vegetation reducing gravitational erosion were explored. Results show that hat vegetation may reduce displacement of hill tops and mid/lower slopes by 9.8% and 11%, respectively, while a check dam could only reduce displacement of the dam site by 10%. Moreover, vegetation could reduce volume of the plastic zone by 46% while a check dam could do only by 11%. A check dam increased concave slopes, while vegetation or roots reinforcement improved surface soil mass stress, both being able to reduce stress concentration of the soil mass on the slope and volume of the plastic deformation zone, but unable to alter the yielding model dominated by shear failure in the small watershed. However, within a small-scale range of a small watershed, the effect of a check dam was better than vegetation in erosion reduction, whereas in a large-scale range, it was just the reverse. The findings of the research can be cited as scientific basis for rationalization of the disposition of soil and water conservation measures for a small watershed.

Key words Small watershed; Gravitational erosion; Vegetation root; Check-dam; Regulating mechanism