

黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究

张 翼

(延安市延河流域世行贷款项目办公室, 陕西延安 716000)

摘 要: 土壤侵蚀是世界性的环境问题, 通过对近年来黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究成果的综合分析, 详细论述了这类地区土壤水力侵蚀的类型与机理、土壤侵蚀的营力机制、主要影响因素及流域产沙的预报与防治。指出, 实现土壤形成与流失、输运与沉积、“利”与“害”、侵蚀和保持的动态平衡, 是土壤水力侵蚀研究的主要方向。

关键词: 土壤侵蚀; 土壤流失; 流域产沙; 侵蚀营力; 溅蚀; 面蚀; 沟蚀

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-3409(2000)02-0039-09

A Study on Soil Erosion in Loess Hilly-gully Region

ZHANG Yi

(The World Bank Loan Project Office of Yanhe Watershed in Yan'an City, Yan'an Shaanxi 716000, PRC)

Abstract: Soil erosion is a global problem of environment. It indicated that it was a main research field in soil and water erosion to carry out the dynamic balances between forming and loss, transferring and depositing “benefit” and “ham”, erosion and conservation. According to comprehensive analysis on research result of soil erosion in loess hilly-gully region at present, the type and mechanism, effective factors, predictive model, controllable measures of water erosion and producing sediment in watershed were discussed in detail.

Key words: soil erosion; soil loss; producing sediment; erosion force; splash erosion; surface erosion; gully erosion

土壤侵蚀是全世瞩目的环境问题,《中国大百科全书·水利卷》对土壤侵蚀(soil erosion)的定义为:土壤及其母质在水力、风力、冻融、重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[1];1971年美国土壤保持学会把土壤侵蚀解释为:“水、风、冰或重力等营力对陆地表面的磨蚀,或者造成土壤、岩屑的分散与移动”。英国学者N. W 哈德逊在《土壤保持》著作中把土壤侵蚀定义为:“使土壤和岩石颗粒在外力作用下发生的转运、滚动或流失,风和水是颗粒变松和破碎的主要营力”。近年来,关于土壤侵蚀问题和土壤侵蚀机理的研究不断深入,土壤侵蚀的概念也在不断深化,综合近年来各国学者的研究成果,土壤侵蚀可划分为狭义概念和广义概念。从狭义角度来看,土壤侵蚀就是指:“在内、外营力及人类

活动的作用下,土壤及其母质(包括表层岩石)在允许流失速率之外,从其原有位置的流失过程”^[1,2];从广义角度来看,土壤侵蚀是指:“在内、外营力和人类活动的作用下,土壤及其母质(含表层岩石)结构破坏,稳定性削弱,进而从原来位置被侵蚀、搬运(流失)以及在其它位置沉积的过程”。

中国黄土高原是世界黄土分布最典型的区域,它质地均一,颗粒细小,结构松散,节理发育,堆积厚度大,在水力、重力及其它营力作用下,极易发生侵蚀,形成黄土高原特有的侵蚀沟壑系统^[3]。沟谷侵蚀的发生与发展,导致地表起伏,出现千沟万壑,进一步加剧了水土流失,带来严重后果。黄土高原丘陵沟壑区是目前世界上土壤侵蚀最强烈、侵蚀危害最严重的地区之一,具有“土壤侵蚀黑三角”的“美誉”。关

* 收稿日期:2000-04-03

国家“九五”科技攻关专题(96-004-05-13)。

于这一区域土壤水力侵蚀的研究进展较快,成果较多,具有区域土壤侵蚀研究的代表性,本文拟通过对近年来各地学者研究成果的综合分析,探求这一地区及类似地区土壤侵蚀的一般原理。

1 黄土高原丘陵沟壑区土壤水力侵蚀的类型与机理

土壤侵蚀主要包括水力侵蚀和风力侵蚀等类型。从广义角度来讲,人类工程搬运也属土壤侵蚀范畴。尽管现代人类对土壤搬运能力和范围在不断扩大,但从环境科学角度来讲,其行为的“利”与“弊”的界线划分及其“利”与“弊”的平衡仍是环境科学研究的薄弱环节,因此这里只对近年来自然降水和人工降水引起的土壤侵蚀问题研究成果做最基本的综合分析。

从各类研究成果来看,地面降水所形成的地表径流和地下水均产生泥沙。地表径流主要由于其推移力促使地面发生侵蚀,地下水渗流加大了土壤孔隙水压,引起坡面溃塌促使侵蚀搬运速率进一步加剧。研究结果表明,地面上降雨,雨滴产生溅击侵蚀;当降雨量大于土壤渗透能力时,水便沿着地面开始流走,形成面蚀;随侵蚀的进一步发展,地面出现小的凹凸不平的现象,随即形成毛沟,出现毛沟侵蚀;之后,一条占优势的小沟把其它毛沟合并,使地表径流更加集中化,形成一系列不断升级的沟蚀过程,最终完成侵蚀搬运的全过程。

1.1 溅蚀(splash erosion)

溅蚀是指裸露的坡地受到雨滴击溅引起的土壤侵蚀现象^[1]。当雨滴撞击到土壤表面时,它突然停止,这个突发的减速引起了水和土壤交界面的压力。Ghadiri 和 Payne 在 1977 年试验发现,当 5.6 mm 的水滴以 8 m/s 速度与土壤表面相碰时,最大正应力约达 6 MPa,水滴内部的高压迫使其以辐向流的形式侧向溢出。由于水土交界面高压和水流侧向剪切力的影响,土壤遭到破坏,当土壤基体内由高度破碎的孔隙壁组成时,突然施加大于 1 MPa 的压力将引起类似于塑性体在高度冲击荷载下冲击波的传播情况,穿过这些波的压力改变和相应的正、切应力的改变,将引起土壤表面颗粒的分离和运移^[4]。溅蚀的危害不仅在于破坏土壤表层结构,造成土壤局部位移,更重要的是它的扰动作用和降低侵蚀水流的摩擦力,阻止降雨入渗,从而使其它水力侵蚀方式的侵蚀危害大大增强。据吴普特等人的研究,黄土坡面雨滴击溅是薄层水流侵蚀所产生泥沙的主要来源,可

占总侵蚀量的 70% 以上,最高可达 95%,同时雨滴击溅降低薄层水流水力摩阻系数的能力达 33.86% ~ 55.56%^[5]。类似研究也证实了溅蚀通过增加其它侵蚀方式的危害。据 Meyer 和 Forster 研究,消除雨滴打击能量后,细沟侵蚀减少 50%^[6]。郑粉莉等人在黄土高原的研究结束表明,消除雨滴打击能后,坡面细沟间侵蚀和细沟侵蚀同时减少,分别为 33% ~ 62% 和 38% ~ 64%^[7]。进一步研究表明,坡面雨滴打击作用引起的侵蚀产沙量占降雨侵蚀产沙量的 27.2% ~ 45.8%^[8],溅蚀量(P)随降雨强度(I)增加而增加,但其占总产沙量的比重(%)却随降雨强度增加而减少(见图 1)。在坡度一致和坡面径流量基本相同时,降雨强度增大 1 倍,坡面侵蚀产沙量增大 47% ~ 51%^[8]。

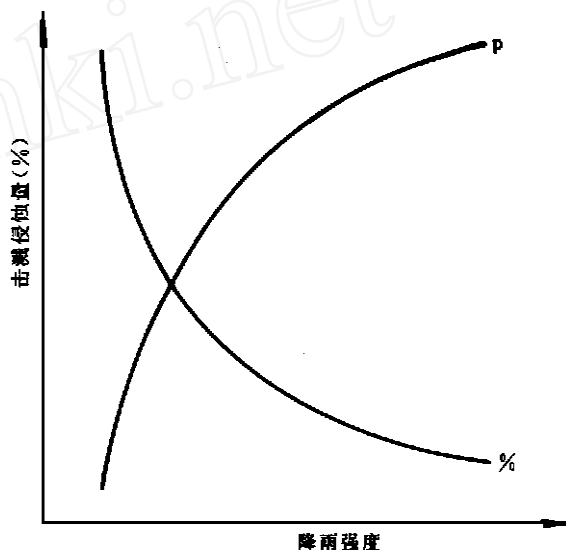


图 1 溅蚀量与降雨强度关系图

1.2 面蚀(surface erosion)

面蚀是指由分散的地表径流冲击坡面表层土壤的侵蚀现象,包括层状面蚀和鳞片状面蚀^[1]。据研究,当降雨强度高于土壤入渗能力时,在坡面土壤未形成细沟之前,坡面上形成的浅层分散微小流水的汇聚,以及当坡面形成细沟之后仍处于细沟之间水流所产生的侵蚀就称之为薄层水流侵蚀^[9]——即面蚀。在薄层水流形成之前,具有一定降落动能的雨滴已与坡面土壤发生了非弹性碰撞,碰撞结果使土壤颗粒发生分散,击溅出的这部分被分散的土粒仍需薄层水流去搬运。因此,薄层水流除它本身的侵蚀分散作用外,还有将被雨滴分散的土粒及它本身分散的土粒输出坡面的作用。据吴普特等人研究,薄层水流实际上是由许多微小流水汇聚而成的纹流,加之伴有雨滴的打击,对水流施加一个扰动作用,因此坡

面薄层水流为搅动层流(Agitated laminar flow)。距分水岭越远,薄层水流的冲刷力愈大。薄层水流的流态为急流($F_r > 1$),是超临界流^[9]。研究发现,坡面侵蚀的搬运是通过推移运动的方式完成的,坡面所产生的泥沙事实上是接触质,泥沙颗粒在运动过程中始终与坡面保持接触,当 $F_D = F \cdot \omega$ 时(式中 F_D ——水流拖拽力; f ——摩擦系数; ω ——土粒重量),就会向前滑动,在坡面产生一定位移,最终输出坡面。据人工降雨模拟研究,黄土区薄层水流的侵蚀量可用下式求得:

$$S_R = 921.497 t^{1.73}$$

式中: S_R ——面蚀量; t ——拖拽力或冲刷力。

1.3 沟蚀(gully erosion)

沟蚀是指汇集成股的地表径流冲刷破坏土壤及其母质,形成切入地表以下沟壑土壤的侵蚀形式^[11]。也是黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀的主要形式。黄土高原丘陵沟壑区沟蚀包括细沟、浅沟、切沟、冲沟、坳沟和河沟等侵蚀系统,水力侵蚀发生在暴雨洪流汇集的过程中,侵蚀强度从细沟、浅沟到切沟、冲沟逐渐增大,侵蚀愈来愈强;干沟(坳沟)和河沟出现少量淤积,侵蚀相对减弱^[10]。据研究,黄土丘陵区自分水岭向下至谷缘,坡度呈逐渐增大趋势,侵蚀强度也相应增强,自上而下由片蚀发展演化为细沟侵蚀、浅沟侵蚀、切沟侵蚀……等。发生浅沟侵蚀的部位可占沟间地面积的75%,发生浅沟侵蚀量可占坡面总侵蚀量的30%~70%^[11]。据调查,黄土高原丘陵沟壑区浅沟沟头距分水岭的距离为20~60 m,临界汇水面积为300~1200 m²,平均为657.2 m²,浅沟分布密度为10~60 km/km²。人工降雨模拟试验表明,浅沟流的流速分别是细沟流和面流的1.25倍和1.7倍,动能增加量分别为1.57和3.16倍,单位流量平均含沙量为细沟的1.5倍^[12]。

刘秉正等人对黄土高原区沟谷侵蚀研究得出相类似的结论。分水岭地区受暴雨超渗片状径流作用,产生面状剥蚀,宽度在11 m以上;细沟产生于暴雨超渗径流的形成和兼并过程中,多为平行分布,塬面农地细沟产生的临界坡长为11~110 m,临界坡度为2°。细沟发育随地面坡度增大而密度增加,林地、草地减缓地表径流,难以形成细沟,裸露的坡耕地是细沟多发区,最大密度在5.0 m/m²以上;细沟汇合冲刷加强而形成浅沟,坡耕地浅沟发育的临界坡长为30~1200 m,坡度以5~8°最多,断面呈宽浅的“V”字型;小切沟切入黄土内,集中于冲沟上游,在人为影响下可以由“V”字型变态为“U”字型,出现的临界坡长为43~5400 m,坡度以5~8°以上居

多;塬边汇集上游来水并将其下泄入沟,沟头向塬面侵蚀和潜蚀的发展不断蚕食塬面。这时坡度突然增大,浅状水流侵蚀能量剧增发育成切沟和冲沟,强烈冲刷切割坡面而成窄条碎块^[10]。沟蚀在强力水蚀基上伴有各类重力侵蚀和混合侵蚀(泥石流),从而使侵蚀危害进一步发展,沟谷侵蚀进入干沟和河沟阶段,横断面由“V”字型演变成“U”字型,比降相对平缓,沟谷洪流既受基准面影响下切或淤积,也受来水来沙影响不断侧蚀拓宽河床,引起重力侵蚀。

2 黄土高原土壤侵蚀的营力机制

2.1 内营力侵蚀

侵蚀是主要的地貌演化现象,受多种营力过程的控制和影响,内营力来自固体地球的内部,它的重要标志就是岩石圈的板块运动,结果形成全球性的构造应力场^[13]。维也纳技术大学研究表明,滑坡在某种程度上受构造应力场的控制与影响^[14]。这一结论得到众多研究成果的支持,塌地移动的优势方向与新构造应力的共轭剪切面走向一致;除了构造应力外,自重应力是影响侵蚀作用的重要应力。重力侵蚀常常与水蚀作用互促互容,加剧了侵蚀危害。据研究,在自重应力和构造应力的共同参与下,应力(自重应力和构造应力的复合应力)容易在坡角处发生集中,说明自重应力的存在更是增强了构造应力场对斜坡稳定性的影响^[15]。正是由于内营力作用的系统性,才使本来是随机的外营力侵蚀作用表现出选择性。节理面和河流的走向,代表了新构造应力场最大剪切应力方向,而破裂了的岩土面又是易遭风化和侵蚀的软弱面^[13]。据艾南山等人的研究,与最大主应力垂直的地段,应力集中程度要比其它地区高得多;而处于径向构造带上的黄河谷地大断裂,正好与近东西向的应压力垂直,所以该地区应力容易集中,岩石容易破碎,是侵蚀的脆弱地带^[16]。由此可见,构造应力和自重应力场不但对崩塌、滑坡和泻溜等重力侵蚀存在影响,而且对水力侵蚀、风力侵蚀、冰川侵蚀和冻融侵蚀等都有控制和影响。

2.2 外营力侵蚀

外营力是侵蚀过程中最为活跃的营力过程。它的侵蚀作用明显,是侵蚀过程的直接参与者。地表物质的搬运转移过程,外营力是最明显的执行者和参与者;在崩塌、滑坡等现象中,外营力是积极的诱发因素。外营力包括水力、风力、冰川作用、冻融作用等。需要指出的是,外营力的侵蚀方向是随机的,而内营力则是系统的。由于系统的内营力的存在,并对

侵蚀过程进行控制与影响,因而使随机的外营力侵蚀表现出一定的选择,使侵蚀的强度具有强烈的地域差异性。

2.3 人类活动

人类活动是一种重要的地质营力,这是侵蚀营力研究的重要进展。事实上,人类的生产活动,如耕作、垦殖、放牧、建筑、采矿、修路及水土保持活动等,都直接或间接地影响侵蚀过程^[13]。从广义角度来讲,人类活动对土壤的搬移本身就是土壤侵蚀的重要类型。尽管人类活动不能控制或改变内营力过程,但可在一定程度上影响或改变外营力过程,使其搬移与沉积的形式及速率发生变化。从系统分析的观点来看,任何侵蚀过程都可以看作是将一组自然输入要素转化为输出过程,在这个变换过程中,人类活动作用的结果使原来的输入输出关系发生了改变,从而使原来的输出扩大或缩小。用 Y 代表输出, M 代表人类活动程度,这样人类活动的变化对侵蚀的影响程度可以表述为:

$$M = \frac{(\Delta M / M)}{(\Delta Y / Y)} \times 100\% \quad [13]$$

进一步研究表明,人类活动对土壤侵蚀的影响包括沉积和输移两个方面。从历史过程来看,人类对土壤侵蚀主要是通过破坏植被和不合理的土壤移动(如采矿、修路等)来完成的;而土壤保持则主要通过合理的水保工作(如增加植被度、工程拦蓄等)来完成。土壤在没有林草保护时,雨滴直接打击土壤,土粒分散,堵塞孔隙,形成结皮,降低了土壤入渗能力,增加了径流侵蚀,使土壤抗蚀性进一步下降。不仅如此,林草地开垦和农作时,人为造成表层土体侵蚀性移动,即将浅沟坡面较肥沃的表土均向浅沟沟槽作推移,这样当遇暴雨时形成细沟或浅沟将这些物质冲走,形成新的下切沟槽。调查结果表明,林草地开垦后中浅沟当年下切深度达10~43 cm,降低了侵蚀基准面,进一步加剧了土壤侵蚀。野外试验表明,林地当年开垦后侵蚀量增加2 900~25 000倍,仅7~9三个月侵蚀模数就可达13 800~20 100 t/km²,而林地只有0 804~0 570 t/km²^[17]。黄土丘陵沟壑区林地开垦10年后,耕层土壤有机质由开垦前5.38%下降到0.84%,下降84.3%,土壤容重增加了69.3%,非毛管孔隙度减少44.0%,水稳性团聚体降低56.8%,稳渗速率下降76.9%,径流量增加5~10倍,土壤崩解率和冲刷量分别为林地的20倍和16倍。据蔡庆野外人工降雨试验,在雨强1.38 mm/min时,降雨30 min,林地土壤全部入渗(38.6 mm),开垦地仅入渗8.6 mm。同样,合理的人工干

预可有效控制和缓减土壤侵蚀,初步的治理措施试验研究表明,在浅沟底部种草后径流流速较裸地减少51.9%,减沙效益可达87.8%,调控发生浅沟的临界坡度、坡长和汇水面积,也能有效地削减水流能量对侵蚀的作用^[12]。人类活动是一种特殊的地质营力,它对侵蚀的影响已是举世关注的问题^[13]。

3 影响土壤侵蚀的主要因素

3.1 降水

黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀以水蚀为主,土壤侵蚀主要是伴随降雨径流,尤其暴雨对土壤侵蚀影响最大^[18]。可蚀性降雨是指能够引起土壤流失的降雨,据研究,一般情况下黄土高原区只有全部满足降雨量大于10 mm、平均降雨强度大于1.2 mm/h、最大降雨强度大于4 mm/h条件的降雨才明显产沙,称之为产沙降雨,否则为不产沙降雨^[19]。众多研究成果表明,产沙量与降雨量有较强相关关系,因此根据降雨量预测黄土高原地区径流、产沙、输沙变化趋势是可行的^[20]。据王万忠同志研究,按能够产生侵蚀模数1 t/km²计算,黄土地区多年能够引起土壤流失的雨量平均为163.0 mm,其中坡面为128.1 mm,沟道小流域为197.5 mm,分别占年雨量的30.6%、25.4%和35.9%,占汛期雨量的44.4%、36.8%和52.0%。若按轻度侵蚀(100 t/km²)的雨量计算,该雨量为120 mm,占年降雨量的5%~7%,平均为23%,占汛期雨量的33%^[21]。

3.1.1 降雨量与土壤流失量的关系 众多研究结果表明,降雨量同土壤流失量呈幂函数关系:

$$M = ap^b$$

式中: M ——土壤流失量(t/km²); P ——一次降雨量(mm); a, b ——系数,其中 $b > 1$ 。

实测黄土高原地区降雨量同土壤侵蚀的关系曲线见图2。据研究,黄土高原10~30 mm降雨的土壤流失次数最多,占整个土壤流失次数的55%;平均土壤流失量与降雨量大小呈正相关关系,极其严重的土壤流失现象一般都是由40~60 mm的暴雨所引起;土壤流失量以20~50 mm降雨占的比值最大,流失量占土壤流失总量的48.7%。

3.1.2 降雨历时与土壤流失量的关系 降雨历时与土壤流失量也呈幂函数关系,实测黄土区降雨历时与土壤流失的关系见图3。从黄土高原土壤流失的实测结果来看,土壤流失次数主要集中在1~12 h的降雨中,其次可占整个历时总次数的66.2%,其中1~2 h降雨产生的土壤流失次数最多,占

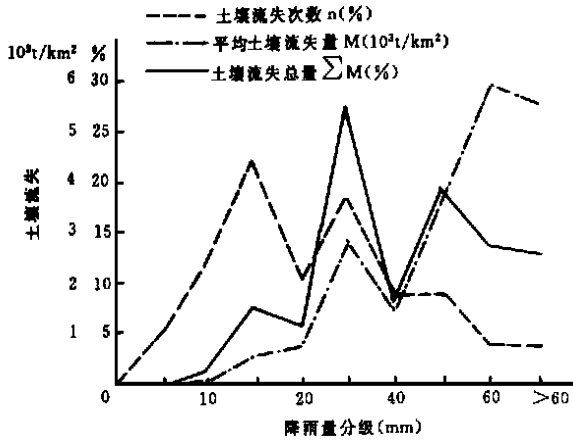


图 2 黄土地区雨量分级与土壤流失量的关系变化曲线

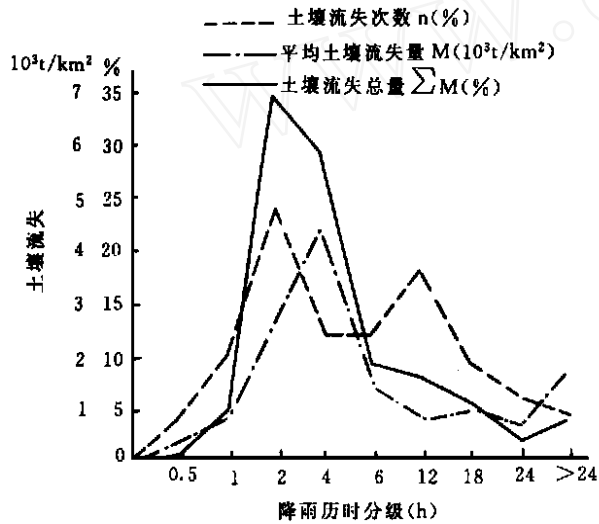


图 3 黄土地区降雨历时分级与土壤流失量的关系变化曲线

3.1.3 降雨强度与土壤流失量的关系 黄土高原土壤侵蚀与降雨强度关系曲线见图 4。土壤流失次数与降雨强度呈负相关关系,即降雨强度愈大,发生频率愈低,土壤流失的次数相应也愈少。降雨强度 15 mm/h 的降雨土壤流失次数最多,占总次数的 87.0%;平均土壤流失量与降雨强度大小变化呈正相关关系,严重的土壤流失现象主要由 20 mm/h 的降雨所引起;土壤流失总量主要是由 20 mm/h 以下降雨所引起,可占总土壤流失量的 73.6%,其中 10 ~ 20 mm/h 的降雨所引起的土壤流失量占总量的 40.0%。

3.1.4 瞬时雨率与土壤流失量的关系 黄土高原

土壤侵蚀与瞬时雨率呈规则的线性关系(见图 5):

$$M = a + bP_t$$

式中: M ——土壤流失量(t/km^2); P_t —— t 时段最大降雨量(mm); t ——最大降雨时段(m in); a, b ——系数。

a 与 t 呈正相关, b 与 t 呈负相关。

造成黄土高原土壤流失的降雨主要是短历时(1 ~ 4 h)、中雨量(20 ~ 50 mm)、高强度(5 ~ 20 mm/h、7 mm/5 m in)的暴雨。

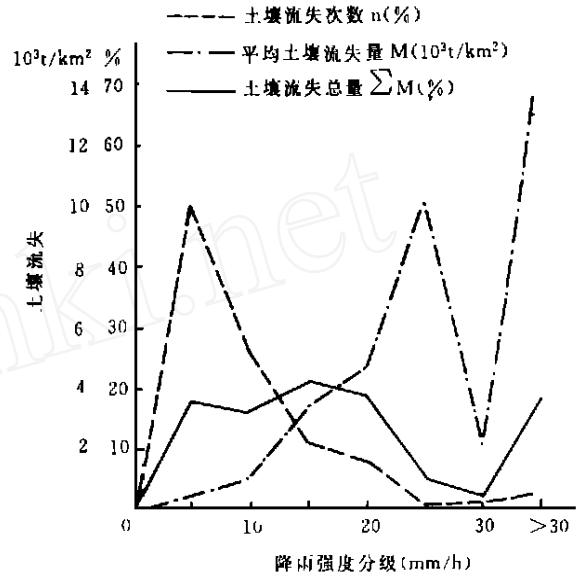


图 4 黄土地区降雨强度分级与土壤流失量的关系变化曲线

3.2 地形

土壤侵蚀在很大程度上依赖于地形因素,包括坡度、坡长、坡形等,据研究,浅沟发育的数量和密度均与坡度、坡长呈正相关关系^[10]。沟谷密度和沟谷深度对侵蚀的影响主要表现在两个方面:一是提供临空面,沟谷密度愈大,地表与降雨、径流的冲刷力和侵蚀的面积就愈大;二是改变降雨径流的动能,沟谷密度、深度愈大,降雨径流的冲刷力和侵蚀力就愈大,并且易触发重力产沙。

3.2.1 坡度与土壤侵蚀的关系 坡度不仅影响土壤侵蚀程度,而且影响侵蚀的方式,随着坡度增加,土壤侵蚀将由面蚀逐渐向沟蚀、崩岗、滑坡、崩塌方向发展,几种侵蚀形式组合最严重的是 20 ~ 40° 坡面(见图 6)^[22]。据王治华等人研究,黄土高原丘陵沟壑区在 0 ~ 28° 之间斜坡,坡度愈大,斜坡土壤侵蚀愈强,斜坡 > 28° 时,坡度愈大,斜坡侵蚀反而变弱^[23]。广泛研究结果表明,坡度与土壤侵蚀也呈幂函数关系,可用 $y = ax^b$ 数学模型表示。陈明华等人研究结果表明,坡度与侵蚀的关系式为:

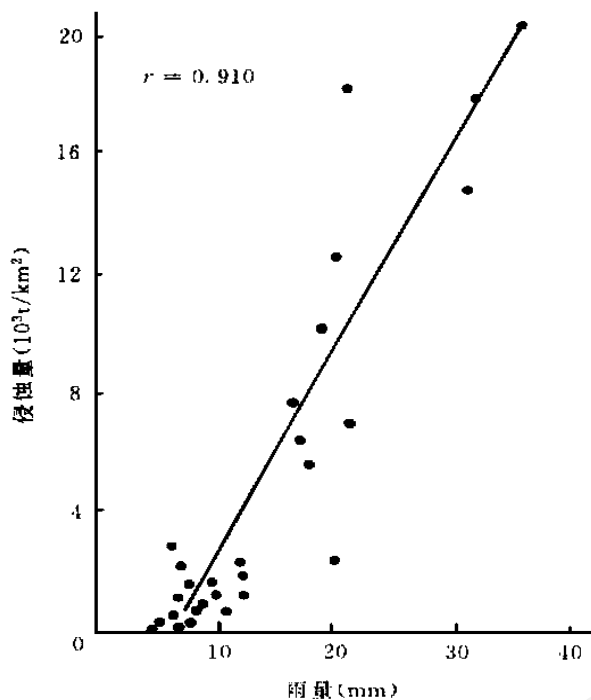


图5 黄土地区最大降雨量与土壤流失量的相关图

$$S = (\theta/10)^{0.78}$$

式中: S ——坡度因子; θ ——坡度(%)。

另据研究,坡度与土壤侵蚀方式也有密切关系,黄土高原丘陵沟壑区 0~5° 坡面以面蚀为主, 5~15° 坡面以细沟侵蚀为主, 15~25° 坡面以浅沟侵蚀为主^[12], 25~35° 以小切沟、切沟、冲沟侵蚀为主。而重力侵蚀主要集中于切沟、冲沟和干沟, 其中崩塌多产生于 55° 以上陡坡, 是由沟底下切、冲刷坡脚造成土体失稳而致, 出现侵蚀频率占重力侵蚀 40%, 侵蚀土体占重力侵蚀的 38.2%; 滑坡 35~55° 居多, 出现频率为 3.5%, 侵蚀量占重力侵蚀的 58.8%; 泻溜广泛分布于 >35° 沟坡裸地, 出现频率为 56.5%, 侵蚀量占重力侵蚀的 3%^[10]。丘陵沟壑区重力侵蚀的搬运主要依靠水力侵蚀来完成。

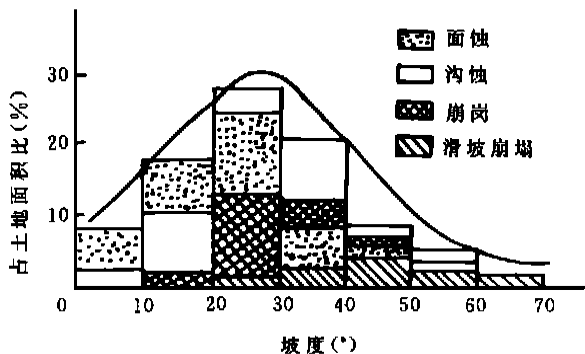


图6 坡度与土壤侵蚀形式的关系

3.2.2 坡长与土壤侵蚀的关系 坡长与坡度一样,也是影响土壤侵蚀的重要因素之一。在坡度相同时,随坡长增加,地表径流增强,土壤侵蚀量增大,坡长与土壤侵蚀也呈幂函数关系(见图7)。据陈明华等人研究,坡长与土壤侵蚀率的关系曲线为:

$$L = (l/20)^{0.41}$$

式中: L ——土壤侵蚀率; l ——实际坡长(m)。

据江忠善等人研究,坡度大时,侵蚀随坡长增大而增加,坡度和雨强都小时则相反。

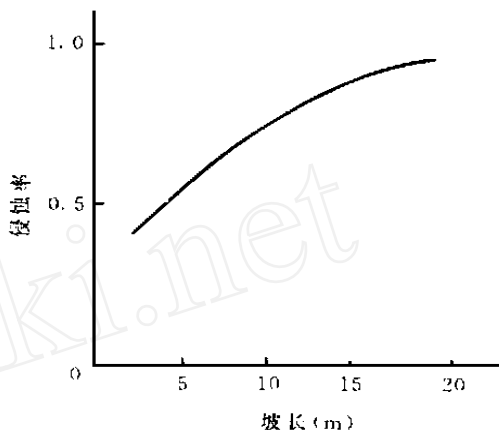


图7 土壤侵蚀率与坡长的关系

3.3 土壤

在水土流失过程中,土壤是被侵蚀的对象,土壤抗蚀能力是影响土壤侵蚀强度的重要因素。土壤的水稳性团聚体、容重、孔隙度及土壤渗透性和崩解等性质,都是反映土壤抗侵蚀性能的重要参数。黄土高原土壤大部分(50%以上)颗粒组成是粉沙粒径,质地均细,组织疏松,缺乏团粒结构,土粒间主要靠碳酸盐胶结,极易在水中崩解与分散,抗蚀力薄弱,易被冲刷。黄土高原沟壑区水蚀过程是由超渗产流所引起,当降雨强度高于土壤入渗能力时,坡面开始产流。广泛研究结果表明,随着土壤入渗时间的增加,土壤入渗强度(f)趋于一个定值(f_c)(见图8)^[15], f 值越大,产生侵蚀的可能越小。良好的植被不仅可以提高土壤空隙度,而且提高了土壤团粒含量,使土壤的入渗强度增加,耐冲性也增大。耕作过程虽然增加了土壤的空隙度,但同时破坏了土壤结构,减弱了土壤的耐冲性,成为暴雨侵蚀的祸根,土壤成分是影响土壤侵蚀的重要因素,特别是有机质对降低土壤可蚀性有重要作用。Ekwue 的研究表明,草和泥炭这种土壤有机质能显著减少击溅分离^[2]。

3.4 植被

植被截留降水,减少雨滴的冲击,改善土壤结构,提高土壤抗蚀能力,增加地面糙率,减轻径流速

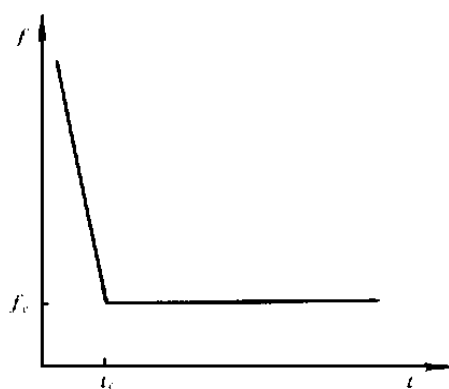


图8 黄土区土壤入渗概化曲线

度。据研究, 植被减少侵蚀作用随植被度增加而增加, 当植被度达到 90% 时, 将减少径流 90% 以上 (详见图 9)^[18]。在植被良好情况下, 林草地土壤的冲刷模数随坡度增大增加的速率很小, 这与农耕地有很大差别^[24], 说明植被恢复后坡度因素对土壤侵蚀的影响被削弱 (见图 10)^[17]。据查轩等人对黄土高原丘陵沟壑区次森林区的研究, 林草区由于植物根系发达地表具有较厚的枯枝落叶层, 加之植被形成的生物篱, 有良好的拦截泥沙作用, 使原浅沟发育不但停止, 而且发生了不同程度的淤积, 最厚达 60~70 cm^[17]。

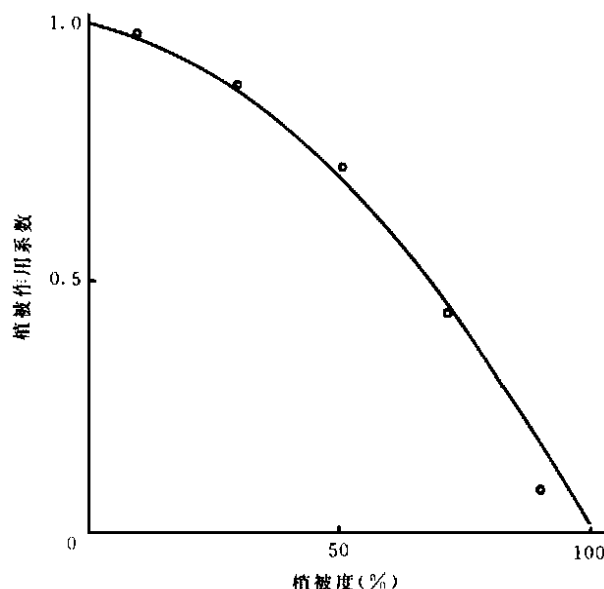


图9 植被度与植被作用系数关系

在良好的自然植被下, 由于表层枯落物和腐殖质的积累, 土壤水稳性团聚体的形成和提高, 土壤孔隙度等土壤理化特性不断改善, 这不仅保护了地面免受雨滴打击, 而且提高了土壤入渗能力和抗冲刷能力。据测定, 黄土高原林草地土壤表层 > 0.25

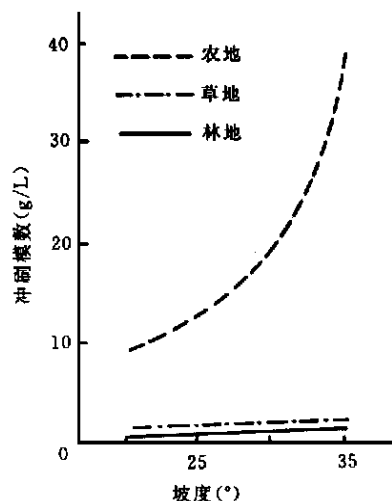


图10 冲刷模数与坡度相关图

mm 水稳性团聚体高达 74.2%, 是黄土母质 14.79% 的 5.3 倍, > 0.5 mm 团聚体则是黄土母质的 40~50 倍。林草植被下土壤容重仅为 0.62~0.89, 非毛管孔度由母质层的 2.6% 增加到表层的 20.6%, 林地和草地土壤表层的稳渗速率分别为 12.5 mm/min 和 10.45 mm/min, 在前 30 min, 入渗率可达 17.37 mm/min。林地表层的入渗速率是 20~35 cm 土层的 2.1 倍, 是 100 cm 土层的 14.4 倍, 基本上可容纳黄土高原强度大、历时短的暴雨, 林草地在任何雨强或坡度下, 拦蓄径流的效益为 76%~90%, 拦蓄泥沙效益达 98% 以上^[17]。

4 土壤侵蚀预报与防治

4.1 黄土高原丘陵沟壑区流域产沙预报

土壤侵蚀是流域产沙量的基础, 流域产沙量是修筑淤地坝、水库设计、水土保持和效益分析的重要依据。传统的土壤侵蚀预测大致可分为两个方向^[13]:

一是以美国土壤保持学界为代表的用统计方法求得侵蚀量与降水因子及其它因子的经验公式:

$$A = RKLSCP$$

式中: A ——年土壤流失量 (kg/m^2); R ——降雨侵蚀因子; K ——土壤可蚀性因子; L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——农田耕作经营因子; P ——土壤侵蚀控制因子。

二是以卡林 (W. E. H. culling) 为代表的建立一定的物理基础模型:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial H}{\partial y}$$

近年来我国学者对黄土高原土壤侵蚀测报做了

大量研究,取得了不少经验公式可供借鉴。

(1) 根据降雨预测一次降雨流域产沙得经验公式,如:

$$S = 585.80 P_m^{1.2856} I_a^{0.8875[19]}$$

调整系数为: $C_s = \begin{cases} 2.2956 & \text{(前期多雨量降雨)} \\ \frac{1}{4.4586} & \text{(前期久无雨降雨)} \\ 1 & \text{(其它降雨)} \end{cases}$

式中: S ——一次降雨产沙率; P_m ——大于 4 mm/h 的一次降雨量; I_a ——平均降雨强度。

(2) 根据暴雨径流预测一次暴雨产沙求得经验公式,如:

$$M_s = 0.37 M^{1.15} J K P^{[18]}$$

式中: M_s ——一次暴雨的流域产沙量模数 (t/km^2); M ——一次暴雨的洪量模数 (m^3/km^2); J ——流域平均坡度,以比值计; K ——土壤可蚀性因子,以黄土中砂粒和粉粒占总量比例表示,以小数计; P ——与流域有关的植被作用系数(查图 9)。

4.2 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀的防治

土壤侵蚀危害是目前世界上危害最严重的生态环境问题之一,土壤侵蚀防治是水土保持和生态环境建设的重要内容。就现在人类认识水平和技术水平而言,引起黄土高原土壤侵蚀的内外营力人类还难于直接干预,因此,土壤侵蚀防治的重心应从改变人类活动角度入手。通过改变地形地貌特征,增加地表植被度和改善土壤结构等途径来实现对土壤侵蚀的防治,逐步实现侵蚀与风化、搬运与沉积动态平衡的土壤平衡机制。

(1) 减缓地表坡度,缩短耕地坡长,把水蚀危害控制在面蚀和溅蚀范围以内。从各种研究结果来看,5 是面蚀和沟蚀的临界坡度,而沟蚀是土壤侵蚀的主要方式,约占黄土高原沟壑区土壤侵蚀的 75% 以上^[25],可见把耕作土地坡度控制在 5 以内,是减少黄土高原土壤侵蚀的重要途径。在坡度 > 5 的坡地修建水平梯田是开展农业生产与防治土壤侵蚀相结合的重要技术途径。

各方面研究结果表明,黄土高原沟壑区发生浅沟侵蚀沟头距分水岭的距离为 20~60 m,在塬面较为完整区域可根据浅沟或细沟发生的距离设置生物篱,如沿等高线种植一行或多行经济树木、优质牧草,创造侵蚀就地沉积的地面条件,而且这样形成的农果(草)带状间作法的生态经济学意义还远不止如此;减少侵蚀危害还可通过工程措施来实现,如一定距离沿等高线修筑沉沙滞流槽,等高垄沟种植是这类工程措施最典型最极端范例。据延安等地试验观

测,垄沟耕作可全面拦蓄 30 mm 以下一次降水^[26],缓坡拦蓄效益更好。

(2) 改良土壤,增加入渗,提高土壤抗蚀能力。有机质和腐殖质具有增加土壤团粒结构,提高土壤孔隙度,增加入渗,抗雨滴击溅,降低土壤可蚀性作用。有机肥的使用在减少农作土壤侵蚀方面非常重要。据 Ben-Har 等人研究,给土壤施加阴离子聚合物既能增加渗透率也能增加侵蚀。聚合物促进凝聚作用,可防止细粒物质在土壤表面形成结皮,从而增加渗透率,但团粒也容易被薄层片流所搬运。Agassi 等人在田间实验中使用磷肥产生的副产品——磷石膏 ($5 t/hm^2$),可减少径流 25%,控制侵蚀 1%~3%。磷石膏能向渗水释放电解质,从而防止颗粒分散,有助于保持土壤的原始结构。用磷石膏处理黄土可以使其最终渗透率从 2.0 mm/h 提高到 23.5 mm/h,对 80 mm 暴雨的总吸收从 12.3 mm/h 提高到 64.2 mm/h。Smith 等人的报道也表明聚丙烯酰胺(PAM)可以提高渗透率 7 倍之多^[2]。通过化学途径减少土壤侵蚀是水土保持研究的重要方向。

(3) 增加植被度,减少人为土壤扰动,把土壤侵蚀降至可蚀范围之内。植被在缓和土壤侵蚀方面的作用已被广泛认可,并被广泛用于水土保持措施之中。生物措施和工程措施之间的结合问题引起了普遍关注。广泛实践证明,在干旱半干旱地区采取隔坡反坡或鱼鳞坑整地形式造林具有良好的水保效益,而在林区和湿润、半湿润地区能够有效拦蓄径流的工程措施要投入较大的人力和物力,在目前经济技术条件下有较大推广难度。世界上已有许多国家和地区(如美国、日本、西欧等国家和地区)以法律的形式限制土壤翻耕次数,并广泛推行免耕种植,最大限度减少对土壤的扰动作用,达到保持土壤的目的。在美国,60% 以上的秸秆要求留在农田里以减少冬季风蚀危害,并增加表层土壤的有机质含量。采矿、修路所移动的土方要求及时种植牧草和树木。在发达国家防止土壤侵蚀已成为人们的习惯行为和道德行为。

5 结 语

土壤侵蚀危害是世界性的环境问题,其正在成为全民关注的令人忧虑的环境危机,关于土壤侵蚀的研究也已从对其危害性质的研究转向对其危害机理和危害防治技术的研究。对土壤水力侵蚀的研究和应用主要应集中在以下几个方面:

(1) 合理开发土地资源,并通过各种技术途径保

护土壤免受侵蚀危害,使土壤流失速率与风化形成的速率保持一致,形成土壤自身“代谢”的动态平衡。

(2)保持水土,使河道中的泥沙冲淤保持动态平衡,把土壤侵蚀控制在河道输运能力范围以内,形成

沟道输移和沉积保持动态平衡的良性水系机制。

(3)充分而合理地利用土壤侵蚀造福人类,形成和完善化害为利的技术体系,保持土壤侵蚀“利”与“害”的动态平衡。

参考文献

- 1 刘秉正,等编著.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1997
- 2 David L. Higgitt Progress in Physical Geography. 1991(1)
- 3 朱显谟.黄土高原水蚀类型及其有关因子[J].水土保持通报,1982(3)
- 4 Prasad, S N, 等(周森林译).土壤侵蚀过程的降雨能量组成[C].第四次国际泥沙会议论文集
- 5 吴普特,等.黄土坡面薄层水流侵蚀试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996, (1)
- 6 周延安,尉庆丰,王全九编.土壤植物大气连续体系中运输理论与方法[M].西安:陕西科学技术出版社,1998
- 7 郑粉莉,等.降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J].人民黄河,1995, (7)
- 8 郑粉莉.坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究[J].水土保持通报,1998, (6)
- 9 吴普特,等.坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究[J].水土保持学报,1992, (1)
- 10 刘秉正,等.黄土塬区沟谷侵蚀与发展[J].西北林学院学报,1993, (2)
- 11 中科院西北水保所主编.黄土高原杏子河流域自然资源与水土保持[M].西安:陕西科学技术出版社,1986
- 12 唐克丽.黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J].科学通报,1997, 42(10)
- 13 徐建华,等.侵蚀过程的营力机制[J].水土保持学报,1989, (4)
- 14 Hauswirth, E. K, Pirkl, H. Roch, K. H, Scheidegger, A. E. Untersuchungen einer Talzuschubes bei Lesach (Kals, Osttirol). Verh. - Ged. B- A, 1979, (2)
- 15 中科院武汉岩土力学所编著.岩质边坡稳定性的试验研究与计算方法[M].北京:科学出版社,1985
- 16 艾南山.论应力侵蚀[J].水土保持学报,1987, (1)
- 17 查轩,等.植被对土壤特征及土壤侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,1992, (2)
- 18 江忠善,等.黄河中游黄土丘陵沟壑区小流域产沙量计算[C].河流泥沙国际学术研讨会论文集,北京:光华出版社,1980
- 19 王治华,等.降雨与流域产沙[J].中国科学,1992, (9)
- 20 贾绍凤,等.黄土高原降雨、径流、产沙相互关系的研究[J].水土保持学报,1992, (3)
- 21 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J].水土保持通报,1993, (4)
- 22 陈明华,等.坡度和坡长对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,1995, (1)
- 23 王治华.下垫面与侵蚀温度及其产沙量[J].中国科学,1992, (10)
- 24 刘秉正,等.刺槐林地土壤抗冲性的试验研究[J].西北林学院学报,1984, (1)
- 25 陈永宗,等著.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1987
- 26 周万龙著.延安地区黄土高原生态农业的实践与探索[M].西安:陕西人民出版社,1995

(上接第33页)

参考文献

- 1 中国科学院国家计划委员会自然资源综合考察委员会,等.“安塞资源与环境系列图”说明书——黄土高原遥感调查研究[M].北京:测绘出版社,1988
- 2 刘万铨.水土保持是黄土高原改善生态环境保证农业可持续发展的必由之路[J].中国水土保持,1999, (4)
- 3 张维邦.论黄土高原生态环境遭到彻底破坏的祸根[J].水土保持通报,1989, (1)
- 4 骆世明,等.农业生态学[M].长沙:湖南科学技术出版社,1987
- 5 郭书田,等.中国生态农业[M].北京:中国展望出版社,1988
- 6 张壬午,等.生态农业的技术与设计[M].石家庄:河北科学技术出版社,1990
- 7 孙志明.坚持综合治理优化生态环境再造延安秀美山川[J].陕西水土保持,1999, (2)
- 8 梁一民,等.黄土丘陵区水土保持型生态农业的理论与实践[J].中国水土保持,1992, (9)
- 9 焦峰,等.燕儿沟流域土地利用现状及合理利用途径初探[J].水土保持通报,1998, (7)