

黄河中游地区开发建设新增水土流失预测方法研究

蔺明华, 杜靖澳, 张瑞

(黄委晋陕蒙接壤地区水土保持监督局, 陕西 榆林 719000)

摘要: 以降雨—入渗—产流原理、土壤侵蚀原理及河流输沙理论为基础, 根据天然降雨、人工降雨、放水冲刷等试验研究成果及典型区域开发建设新增水土流失量分析, 建立了适用于开发建设项目新增水土流失评价的数学模型法、新增土壤侵蚀系数法和水土流失系数法等 3 种方法, 它可应用于黄河中游地区开发建设项目人为水土流失预测和分析评价, 对其它地区的开发建设项目水土流失预测具有借鉴作用。

关键词: 开发建设; 新增水土流失; 预测方法

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2006)01—0061—07

中图分类号: S157

Prediction Methods for Newly Increased Soil and Water Loss in Development and Construction in Middle Reaches of Yellow River

LIN Ming-hua, DU Qing-ao, ZHANG Rui

(Supervision Division of Soil and Water Conservation Contiguous

Area of Shaanxi Shanxi and Inner Mongolia of YRCC, Yulin 719000, Shaanxi Province, China)

Abstract: Based on the experimental results by natural rainfall, simulated rainfall and artificially added flushing water, and the analyses of recent increase in the amounts of soil and water loss occurred in the development and construction in the typical area, we found three prediction methods for the development and construction project. They are the mathematical modeling method for evaluation of newly increased soil and water loss, the coefficient method for newly increased soil erosion, and the coefficient method for newly increased soil and water loss. The methods may be used for the prediction of man-made soil and water loss in implementing the development and construction projects in the middle reaches of the Yellow River, and for a reference to other similar area.

Keywords: development and construction; new soil and water loss; prediction method

黄河中游地区自然条件恶劣,生态环境脆弱,是我国水土流失最严重的地区。同时,该区域自然资源非常丰富,自改革开放以来,随着国民经济的发展、综合国力的提高,城镇建设日新月异,农村面貌焕然一新,各类开发建设项目在该区域遍地开花,尤其是 20 世纪 80 年代中后期以来,在国家、集体、个人一齐上的思想指导下,围绕煤炭、石油、天然气的开发,各类建设项目蓬勃发展,其规模之大、数量之多,在国内外建设史上是非常罕见的,该区域正在建设成为我国的能源重化工基地,成为我国现代化建设中具有承东启西战略意义的地区。在资源开发促进国民经济发展的同时,使该区原本脆弱的生态环境进一步恶化,人为水土流失规模日益加大。如何对开发建设已造成的水土流失进行分析评价?对未来开发建设可能产生的水土流失进行预测?以便于有针对性地开展生态环境保护 and 重建,是目前水土保持生态建设和水土

保持预防监督工作中遇到的最具挑战性的问题。本研究试图建立黄河中游地区开发建设已造成水土流失的评价和开发建设可能产生新增水土流失的预测方法体系,以便指导开发建设水土保持分析评价和预测,从而提高分析评价和预测的精度与时效,为合理地布局水土保持措施提供技术依据。

1 新增水土流失预测方法应用现状

1.1 研究现状

开发建设新增水土流失研究是一新的研究领域,我国对这方面的研究是随着黄河中游地区大规模的开发建设而展开的。20 世纪 80 年代中期,黄委会组织黄科院、绥德站等单位开展了黄河中游地区开发建设人为水土流失的调查,“七五”、“八五”期间,国家有关部门组织有关单位对开发建设新增水土流失及其对环境的影响进行了大量研究,国家自然科学基金、水

利部水沙变化研究基金、黄委会水土保持基金也相继开展了此项研究,提出了“安太堡露天煤矿环境影响评价报告书”^[1]、“内蒙古准格尔煤田第一期工程地表形态破坏环境影响评价”^[2]、“神府东胜矿区水土流失环境影响评价报告书”^[3]、“黄土高原地区矿产资源评价”、“黄土高原地区北部风沙区土地沙漠化综合治理”^[4]、“神府东胜矿区开发对水土流失及入黄泥沙的影响研究”^[5]、“黄河中游大型煤田开发对侵蚀和产沙影响”^[6]等一系列研究成果,黑龙江省水保所刘功贤等人,在应用其本省的土壤流失方程预测开发建设项目水土流失方面也作了有益的探索^[8]。上述研究都没有对开发建设产生新增水土流失的主要下垫面进行过系统的侵蚀研究。

1.2 应用现状

目前,我国在开发建设新增水土流失研究成果应用方面,除了进行新增水土流失状况的后评估外,应用最多的是在开发建设项目水土保持方案编制过程中,进行新增水土流失量预测。我国目前在开发建设项目新增水土流失预测方面,主要应用模型法和类比法等两类方法。

数学模型法以概念(推理)性数学模型为主,有根据降雨—径流—含沙率推算流失量的;也有根据开发建设前后侵蚀模数推算新增流失量的;其次,还有利用美国通用土壤流失方程或区域性土壤侵蚀经验模型进行流失量计算的。类比法一般采用新增土壤侵蚀系数类比法、毗邻地区侵蚀模数类比法或流失系数(流失比)类比法。

1.3 预测中存在的问题

(1) 用流域平均侵蚀模数代替建设项目区域的侵蚀模数不合理。由于开发建设产生新增水土流失主要下垫面的侵蚀试验研究成果较少,在现行的开发建设项目新增水土流失预测方法中,侵蚀模数的背景值多是采用建设项目所在流域获得均值,而各项项目的建设多是在微地形上进行的,微地形的地形、地质和一个流域平均的地形、地质情况差异较大,因此其侵蚀模数也不能用流域平均侵蚀模数代替,应该用项目所在微地形的值。同理,项目建设过程中和建成后的侵蚀模数也应该用新的微地形上的值。此外,扰动地面和弃土弃渣堆的抗蚀力逐年加大,其侵蚀模数是递减的,若在影响期内每年都按一恒定值预测流失量就会失真。

(2) 流失系数(流失比)的确定不科学。由于缺乏系统的调查研究和试验研究,弃土弃渣流失系数(流失比)未考虑其堆放位置与形态,取值任意性较大,导致弃土弃渣新增流失量的计算存在较大偏差。

(3) 用通用流失方程计算流失量,过程繁杂、因子难以确定。美国通用土壤流失方程是建立在大量的试验研究基础上的,方程中的 6 个因子需进行大量系统的单因子对比试验,才能分析确定各因子的相关参数,而目前国内尚未系统地开展过此方面的研究,零星的研究成果不足以支持该方程的应用。再者,美国通用流失方程仅仅适用于坡度较小的地区,所以,在黄河中游广大的山区、丘陵区的水土流失分析计算中利用该方程有些勉强。

2 新增水土流失预测方法研究

2.1 开发建设新增水土流失机理

2.1.1 土壤侵蚀机理 黄河中游地区的土壤侵蚀以水蚀为主,其侵蚀动力主要为降雨过程中雨滴的击溅及坡面径流的冲刷作用。在侵蚀过程中土壤是侵蚀的对象,土壤具有抵抗径流侵蚀破坏的能力,其性质不同抵抗侵蚀的能力也不同,土壤水蚀的产生是通过降落在土壤表面的具有一定能量的降雨,首先与地表土壤发生非弹性碰撞,使土壤原结构遭到破坏,并进而消除以及降低土壤之间的粘合作用,最终是土壤颗粒发生分散、跃移,处于“孤立”及“半孤立”状态。当土壤的入渗能力小于降雨的供水能力之后,坡面即产生径流,通过径流的冲刷、侵蚀能力,不但可以将坡面上处于“孤立”及“半孤立”状态的土壤颗粒搬运输出坡面,同时也将径流本身侵蚀掉的部分土粒搬运输出坡面。

随着降雨的继续,坡面上径流的不断增大,侵蚀效果愈来愈显著;同时由于汇流以及径流集中的作用,坡面径流最终都将输入沟道,并且在沟道径流通过的两壁以及沟道内也产生侵蚀;而且最终坡面上输入沟道的泥沙径流都将通过沟道输入更高一级的支沟,直至黄河。

朱显谟先生就曾把土壤抵抗径流破坏作用的能力区分为抗蚀和抗冲 2 种性能^[9],并指出,在黄土上见到的土壤侵蚀现象常常是流失和冲刷同时进行,实际上冲刷过程进行的非常激烈,而大大掩盖了流失的强度^[10];周佩华等人的研究^[11]也表明,在黄土高原以各种类型的沟蚀为主,在片蚀和细沟侵蚀阶段,细沟侵蚀量占总侵蚀量的 80% 左右,黄土高原土壤侵蚀异常强烈的原因之一,就是土壤抗冲性弱。黄河中游的广大地区雨量稀少,地下水埋藏深,包气带(黄土层)厚度可达数十米甚至上百米,且包气带常为干土,由于包气带缺水量大,一般降雨不可能使包气带含水量达到田间持水量,且植被差,土质贫瘠,下渗能力较低。产流的方式主要是雨强超过渗强而形成的地面

径流,即超渗产流。自然界的产流过程是在流域下垫面上由降雨、蒸发、土壤含水量等具有随机性质的各因素相互作用下的综合发展过程,径流是降雨和下渗的矛盾发展的产物。

土壤侵蚀是径流搬运的结果,径流是侵蚀对象——泥沙的主要侵蚀力和载体,有水(径流)才有沙,无水就无沙,只要土质坡面上有径流产生,就有土壤侵蚀发生。一定的下界面具有一定的降雨、入渗、径流关系和水沙关系,其侵蚀强度随着降雨的变化而变化,水沙关系同时也发生变化。

开发建设使大量的植被和地表土壤结构遭到破坏,同时产生了大量的人为堆垫地貌及弃土弃渣,导致了因地表土壤裸露、结构松散而相对原生地面产生新增水土流失。

2.1.2 开发建设项目新增水土流失机理 开发建设过程中,破坏了地表原有植被,破坏了地表土壤结构,形成了人为扰动地面,使土壤结构松散,抵抗侵蚀的能力极大地减弱;同时,在开发建设过程中倾倒和堆弃了大量的弃土弃渣,产生了新的侵蚀界面,其抵抗侵蚀的能力与原生地面相比也大为降低。开发建设产生的新的侵蚀界面对原生地面土壤结构和物理性质的变化,必然导致降雨入渗规律和降雨径流的变化,进而引起侵蚀的变化,而新的下垫面上的土壤侵蚀要比原生地面剧烈的多,即新的下垫面比原地面的水土流失增加了。

根据野外调查观察和试验研究发现,在开发建设产生的各类下垫面中,弃土弃渣的抗蚀性最差,新增水土流失主要产生于弃土弃渣,其次是扰动地面;弃土弃渣水土流失的主要特点是:(1)弃土弃渣堆具有较大的入渗能力;(2)泥石流是弃土弃渣堆上水土流失的主要形式;(3)弃土弃渣堆顶部平台汇水形成集中径流或渣堆上游坡面的来水是弃土弃渣水土流失的主要动力。所以,弃土弃渣和扰动地面是研究开发建设新增水土流失最主要的两类下垫面。

2.1.3 新增水土流失影响因素 如前所述,黄河中游地区的土壤侵蚀以水蚀为主,影响土壤侵蚀的因子主要有气候、地质、植被、地形和人类活动等 5 类。在开发建设过程中,破坏了地表原有植被,挖损或扰动破坏了地表土壤结构,形成了人为扰动地面,同时,堆弃了大量的弃土弃渣,这些都是人类活动的产物,此外,对新的扰动地面和弃土弃渣而言,植被因子可不予考虑。所以,在影响土壤侵蚀的 5 大类因子中,新增水土流失的主要影响因素有气候、地质和地形等 3 类,所以,本项目以气候、地质、地形等因子对各类下垫面土壤侵蚀的影响为主要研究内容。

2.2 新增水土流失试验研究

根据开发建设新增水土流失的特点及其影响因素,我们以开发建设项目产生的弃土弃渣和人为扰动地面为主要研究对象,采取定位试验与调查研究相结合的方法,以小区人工模拟侵蚀降雨及天然降雨侵蚀试验研究为主要技术途径,通过试验研究和调查研究,分析气候因子、地质因子及地形因子对各类下垫面土壤侵蚀的影响,并以降雨侵蚀力 R 为气候因子,以土壤抗冲性指标 K_w 为地质因子,以下垫面的坡度 J 为地形因子,建立包括原生地面在内的各类下垫面土壤侵蚀方程;同时,利用试验研究资料,对各类下垫面和原生地面在相同降雨条件下的土壤侵蚀模数进行分析,得出它们的新增土壤侵蚀系数。此外,我们还根据试验研究成果及实测资料与调查资料,以降雨—入渗—产流原理及产流产沙规律为理论基础,选乌兰木伦河流域为典型研究区域,分析其在 1986—1998 年间的开发建设新增水土流失量,同时,用水文法结合水保法分析典型区域同时期的开发建设新增流失量,用以验证试验研究所获各个参数的合理性;通过对典型区域新增水土流失量的分析,我们还获得各类建设项目弃土弃渣的新增流失系数(流失比)。

2.2.1 降雨侵蚀试验和放水冲刷试验

(1) 降雨侵蚀试验。降雨侵蚀试验研究的目的是:建立不同下垫面的降雨—入渗方程;研究土壤抗冲性指标;研究新增土壤侵蚀系数。

为达上述目的,我们在神府—东胜矿区的大柳塔布设了 11 个不同下垫面的天然径流小区进行观测,在野外的各类下垫面上实地进行了 34 场不同雨强的人工降雨试验,同时利用了该矿区母河沟的 7 个不同下垫面天然径流场的观测资料。通过对试验资料分析发现,实验区的降雨—入渗关系符合 Horton 下渗曲线方程,本研究采用试算法与累计下渗曲线扣损法相结合的方法来推求各类下垫面在各种试验条件下的土壤入渗方程:

$$f = a + be^{-kt} \quad (1)$$

式中: f ——土壤入渗率 (mm/min); t ——时间 (min); a, b, k ——分别为常数和系数。

经综合分析,确定了各类下垫面的土壤入渗方程中的常数和系数,再将该入渗率方程对时间积分,并以 $t = 0$ 时 $F = 0$ 为条件代入,得到入渗能力方程:

$$F = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t (a + be^{-kt}) dt \\ = -\frac{b}{k} + at + \frac{b}{k} e^{-kt} \quad (2)$$

式中: F ——某类下垫面的入渗能力 (mm),其余符号意义同前。

上述方程(1)、(2)式即是进行降雨产流计算,进而计算典型区域开发建设项目新增水土流失量的主要技术依据之一。实验区各类下垫面的土壤入渗方

程和入渗能力方程如表 1 所列。另外,通过上述试验研究,还获得了各类下垫面的新增土壤侵蚀系数和土壤抗冲性指标。

表 1 不同下垫面入渗方程汇总

序号	下垫面	实验坡度/(°)	入渗率方程 $f/(mm \cdot min^{-1})$	入渗能力方程 F/mm
1	4a 弃土	32	$f = 1.13 + 1.1515 e^{-0.0919t}$	$F = 12.53 + 1.13t - 12.53 e^{-0.0919t}$
2	当年弃土弃渣	35	$f = 1.09 + 1.0641 e^{-0.1599t}$	$F = 6.65 + 1.09t - 6.65 e^{-0.1599t}$
3	4a 弃土弃渣	35	$f = 0.935 + 0.8408 e^{-0.1710t}$	$F = 4.92 + 0.935t - 4.92 e^{-0.1710t}$
4	4a 弃渣	32	$f = 0.95 + 0.5844 e^{-0.0844t}$	$F = 6.92 + 0.95t - 6.92 e^{-0.0844t}$
5	7a 弃渣	32	$f = 0.775 + 0.5375 e^{-0.0721t}$	$F = 7.45 + 0.775t - 7.45 e^{-0.0721t}$
6	原生地面	5	$f = 0.437 + 0.5650 e^{-0.1324t}$	$F = 4.27 + 0.437t - 4.27 e^{-0.1324t}$
7	原生地面	11	$f = 0.322 + 0.8890 e^{-0.0914t}$	$F = 9.73 + 0.322t - 9.73 e^{-0.0914t}$
8	原生地面	13	$f = 0.257 + 0.7835 e^{-0.0889t}$	$F = 8.81 + 0.257t - 8.81 e^{-0.0889t}$
9	原生地面	17	$f = 0.228 + 0.5210 e^{-0.0657t}$	$F = 7.93 + 0.228t - 7.93 e^{-0.0657t}$
10	扰动地面	5	$f = 0.37 + 1.0540 e^{-0.0653t}$	$F = 16.14 + 0.37t - 16.14 e^{-0.0653t}$
11	扰动地面	11	$f = 0.35 + 1.1080 e^{-0.0743t}$	$F = 14.91 + 0.35t - 14.91 e^{-0.0743t}$
12	扰动地面	17	$f = 0.29 + 1.2090 e^{-0.0788t}$	$F = 15.34 + 0.29t - 15.34 e^{-0.0788t}$
13	土路	3	$f = 0.290 + 0.4397 e^{-0.1101t}$	$F = 3.99 + 0.29t - 3.99 e^{-0.1101t}$
14	土路	5	$f = 0.274 + 0.6715 e^{-0.1269t}$	$F = 5.29 + 0.274t - 5.29 e^{-0.1269t}$
15	土路	7	$f = 0.265 + 0.9033 e^{-0.1386t}$	$F = 6.52 + 0.265t - 6.52 e^{-0.1386t}$
16	土路	17.37	$f = 0.155 + 0.6500 e^{-0.06t}$	$F = 10.83 + 0.155t - 10.83 e^{-0.06t}$

(2) 放水冲刷试验。为了获得各类下垫面上的水沙关系,还在神府—东胜矿区进行了 77 场实地的放水冲刷试验。根据试验结果,建立了不同下垫面的水沙关系:

$$Y = aX + b \quad (3)$$

式中: Y ——坡面洪水中的泥沙量(kg); X ——径流量(l); a, b ——分别为系数和常数。各类下垫面的水沙关系见表 2。

表 2 不同下垫面水沙关系

序号	小区名称	方程	相关系数 R^2
1	5°原状土	$Y = 0.0296x - 0.0030$	0.8645
2	11°原状土	$Y = 0.0355x - 0.0057$	0.9878
3	17°原状土	$Y = 0.0369x - 0.0657$	0.9584
4	5°扰动地面	$Y = 0.1822x - 0.9211$	0.9524
5	11°扰动地面	$Y = 0.1859x - 0.4905$	0.9594
6	17°扰动地面	$Y = 0.4359x - 0.5689$	0.9989
7	3°非硬化路面	$Y = 0.0470x - 0.1764$	0.9847
8	5°非硬化路面	$Y = 0.1468x - 0.7802$	0.8903
9	9°非硬化路面	$Y = 0.2219x - 0.9078$	0.9205
10	当年弃土	$Y = 1.7422x - 0.1396$	0.9652
11	第 4a 弃土	$Y = 1.2256x - 1.1613$	0.8886
12	第 4a 弃渣	$Y = 0.9269x - 0.7306$	0.9370
13	第 7a 弃渣	$Y = 0.5134x - 0.8853$	0.9526

2.2.2 典型区域开发建设项目新增水土流失分析
为了验证降雨侵蚀和放水冲刷试验成果的正确性,选择开发建设项目集中,水文和水土保持资料比较齐全的乌兰木伦河流域作为典型区域,分别采用试验研究成果和水文法结合水保法等 2 种方法进行开发建设项目新增水土流失量分析,前一种方法是以降雨—入渗—产流原理及坡面产流产沙规律为理论依据,以各项试验获得的成果为基础,对区域内所有建设项目在研究时段内逐项目在逐次产流降雨条件下各类新的下垫面及其下覆原生地面的土壤侵蚀量与新增流失量进行分析,进而得出分析时段内的区域新增流失量;后一种方法是根据流域产、输沙平衡的原理,运用水文法和水保法相结合的方法分析流域或区域水土流失的传统方法,理论和技术比较成熟,用它分析同区域同时段开发建设项目新增水土流失量,如果前一种方法的分析结果与本方法分析的结果相近,说明前述各项试验研究成果可靠,可以用来建立开发建设项目新增水土流失预测方法。

乌兰木伦河流域面积 3 839 km²,选择大规模开发建设的 1986—1998 年间的 13a 为研究时段。在该时段内,流域内有 208 个项目开工建设,21 个雨量站共记录了 44 次产洪降雨,同时,流域出口水文站——王道恒塔站具有自 1966 年以来历年的水文资料。为达上述目的,我们对流域内所有建设项目进行了实地

调查,还实地勘察测量了 15 个典型项目的各类下垫面的形态及其数量;调查了分析时段内逐年各项水土保持措施;实测了主干道的纵横断面并结合过去的测量成果分析了河道冲淤量;利用流域内神木、伊旗 2 个气象站的风力观测资料,分析了研究时段内风蚀增沙量;调查了典型区域及黄河中游地区重点区域弃土弃渣、人为扰动地面等下垫面土壤抗蚀能力恢复的时间;分析了研究时段历年汛期每一天各个雨量站及建设项目所在地的前期影响雨量。

按照第一种分析方法,乌兰木伦河流域的 208 个建设项目(区),1986—1998 年间,因为开发建设活动产生的新增水土流失总量为 5.08×10^7 t,用第二种方法分析的结果是 5.26×10^7 t,两者之间相差 1.78×10^6 t,其相对误差为 3.50%,分析结果接近,说明降雨侵蚀试验和放水冲刷试验的成果比较符合实际,可以用它建立新增水土流失预测方法体系。

2.3 开发建设新增水土流失预测方法研究成果简介

2.3.1 数学模型法 本模型是根据天然小区试验研究成果结合乌兰木伦河流域开发建设项目新增流失量计算成果拟合而成、用于计算年侵蚀模数的模型。

$$M = (R, J, K_w) \quad (4)$$

式中: M ——年侵蚀模数 (t/km^2); R ——年降雨侵蚀力 [$m \cdot t \cdot cm/(hm^2 \cdot h)$]; K_w ——土壤抗冲性指标 [$kg/(m^2 \cdot mm)$]; J ——地面坡度 ($^\circ$)。年降雨侵蚀力 R 可参考王万忠先生研究成果^[12]中的有关图表,或由下式计算:

$$R_n = 0.038 H_{10}^{0.615} H_{60}^{0.961} H_{60}^{0.645} \quad (5)$$

式中: R_n ——为年降雨侵蚀力 [$(m \cdot t \cdot cm)/(hm^2 \cdot h)$]; H_{10} ——为一年中大于 10 mm 的次降雨量之和 (mm); H_{10}, H_{60} ——分别为一年中最大 10 min 和 60 min 雨量。

根据天然降雨和人工降雨试验获得的乌兰木伦河流域土壤抗冲性指标见表 4。表 5 是黄河中游地区部分站点的土壤抗冲性指标,它由该区域 299 个径流小区的 1 315 场年径流资料分析得到。各类下垫面的年土壤侵蚀模数预报模型见表 3。

上述土壤侵蚀预报模型对于扰动地面和弃土弃渣而言只针对新(第一年)产生的下垫面,而开发建设产生的各类下垫面表面抵抗水蚀的能力是逐年增加的,也就是各类新产生下垫面的侵蚀模数是逐年衰减的,若干年后其抗蚀能力就与原生地面相同,这个“若干年”即是新增侵蚀模数的衰减期,用 T 表示,新增侵蚀模数逐年的衰减系数用 λ 表示,则 $\lambda = 1/T$ 。侵蚀模数逐年衰减的问题在预测过程中应予以考虑。

表 3 年降雨侵蚀模数预报模型

下垫面类型	方 程	相关系数 R
扰动地面	$M = 58.6 R^{0.7507} K_w^{-0.2305} J^{1.0896}$	0.898 0
原生地面	$M = 60.2 R^{0.8018} K_w^{0.0234} J^{0.6537}$	0.921 4
弃土弃渣堆(有坡度)	$M = 517.7 R^{0.8292} K_w^{-0.4492} J^{0.0249}$	0.917 6
弃土弃渣堆(没坡度)	$M = 564.5 R^{0.8419} K_w^{-0.4091}$	0.945 0

据我们对陕西省潼关县采矿区、黄陵矿区及黑三角地区的调查,弃土弃渣的自然衰减期为 15~25 a,扰动地面的自然衰减期为 5 a 左右,对于采取治理措施的下垫面,其衰减期根据水土保持治理方案确定。

在对某一建设项目的新增水土流失预测时,用下式计算即可。

$$W_L = \sum W_i \quad (6)$$

$$W_i = [N - \frac{N(N-1)}{2}] F_i (M_i - M_0) \quad (7)$$

式中: W_L ——预测期内新增流失总量 (t); W_i ——为第 i 类下垫面在预测期内的流失量 (t); F_i ——第 i 类下垫面的面积 (km^2),由主体工程设计资料可以确定各类下垫面的数量与坡度; M_i ——第 i 类下垫面的侵蚀模数 [$t/(km^2 \cdot a)$],由表 3 公式计算; M_0 ——原生地面侵蚀模数 [$t/(km^2 \cdot a)$],调查确定或由表 3 公式计算; λ ——新增侵蚀模数衰减系数,它为衰减期 T 的倒数; N ——预测年限 (a)。

2.3.2 新增土壤侵蚀系数法

(1) 方法简述。开发建设产生的各类下垫面上的侵蚀模数比原生地面增加的量,与原生地面侵蚀模数之比即为新增土壤侵蚀系数 λ_i 。以原生地面侵蚀模数为基数,根据开发建设产生的各类下垫面的数量及其新增侵蚀系数,即可预测新增水土流失量。这种方法的关键是正确地确定新增土壤侵蚀系数。各类下垫面的面积可根据主体工程设计报告确定(表 4—5)。

表 4 乌兰木伦河流域土壤抗冲性指标综合值

下垫面类型	土壤抗冲性指标 $K_w/$ ($kg \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$)	抗冲性指标 K_w 对原生地面值之比
原生地面	0.116	1.00
扰动地面	0.325	2.80
沙土路面	0.336	2.90
人工土路面	0.136	0.85
渣土堆弃物	0.754	6.50
堆弃沙质土	2.088	18.00
砾质灌木区	0.011	0.09

(2) 计算公式。开发建设产生的某类下垫面的侵蚀模数为:

$$M_i = (1 + \alpha_i) M_0 \quad (7)$$

建设项目在预测时段内的新增土壤流失总量为:

$$W_L = \sum W_i \quad (8)$$

$$W_i = \left[N - \frac{N(N-1)}{2} \right] \alpha_i M_0 F_i \quad (9)$$

式中: α_i ——第 i 类下垫面的新增土壤侵蚀系数。其余符号意义同前。新增土壤侵蚀系数可参考表 6。

2.3.3 流失系数法

(1) 方法简述。流失系数法又称流失比法,是计算弃土弃渣新增流失量最传统的方法,对于无水沙资料的地区尤为重要。此方法关键是正确地确定流失系数,而流失系数又与弃土弃渣堆放位置及所受的暴雨洪水作用有关。弃土弃渣的堆放位置及其处理方式一般在主体工程设计报告中有所交代,故用此方法分析弃土弃渣的流失量时,可据它的位置、数量和合理选择流失系数,进而确定新增流失量。

表 5 黄河中游地区有关站点土壤抗冲性指标 K_w 值

序号	类型区	地点	K_w 值				各类地均值
			农地	林地	人工牧草	荒坡地	
1	砒砂岩区	东胜忽尼图	—	—	—	—	0.146 33
2	丘一区	准旗五分地	0.047 72	—	—	0.008 56	—
3	丘一区	皇甫川	—	—	—	—	0.065 01
4	丘一区	和林格尔	—	—	—	—	0.060 91
5	丘一区	河曲	0.232 70	0.033 17	0.020 68	0.084 67	0.122 40
6	土石山区	太原	—	—	—	—	0.027 99
7	高原沟壑区	隰县	0.047 71	—	—	0.094 01	—
8	丘一区	离石羊道沟	0.241 52	0.041 69	0.055 38	0.575 38	0.199 68
9	丘三区	天水梁家坪	0.250 00	0.042 00	0.135 00	—	0.117 20
10	高原沟壑区	西峰南小河	0.090 44	0.031 17	0.095 37	0.250 60	0.093 21
11	丘一区	绥德辛店	0.225 72	—	0.095 81	—	0.216 06
12	丘一区	榆林王家沟	0.572 65	—	0.443 95	0.171 31	0.316 78
13	丘一区	靖边于家沟	0.070 45	0.045 18	0.029 99	0.026 11	0.047 43
14	丘一区	神木孟家沟	0.121 61	0.285 25	0.175 21	0.163 15	0.168 24
15	丘一区	子洲岔巴沟	—	—	—	—	0.288 50
16	黄土阶地区	礼泉	0.015 00	0.000 30	—	0.002 80	0.009 85
17	高原沟壑区	长武	0.024 00	—	0.001 50	0.006 00	0.015 76
18	丘二区	志丹	0.196 50	—	—	—	0.129 06
19	丘一区	佳县	0.251 00	—	0.164 00	—	0.164 86
20	丘二区	安塞	0.014 90	0.019 80	—	0.025 00	0.009 79

表 6 开发建设不同下垫面新增土壤侵蚀系数

序号	下垫面类型	天然降雨 试验结果	人工降雨 试验结果	土壤侵蚀系 数 k_i 范围	新增土壤 侵蚀系数	原生地面
1	原生地面	1	1	1	0	
2	扰动地面	1.46	2.97	1.4~3.0	0.4~2.0	
3	沙土路面	—	3.70	3.0~3.7	2.0~2.7	
4	沙壤土路面	2.64~2.91	—	2.2~3.0	1.2~2.0	
5	壤土路面	2.16	—	2.20	1.20	
6	弃土弃渣(综合)	2.37	—	3.00	2.00	
7	4a 弃土弃渣	—	2.41	2.50	1.50	
8	当年弃土堆	4.49	—	4.50	3.50	
9	4a 弃土堆	—	3.11	3.11	2.11	
10	7a 弃土	—	1.70	1.70	0.70	
11	砾质灌木区	0.12	—	0.12	-0.88	
12	砒砂岩(原生地面)	0.70	—	0.70	-0.30	

坡度在 $11^\circ \sim 17^\circ$ 之间、植被盖度小于 5% 的荒坡地,其侵蚀模数在 8 000 ~ 10 000 t/(km²·a) 之间。

对于直接堆弃于河道、沟谷中洪水位以下的弃土弃渣,即认为其流失率为 100%,而堆弃在非河道、沟谷岸边中且遭受水蚀的弃土弃渣即可用流失系数法计算。

(2) 计算公式。开发建设过程中产生的弃土弃渣的流失量用下列公式确定:

$$W_S = W_S \quad (10)$$

式中: W_S ——水土流失量; ——流失系数(流失比); W_S ——开发建设排弃渣土数量。

乌兰木伦河流域部分建设项目的流失系数 值见表 7,该流域各类建设项目的流失系数综合值见表 8。

表 7 不同位置弃土弃渣的流失系数

地点	渣源与堆积部位	物料组成	暴雨洪水条件	流失系数
马家塔	露天矿剥离,堆于河道边	沙、砾石、石块	河道洪水	0.495
补连塔	铁路弃渣,堆于河岸坡	土、碎石、风化石	坡面径流、沟道洪水	0.266
李家畔	采石弃渣,坡面堆积	碎石、石块	坡面陡,小沟洪水	0.396
武家塔	露天矿剥离,塬面沟坡堆积	沙石、废渣、风化物	风蚀、小沟洪水	0.008

表 8 乌兰木伦河流域各类开发建设项目弃土弃渣流失系数综合值

序号	项目名称	生产建设规模	弃土弃渣总量/ $10^4 m^3$	弃土弃渣流失量/ $10^4 m^3$	流失比/%
1	$1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$ t 煤矿(45 座)	1.00×10^6 t/a	33.88	7.46	22.03
2	$5.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ t 煤矿(45 座)	3.11×10^6 t/a	147.66	13.26	8.98
3	$1.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^5$ t 煤矿(10 座)	2.75×10^6 t/a	315.16	30.21	9.59
4	神东公司大型矿(11 座)	2.19×10^7 t/a	3 219.06	90.71	2.82
5	铁路(3 条)	107.3 km	748.93	190.97	25.50
6	油路(11 条)	207 km	862.33	174.05	20.18
7	土路(24 条)	281 km	204.83	32.71	15.97
8	进矿油路(15 条)	32.02 km	119.61	13.14	10.99
9	进矿土路(7 条)	18.97 km	14.03	2.41	17.18
合计	171 个项目		5 665.49	554.93	9.79

3 结 论

利用天然降雨、人工降雨、放水冲刷等方法,比较系统地进行开发建设新增水土流失试验研究,利用该研究成果对建设项目集中的区域进行新增水土流失量分析,并运用其它方法对该分析成果进行了验证,在此基础上,建立了用于开发建设项目新增水土流失量分析的数学模型法、新增土壤侵蚀系数法和流失系数法等 3 种方法。本研究成果可应用于黄河中游地区开发建设项目人为水土流失预测和分析评价,对其它地区的开发建设项目水土流失预测具有借鉴作用。

[参 考 文 献]

[1] 北京师范大学环境科学研究所. 安太堡露天煤矿环境影响评价报告书(生态部分)[R],1984.
 [2] 黄河水利委员会黄河水利科学研究院. 内蒙古准格尔煤田第一期工程地表形态破坏环境影响评价报告书[R],1986.
 [3] 陕西省水土保持勘测规划研究所. 神府东胜矿区水土流失环境影响评价报告书[R]. 1987.

[4] 中国科学院黄土高原综合科学考察队,黄土高原地区北部风沙区土地沙漠化综合治理[M]. 北京:科学出版社,1991.
 [5] 张胜利,张利铭,等. 神府东胜煤田开发对水土流失和入黄泥沙影响研究[M]. 黄河水沙变化研究,郑州:黄河水利出版社,2002.
 [6] 张胜利. 黄河中游大型煤田开发对侵蚀和产沙影响的研究. 黄河环境演变与水沙运行规律研究论文集[C],北京:地质出版社,1990.
 [7] 李文银,王治国,蔡继清. 工矿区水土保持[M]. 北京:科学出版社,1996.
 [8] 刘功贤,等. 黑龙江省土壤流失方程在工程建设项目土壤流失预测中的应用[J]. 中国水土保持,2000(7).
 [9] 朱显谟,等. 甘肃中部土壤侵蚀调查报告[J]. 土壤专刊 32 号,1958.
 [10] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素(三)[J]. 水土保持通报,1982.
 [11] 周佩华,等. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究方法探讨[J]. 水土保持学报,1993.
 [12] 王万忠,等. 黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙[M]. 北京:科学出版社,1996.