

黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙的多维临界

陈劭锋^{1,2}, 刘全友³, 陆中臣³, 李忠艳⁴

(1. 中国科技大学商学院,安徽 合肥 230052; 2. 中国科学院科技政策与管理科学研究所,北京 100080;
3. 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085; 4. 华北电力大学数理系,北京 102206)

摘要 黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙受到自然要素和人文要素的综合作用。从该地区侵蚀产沙的自然和人文影响要素识别入手,比较系统地揭示了各主要影响因子侵蚀产沙过程的单维临界响应及其发生的内在机理,在此基础上建立了侵蚀产沙要素交互作用的多维临界综合集成模型,并依据该模型定量计算出目前该地区自然和人文要素及各主要影响因素分别对侵蚀产沙的贡献,最后提出了该地区水土流失治理的调控目标和现有治理措施的调整思路。研究结果表明:(1)由于该地区自然和人文要素的交互作用,使得各影响因素侵蚀产沙的单维临界响应发生位移和变化,达到复合临界极值的多维临界点趋于降低或基本保持不变;(2)该地区的侵蚀强度在自然和人文要素的交互作用下仍在加剧。其中,可分离的自然因素作用占 80% 左右,人为因素作用占 20% 左右。就自然因素而言,降水对产沙强度的贡献最大约为 61%;(3)该地区水土流失的治理速度抵不上人为破坏速度;(4)在多沙粗沙区人为因素产沙贡献中,农业结构的贡献最大。这意味着该地区生态环境治理与建设首先要把农业结构调整和优化置于第一位。

关键词 黄土高原;粗沙多沙区;侵蚀产沙;影响要素;单维临界;多维临界;调控

文章编号:1000-0933(2007)08-3277-09 中图分类号:X22 文献标识码:A

The Multi-dimensional thresholds of sediment yield in the area with abundant and coarse sediment on the Loess Plateau

CHEN Shao-Feng^{1,2}, LIU Quan-You³, LU Zhong-Chen³, LI Zhong-Yan⁴

1 School of Business, University of Science and Technology of China, Hefei 230052, China
2 Institute of Policy and Management Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China
3 Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
4 Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3277 ~ 3285.

Abstract :Sediment yield in the area with abundant and coarse sediment on the Loess Plateau is determined by natural processes and human action. This paper first distinguishes the natural and human factors influencing the sediment yield in the area, and then develops a single threshold response of each factor to the process of erosion and its intrinsic mechanism. On this basis, an integrated model of multi-dimensional thresholds taking into consideration the interactions between natural factors and human factors controlling sediment yield is developed to calculate the contribution of both natural factors and human factors to sediment yield. Also, the model quantifies the regulating objectives for soil and water conservation and the adjustment of the current measures taken to combat soil erosion are suggested. The results show that: (1) under the interaction between natural and human factors, the single threshold value of each factor tends to decline or be unchanged

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40571062)
收稿日期 2006-10-10; 修订日期 2007-06-06
作者简介 陈劭锋 (1972 ~) 男, 陕西武功人, 博士, 副研究员, 主要从事环境与发展研究. E-mail: sfchen@casipm.ac.cn
Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40571062)
Received date 2006-10-10; Accepted date 2007-06-06
Biography CHEN Shao-Feng, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in environment and development. E-mail: sfchen@casipm.ac.cn

when a maximum value of the model is reached. (2) The intensity of erosion in the area is still increasing ,almost 80% of which being caused by natural factors and 20% by human factors. Precipitation is the main factor that explains the intensity of soil erosion (about 61%). (3) Water and soil conservation techniques lag behind and can not prevent soil erosion and degradation. And (4) agricultural practice is the main human contributor to sediment yield , which implies that soil conservation methods should focus on the agricultural practices.

Key Words : Loess Plateau ;area with abundant and coarse sediment ;erosion sediment yield ;factors influencing sediment yield ;single threshold ;multi-dimensional thresholds

黄土高原高强度侵蚀产沙是自然和人文因素共同作用的结果。长期以来 ,对黄土高原侵蚀产沙研究主要集中在自然要素对产沙过程的影响上 ,而对人为因素研究较少。并且在揭示多因素与侵蚀产沙之间的定量关系时 ,通常采用幂函数模型^[1]。事实上 ,国内外已有研究表明 ,产沙过程随着某些影响要素尤其是自然要素的变化 ,存在着临界现象 ,如坡度^[1~4]或河道比降^[5]、降水^[5~9]、植被^[5,6,10,11]、泥沙中径^[5]等。显然上述幂函数模型无法揭示这种临界响应。陈浩、陆中臣等人^[5]新近提出了一种流域产沙的地理环境要素交互作用复合临界模型 ,综合体现了要素产沙临界响应的特点 ,但是也仅限于3种自然要素 ,而且未能把要素产沙的单维临界和复合临界有机统一起来。因此 ,本文试图在文献^[5]的基础上 ,以黄土高原多沙粗沙区为例 ,从自然和人文要素交互作用的角度探讨该地区侵蚀产沙的单维临界和多维临界 ,以便为该地区的生态环境治理提供一定的理论依据。

1 研究区概况、研究方法和数据来源

1.1 研究区概况

黄土高原多沙粗沙区位于东经 106°57′ ~ 110°58′、北纬 35°54′ ~ 40°15′之间 ,面积 7.86 万 km² ,涉及陕西、山西、甘肃、内蒙古、宁夏五省的 45 个县 (旗、区) (见图 1)。区内有 1000 km² 以上的支流 21 条。该区自然条件恶劣 ,生态环境脆弱 ,水土流失十分严重。其特点主要表现为 :气候干旱 ,降雨少而集中 ,经常发生干旱、风沙等自然灾害 ;沟深坡陡、地形破碎 ,地表组成物质以沙黄土为主 ,易遭侵蚀 ;植被稀少 ,以灌丛草原为主 ,林草覆盖率较低 ;人口密度较高 ,生存压力大 ,许多地方人与自然矛盾比较尖锐 ;水土流失面广、强度大。由于该区是入黄泥沙的主要来源 ,也是我国水土流失最严重的地区 ,因此无论从减少入黄泥沙、减轻黄河下游防洪压

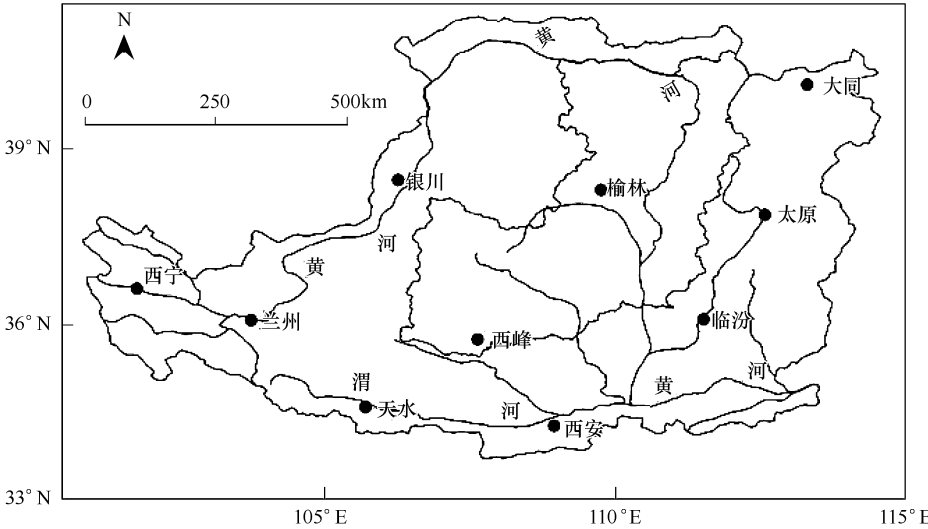


图 1 黄土高原多沙粗沙区略图

Fig. 1 The sketch of the area with abundant and coarse sediment on the Loess Plateau

力出发 ,还是从改善当地生存条件考虑 ,该区都是黄河流域水土保持、生态建设的重点地区^①。研究该地区影响要素的侵蚀产沙效应对于寻求有效治理对策、实现可持续发展具有重要的理论和实践意义。

1.2 研究方法和数据来源

本文主要采用统计分析方法 ,在对黄土高原多沙粗沙区单因素侵蚀产沙临界进行统计分析的基础上 ,结合趋势面分析方法和正交试验设计的基本原理 ,建立了该地区复合多维临界模型以揭示自然和人文要素交互作用下侵蚀产沙的单维临界和多维临界复杂响应过程。文中所涉及到的侵蚀模数、坡度、沟谷密度、降水量、林草覆盖率、农业产值、粮食产量、水土流失治理面积等基础数据均来自于黄河中上游管理局汇编资料 ,泥沙中径数据取自清华大学水电工程系内部研究资料^②。

2 多沙粗沙区自然因素侵蚀产沙临界响应分析

自然要素奠定了该地区水土流失过程的基本空间格局。它可以分为地带性因素和非地带性因素。结合前人研究并且从地理环境的角度来看 ,影响该地区水土流失的自然地带性因素有土壤、降水和植被 ,非地带性因素主要指地貌因素。

2.1 自然地带性因素侵蚀产沙临界响应分析

2.1.1 土壤质地与产沙的临界响应关系

土壤是水土流失过程发生的物质基础和载体 ,其质地、结构以及抗蚀力的强弱对水土流失强度产生重要的影响。本文用泥沙中径来表征该地区的土壤质地和抗蚀力。可以发现泥沙中径 (x_1) 与侵蚀模数 (y) 之间的关系见图 2 所示 ,其拟合式为 :

$$y = -9756714x_1^2 + 1111151x_1 - 14496.1 \quad r^2 = 0.569 \quad r = 0.754 \tag{1}$$

按上式计算的临界泥沙中径为 0.0569 mm。出现产沙临界中径的主要原因与黄土的空间分布和地表物质组成有关。从西北向东南方向 ,黄土堆积先后经历戈壁沙漠带—黄土堆积转换带—黄土稳定堆积带—黄土堆积消减带。黄土堆积的最大厚度和临界粒径分布在黄土堆积转换带 ,而这也是水土流失严重的地区—黄土丘陵沟壑区的分布区。因此 ,出现对应高产沙极值的临界泥沙中径是多沙粗沙区特定自然地理条件下的产物。

2.1.2 降水与产沙的临界响应关系

关于黄土高原降水与侵蚀产沙关系的研究已经证明了存在降水的产沙临界 ,只不过是在图形上和临界值上存在差异^[5,6]。通过资料分析 ,可以发现多沙粗沙区降水 (x_2) 与侵蚀产沙 (y) 之间呈二次抛物线关系 ,其关系式为 :

$$y = -0.788x_2^2 + 740.159x_2 - 158885 \quad r^2 = 0.286 \quad r = 0.535 \tag{2}$$

从中可以得到降水的临界点为 469.6mm。降水与侵蚀产沙的临界响应关系的机理从宏观自然地带性的角度可用降雨的侵蚀力和地表的抗蚀力解释。在降水小于 470mm 的地区 ,总体上植被覆盖较低 ,对侵蚀的抵抗力有限 ,而在降水大于 470mm 以上的地区 ,植被覆盖相对较好 ,对地表的保护作用相对显著 ,可以对侵蚀产生较强的控制作用。

2.1.3 植被与产沙的临界响应关系

已有研究表明 ,黄土高原植被与产沙之间存在相应临界关系^[6]。这也可以通过对多沙粗沙区研究得以证实。该地区的林草覆盖率 (x_3) 与侵蚀模数 (y) 之间拟合方程如下 :

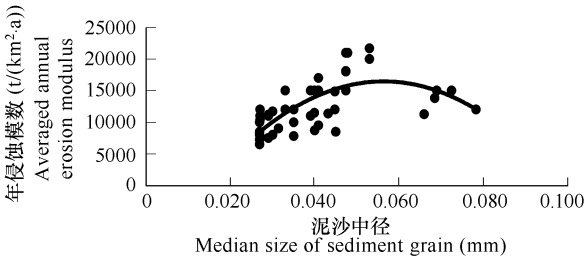


图 2 泥沙中径与侵蚀模数之间的关系

Fig. 2 Relationship between median size of sediment grain and averaged annual erosion modulus

① 黄河上中游管理局. 黄河流域水土保持基本资料 2001
② 清华大学水电工程系. 拦减粗泥沙对黄河河道冲淤变化影响 ,1995

$$y = -23.932x_3^2 + 1127.273x_3 + 1360.311 \quad r^2 = 0.366 \quad r = 0.605$$

(3)

方程中产沙极值所对应的林草覆盖率为 23.6%。这种关系从宏观上也是由黄土高原多沙粗沙区所处的自然地带所决定的。黄土高原的水平自然地带分为西北部干旱荒漠草原带、中部温带半干旱草原—森林草原和东南部暖温带半湿润落叶阔叶林带^[2]。不同的地带气候条件、地貌、植被、地表物质结构、侵蚀产沙均呈现出明显的空间分异特征。根据森林覆盖率的等值线来看,临界森林覆盖率位于黄土高原中部的温带半干旱草原、森林草原带,对应着水土流失强烈的地区。

2.2 非地带性因素与产沙的临界响应关系分析

作为非地带性因素,地貌因素包括地面坡度和地表的切割程度,通过影响地表物质和能量分配进而作用于侵蚀、搬运、堆积等地表过程。

2.2.1 坡度与产沙的临界响应关系

关于黄土高原地区坡度与产沙的临界响应关系前人已有大量的研究^[3,4]。一般认为侵蚀产沙极值的临界坡度为 30°左右。由于资料原因,用 25°以上坡度的比例间接反映该地区的坡度。根据多沙粗沙区资料,发现坡地大于 25°面积百分比(x_4)与侵蚀模数(y)的关系,也存在临界坡比。两者的关系式为:

$$y = -5.295x_4^2 + 555.949x_4 + 1311.582 \quad r^2 = 0.496 \quad r = 0.704$$

(4)

式(4)的坡比临界值为 52.5%。

2.2.2 沟谷密度与侵蚀产沙的临界响应关系

用沟谷密度反映地表侵蚀破碎程度。前人关于沟谷密度(x_5)与产沙(y)的关系研究中,发现二者呈正相关关系^[4]。而本文研究结果发现,在多沙粗沙区,二者之间呈二次抛物线关系,其拟合方程为:

$$y = -25.238x_5^2 + 2478.116x_5 + 3079.285 \quad r^2 = 0.4355 \quad r = 0.660$$

(5)

从方程中计算的沟谷密度理论临界值为 49km/km²。这与目前的最大沟谷密度相差甚远,也就是目前的沟谷发育远未达到开始下降的临界值。这种现象可以从地貌的发育阶段上寻求解释^[1],即目前该地区的沟谷密度现在正处于壮年期的中期发育阶段,只有当壮年阶段向老年期准平原过渡时,理论上才能达到最高产沙临界,之后才能开始下降。

3 多沙粗沙区人文因素侵蚀产沙临界响应分析

黄土高原多沙粗沙区的侵蚀产沙,除受到上述自然因素的影响外,而且还受到叠加于自然因素之上的人类活动的干扰。前人主要通过不合理的用地结构,如陡坡耕地比例来反映人文要素对产沙的作用^[3]。从环境与发展角度,经济发展对环境的影响可以归结为规模效应、结构效应和技术效应^[4]。这些因素主要解释了环境与发展之间的库兹涅茨曲线(EKC)或倒“U”型关系。在分析黄土高原多沙粗沙区社会经济因素对水土流失影响时,考虑到该地区主要以农业为主,本研究着重从农业经济结构、生产技术水平 and 治理保护水平 3 个因素进行考察。

3.1 农业经济结构与产沙的临界响应关系

由于种植业直接依赖于土壤耕作,因此相对于林、牧、副业而言,对水土流失的影响更大。鉴于此,将非种植业产值占农业产值的比例作为农业结构优化的指示性指标。根据多沙粗沙区的资料,可以发现非种植业产值占农业产值的比例(x_6)与年侵蚀模数(y)之间的关系呈现出倒“U”型关系(见图 3)。其拟合方程为:

$$y = -9.997x_6^2 + 1030.246x_6 - 10912.0$$

$$r^2 = 0.329 \quad r = 0.574$$

(6)

通过对方程求导,可以确定当非种植业比例达到 51.5%时,年侵蚀模数开始下降。出现这种倒 U 型关

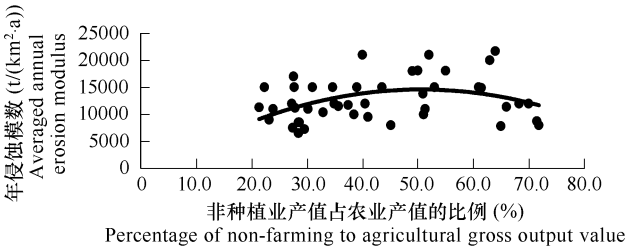


图3 农业结构与侵蚀模数之间的关系
Fig. 3 Relationship between agricultural structure and averaged annual erosion modulus

系的主要原因在于目前该地区非种植业比例的提高所带来的潜在减沙效应尚不能抵消种植业所造成的水土流失效应。

3.2 农业生产技术与产沙的临界响应关系

农业生产技术通过影响农业生产效率进而对产沙产生直接或间接的影响。通常提高农业生产率可部分缓解农作物和牲畜生产对农田的压力以及对边际土地 (一旦开发 , 容易造成水土流失 , 如陡坡开垦) 开发的压力^[5]。用粮食单产来表征技术因子对产沙的效应。

从多沙粗沙区粮食单产 (x_7) 与侵蚀产沙 (y) 的关系来看 , 二者基本符合倒 U 型关系 (见图 4) , 即年侵蚀模数随粮食单产的提高而经历一个从逐渐增大到逐渐减少的临界转变 , 其拟合方程为 :

$$y = -1574.858x_7^2 + 8459.909x_7 + 4680.318 \quad r^2 = 0.313 \quad r = 0.559 \tag{7}$$

通过求导 , 可以确定粮食单产的临界点为 2.69 t/hm²。在临界点以下 , 随着粮食产量的提高不但没有减轻水土流失 , 反而在一定程度上起到加剧水土流失作用。其原因可能与采取不合理的农业技术、耕作方式和耕作制度有关 , 导致粮食单产提高所带来的潜在水土流失压力减轻无法平衡人口生存压力增大所带来的水土流失增加。

3.3 生态环境治理水平与产沙的临界响应关系

加强生态环境治理 , 减少水土流失是实现黄土高原多沙粗沙区可持续发展的重要举措。用治理度即水土流失治理面积与水土流失面积的比例可以综合反映该地区的生态环境治理水平和人们对生态环境保护的重视程度。通过多沙粗沙区的研究资料表明 , 该地区年侵蚀模数 (y) 与治理度 (x_8) 之间亦呈现一种倒 U 型关系 (见图 5) , 即产沙强度随着治理度增加到一定程度才开始下降。

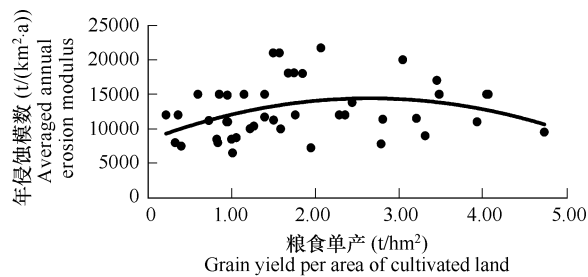


图4 粮食单产与侵蚀模数之间的关系

Fig. 4 Relationship between grain yield per area of cultivated land and averaged annual erosion modulus

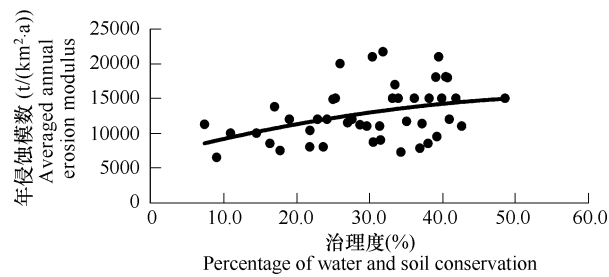


图5 治理度与年侵蚀模数的关系

Fig. 5 Relationship between harness degree of water and soil loss and annual erosion modulus

二者的拟合方程为 :

$$y = -2.205x_8^2 + 347.576x_8 + 4654.750 \quad r^2 = 0.356 \quad r = 0.597 \tag{8}$$

可以确定治理度的临界点为 78.9%。这意味着如果按照目前的趋势 , 当该地区的治理度接近 80% 时 , 才能有效遏止产沙强度的上升趋势 , 而目前的治理水平远未达到这一临界点。在临界点以下 , 侵蚀产沙随着治理度的增加而增加 , 可能有两方面原因 : 一是水土流失治理速度跟不上水土流失的破坏速度 , 局部可能有所改善 , 但总体仍然处于恶化状态。二是水土流失治理措施不当或配置不合理 , 违反自然规律^[6] , 反而会在一定程度上加剧水土流失。

4 多沙粗沙区侵蚀产沙的复合多维临界

4.1 多沙粗沙区侵蚀产沙的复合多维临界模型

通过上述分析 , 可以发现 8 种主要影响因素与侵蚀产沙之间分别存在着二次抛物线的单维临界响应统计规律。用统一的数学表达式描述即为 :

$$y = f_i(x_i) = a_ix_i^2 + b_ix_i + c_i \quad i = 1 \dots 9 \tag{9}$$

式中 y 为年侵蚀模数 x_i 为第 i 个影响因素 c_i 为常数项。

由于单维临界响应实质上反映的是在不考虑其它因素影响或其它因素作用为零时,侵蚀产沙随该要素的发展变化规律。但是当存在要素之间的交互作用和影响时,这些单维临界将会发生改变。因此,在已知各要素产沙单维临界响应规律前提下,如果要建立侵蚀产沙的多因素及其交互作用复合多维临界模型必须同时满足两个条件:一是必须存在要素之间交互作用;二是在不考虑其它因素影响或其它因素不变时,复合多维临界方程应基本上符合产沙随各影响因素变化的单维临界响应规律。根据趋势面分析和正交实验设计基本原理,该复合多维临界模型可以用如下形式表达:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_8) = \sum_{i=1}^8 (a_i x_i^2 + b_i x_i) + \sum_{i \neq j} h_{ij} x_i x_j + R \tag{10}$$

式中 h_{ij} 为交互作用项系数。由于 8 个影响因素两两之间共有 C_{82} 即 28 种组合情形,故存在 28 个交互项系数。 R 是对单临界响应方程的累积修正项。在 (10) 式中,交互项 $h_{ij} x_i x_j$ 和修正项 R 对各单维临界值起到修正和平移作用。参数 h_{ij} 和 R 可通过下式采用多元统计回归估计。即:

$$y - \sum_{i=1}^8 (a_i x_i^2 + b_i x_i) = \sum_{i \neq j} h_{ij} x_i x_j + R \tag{11}$$

采用逐步回归法,并通过显著性、共线性检验,最后获得了含 3 个交互作用项的多沙粗沙区复合多维临界模型:

$$\begin{aligned} y = & -9756714x_1^2 + 1111151x_1 - 0.788x_2^2 + 740.159x_2 - 23.932x_3^2 + 1127.273x_3 - 5.295x_4^2 + \\ & 555.949x_4 - 25.238x_5^2 + 2478.116x_5 - 9.997x_6^2 + 1030.246x_6 - 1574.858x_7^2 + \\ & 8459.909x_7 - 2.205x_8^2 + 347.576x_8 - 39391.2x_1x_7 - 4.184x_4x_6 - 72.931x_5x_8 - 244969 \\ r^2 = & 0.768, r/0.876, F = 10.815, Sig. F = 0.002, D.W = 1.248 \end{aligned} \tag{12}$$

式 (12) 中的 3 个交互项均为自然要素和人文要素的乘积,因此综合地体现了自然和人文因素的交互作用。而且每个交互项的系数均为负值,说明这些交互作用有助于减沙。具体而言, x_1x_7 代表土壤质地与粮食单产之间的交互作用,其之所以能够减沙可能有两方面原因:一是在不同质地的土壤上提高粮食产量产生的水土流失效应不同。粮食作物作为一种地表覆被在一定程度上可以对土壤起到保护作用,防止水土流失。但是在陡坡地上种植则会加剧水土流失;另一方面,通过提高粮食产量,可以在一定程度上缓解或减轻该区域人口生存对其他边际土地的开发压力,进而间接地减少水土流失量。 x_4x_6 为 25° 以上坡度比例与非种植业结构之间的交互作用,其减沙的原因是显而易见的:在 25° 以上的地区通过退耕还林还草和发展林、牧、副业可以减轻耕作对生态环境破坏的压力。 x_5x_8 即沟谷密度和治理度的交互作用,其之所以能够起到减沙作用是因为对该地区沟谷纵横,进行治理效果比较显著。

4.2 多沙粗沙区侵蚀产沙的多维临界及要素贡献

在式 (12) 基础上,根据多元函数极值的存在条件,令 $\partial y / \partial x_i = 0$,可以确定当 $x_1 = 0.0529 \text{ mm}$, $x_2 = 469.6 \text{ mm}$, $x_3 = 23.6\%$, $x_4 = 35.0\%$, $x_5 = 2.83 \text{ km/km}^2$, $x_6 = 44.2\%$, $x_7 = 2.02 \text{ t/hm}^2$, $x_8 = 32.0\%$ 时, y 有理论极大值 $21618 \text{ t/(km}^2 \cdot \text{a)}$ 。同时将整个黄土高原多沙粗沙区 8 个要素的平均值代入 (12),可以求得该地区平均产沙模数为 $19889 \text{ t/(km}^2 \cdot \text{a)}$ 。这说明该地区的水土流失在自然和人文要素的综合作用下仍处于加速侵蚀阶段,尚未达到侵蚀极限。

利用式 (12),可以进一步探讨目前黄土高原多沙粗沙区自然要素和人文要素对产沙的贡献。在选择的 8 个要素中,沟谷密度、坡度、降水、泥沙中径可以认为是纯自然要素。林草覆盖率则受人类活动的影响较大,而且在多沙粗沙区,天然林草所占比例很少,因此把天然林草覆盖作为自然要素,而人工林草覆盖作为人文要素。农业经济结构、粮食单产和治理度基本上可以归属人文要素。由于交互项无法明显分离,可以将交互项和常数项移到 (12) 左边,并且代入目前多沙粗沙区各要素的总体平均值,就可以确定可分离的自然要素和人文要素对产沙的贡献程度和贡献率,如下表 1 所示。

表 1 多沙粗沙区侵蚀产沙的单维临界、复合多维临界及各因素对产沙的贡献

Table 1 The single threshold and comprehensive multi-dimensional threshold of the erosion sediment yield in the area with abundant and coarse sediment and the contribution of each factor to sediment yield

项目 Item	单临界值 Single threshold value	对应的产沙极值 Corresponding maximal sediment yield (t/(km ² ·a))	复合多维临界值 Multi-dimensional threshold	要素均值 Average value of each factor	侵蚀产沙贡献量 Contribution to sediment yield (t/(km ² ·a))	对总产沙贡献率 Percentage of contribution to total sediment yield (%)
x_1 (mm)	0.0569	17139.96	0.0529	0.0427	29656.83	10.44
x_2 (mm)	469.6	14920.63	469.6	448.3	173446.64	61.05
x_3 (%)	23.6	14634.79	23.6	20.8	13093.34	4.61
x_4 (%)	52.5	15904.56	35.0	37.8	13449.16	4.73
x_5 (km/km ²)	49.0	63910.53	2.83	4.01	9531.42	3.35
x_6 (%)	51.5	15631.13	44.2	45.3	26155.40	9.21
x_7 (t/hm ²)	2.69	16041.64	2.02	1.80	10125.30	3.56
x_8 (%)	78.9	18351.91	32.0	31.0	8655.85	3.05

结果表明 ,目前对于多沙粗沙区整体而言 ,自然因素对产沙的贡献约占 80.5% ,而人文要素对产沙的贡献约为 19.5% ,两者接近 4 ∶ 1。而人文因素对产沙的总贡献为正 ,说明整个人类活动因素正加剧着该地区的水土流失 ,同时也表明该地区的水土流失治理速度跟不上人为所造成的水土流失速度。在 8 个要素中 ,降水对产沙的贡献最大占 61.05% ,泥沙中径其次占 10.44% ,再者为农业结构占 9.21% ,第 4 为坡度占 4.73% ,第 5 为植被占 4.61% ,第 6 为粮食单产占 3.56% ,第 7 为沟壑密度占 3.35% ,第 8 为治理度占 3.05%。同时 3 个交互项的减沙作用依次是 $x_5x_8 > x_4x_6 > x_1x_7$,分别可减沙为 9066.1、7164.4 和 3027.6 t/(km²·a)。

在人文要素中 ,农业结构对产沙的作用最大。因此 ,从人为调控的角度来看 ,多沙粗沙区的水土流失治理和生态建设首先要将农业结构调整放在第 1 位 ,大力发展农副产业 ,优化农业结构 ,使得非种植业产值占农业产值的比例超过 44.2% 或种植业产值下降到 55.8% 以下。目前该地区的非种植业产值比例刚刚达到这一比例 ,今后要进一步优化农业结构 ,从经济发展的源头上减沙。第二 ,加强退耕还林还草和人工造林种草力度 ,提高土地覆被 ,使得林草覆盖率达到 23.6% 以上 ,目前该地区林地覆盖率平均不到 21%。第三 ,合理布局农业生产力 ,加强农田基本设施和高产稳产田建设 ,采用先进适用技术和耕作制度提高农业资源利用效率和粮食单产 ,力争使该地区的粮食单产达到 2.02 t/hm² 以上 ,进一步减轻对边际土地开发的压力。目前多沙粗沙区的粮食单产只有 1.80 t/hm² 左右。第四 ,加大财政转移支付力度 ,加强生态环境治理与建设 ,使得治理度至少达到 32% 以上 ,必要时可考虑生态移民。目前该地区的平均治理度为 31% ,尚未跨越临界线。

同时从表中还可以发现单维临界与多维临界之间的关系 :即在自然和人文要素的交互作用下 ,原来的单要素方程临界点大多趋于下降 ,只有个别因素的临界点基本保持不变 ,如降水和植被。这充分地说明了要素交互作用项对单维临界响应变化轨迹的平移和改变作用。

5 结论

综上所述 ,可以得出以下几方面的结论 :

(1)黄土高原多沙粗沙区的侵蚀产沙是自然和人文要素交互作用的结果。正是由于这种交互作用 ,使得各影响因素与侵蚀产沙之间的单维临界响应发生位移和变化 ,达到复合临界极值的多维临界点趋于降低或基本保持不变。本文在剖析黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙单维临界响应的基础上 ,建立了侵蚀产沙的复合多维临界模型 ,将自然与人文要素交互作用以及复合临界与多维临界之间的对应关系纳入到统一解释的构架中。

(2)多沙粗沙区的侵蚀强度仍在加剧。其年侵蚀模数的理论极大值为 21618 t/(km²·a) ,而当前的侵蚀模数为 19889 t/(km²·a) ,说明该区侵蚀强度尚未达到侵蚀极限 ,在自然和人文要素的交互作用下仍然呈上升

态势。在目前该地区总产沙强度中 ,可分离的自然因素作用占 80% 左右 ,人为因素作用占 20% 左右。8 个主要影响因素对侵蚀产沙的可分离贡献大小依次为 :降水、泥沙中径 (土壤组成)、农业结构、坡度、林草覆盖、粮食单产 (农业技术)、沟谷密度和治理度 ,其贡献率分别为 61.05%、10.44%、9.21%、4.73%、4.61%、3.56%、3.35% 和 3.05%。

(3)人类活动还在加剧着多沙粗沙区的水土流失 ,水土流失的治理速度抵不上人为破坏速度。由于自然要素难以调控 ,因此调控重点应放在人文要素的侵蚀产沙临界上。当前 ,要进一步加大治理力度 ,力争首先使林草覆盖率达到 23.6% 以上 ,非种植业比例上升到 44.2% 以上或种植业的比例下降到 55.8% 以下 ,粮食单产量超过 2.02 t/hm² ,治理度超过 32%。在此基础上 ,依靠持续不断的治理和自然力的恢复作用 ,来降低整个多沙粗沙区水土流失强度 ,实现该地区的可持续发展。

(4)在多沙粗沙区人为因素产沙贡献中 ,农业结构的贡献最大。这意味着该地区生态环境治理与建设首先要将农业结构调整和优化置于第一位。同时根据模型中 3 个自然与人文要素的交互作用项的减沙作用及其贡献大小 ,可以确定今后该地区水土流失治理措施调整的总体思路是 :以农业结构调整为主线 ,做到 3 个结合即治沟与治坡相结合 ,以治沟为重点 ,陡坡退耕还林还草与发展特色农副产业相结合 ,粮食生产布局的调整和提高粮食单产要与土壤质地结构、建设高产稳产田、采用先进适用技术和改变不合理耕作制度相结合。建议中央在加大该地区生态建设财政转移支付力度的同时 ,提高以粮代赈的标准和实施步伐 ,必要时可进行生态移民 ,以缓解该地区部分人口生存对自然生态系统的压力。

References :

[1] Lu Z C , Yuan B Y , Huang K X , *et al.* Fluvial Geomorphic System. Dalian : Dalian Press , 1991. 308 — 333.

[2] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology. Bull. Geol. Soc. Am , 1945 , 45 : 111 — 120.

[3] Chen Y Z. The slope erosion development of the hill gully area in the middle Yellow River. In : the Editorial Department of Geographical Compilation eds. Geomorphology compilation : Geomorphology (10). Beijing : Science Press , 1985.

[4] Qi C H. Study on the relationship between erosion geomorphology and water and soil loss in the Loess Plateau. Xi'an : Shaanxi People Education Press , 1971. 151 — 154.

[5] Chen H , Lu Z C , Li Z Y , *et al.* The thresholds of geographically environmental factors in the drainage sediment-yielding. Science in China (D) , 2003 , 33 (17) : 1005 — 1012.

[6] Xu J X. The interaction relationship between rainfall and vegetation and its impact on the soil erosion in the Loess Plateau. Acta Geographica Sinica , 2006 , 61 (1) : 57 — 65.

[7] Langbein L B , Schumm S A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Transactions , American Geophysical Union , 1958 , 39 : 1076 — 1084.

[8] Wilson L. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation. American Journal of Science , 1971 , 273 : 335 — 349.

[9] Walling D E , Webb B W. Patterns and sediment yield. In : Gregory K J eds. Background to Palaeohydrology. Chichester : Wiley , 1983 : 69 — 100.

[10] Douglas I Man. Vegetation and sediment yield of river. Nature , 1967 , 215 : 925 — 928.

[11] Dendy F E , Boilton G C. Sediment yield-runoff-drainage area relationships in the United States. Journal of Soil and Water Conservation , 1976 , 32 : 264 — 266.

[12] The loess interdisciplinary observation team of Chinese Academy of Sciences. The natural environment and its evolution in the Loess Plateau area. Beijing : Science Press , 1991. 125 — 175.

[13] Jing K , Lu J F , Liang J Y , *et al.* The erosional environmental traits and evolutionary tendency in the middle Yellow River. Zhengzhou : Huanghe Water Conservancy Press , 1997. 70 — 73.

[14] Heerink N , Mulatu A , Bulte E. Income inequality and the environment :aggregation bias in environmental Kuznets curves. Ecological Economics , 2001 ,38 :359 — 367.

[15] WCED. Our Common Future. Oxford :Oxford University Press ,1987.35 — 110.

[16] Di L , Sun J P , Li Y. A discussion on the scale problems of turning arable land into forest or grass land in the west China. Water and Soil Conservation Study ,2006 ,13 (1) :48 — 50.

参考文献：

[1] 陆中臣 ,袁宝印 ,黄克新 ,等. 流域地貌系统. 大连 大连出版社 ,1991.308 ~333.

[3] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵地区坡地的侵蚀发育. 见：《地理集刊》编委会. 《地理集刊》地貌 10. 北京 科学出版社 ,1976.

[4] 齐矗华主编. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究. 西安 陕西人民教育出版社 ,1971. 151 ~ 154.

[5] 陈浩 ,陆中臣 ,李忠艳 ,等. 流域产沙中的地理环境要素临界. 中国科学 (D) 2003 33 (17) :1005 ~ 1012.

[6] 许炯心. 降水-植被耦合关系及其对黄土高原侵蚀的影响. 地理学报 2006 61 (1) 57 ~ 65.

[12] 中国科学院黄土综合科学考察队. 黄土高原地区自然环境及其演变. 北京 科学出版社 ,1991. 125 ~ 175.

[13] 景可 ,卢金发 ,梁季阳 ,等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势. 郑州 黄河水利出版社 ,1997. 70 ~ 73.

[16] 邱利 ,孙鹏举 ,李毅. 西部地区退耕还林还草尺度问题的探讨. 水土保持研究 2006 ,13 (1) 48 ~ 50.