

# 黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙的临界问题

陈劭锋<sup>1</sup>, 陆中臣<sup>2</sup>

(1. 中国科学院科技政策与管理科学研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**黄土高原多沙粗沙区高强度产沙是自然因素和人文因素综合作用的结果。该产沙过程对其影响要素存在着多个维度的临界响应。在对多沙粗沙区侵蚀产沙影响要素进行识别的基础上, 比较系统地阐述了该地区侵蚀产沙存在的自然临界和社会经济临界问题及其产生的内在机理, 以便为该地区的水土流失治理和生态环境建设提供一定的理论和调控依据。

**关键词:**黄土高原; 多沙粗沙区; 侵蚀产沙; 临界响应

**中图分类号:** S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2007)03-0206-03

## Thresholds of the Erosion Sediment Yield in the Area with Abundant and Coarse Sediment of the Loess Plateau

CHEN Shao-feng<sup>1</sup>, LU Zhong-chen<sup>2</sup>

(1. Institute of Policy and Management Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;

2. Research Center for Eco-environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The high intensive sediment yield in the area with abundant and coarse sediment of the Loess Plateau results from the joint action of natural and human factors, and there are multi-dimensional threshold in the process of sediment yield. From the threshold perspective, the authors systematically analyzed the natural and socio-economic threshold problems existing in the sediment yield process and their intrinsic mechanisms in order to lay some theoretical foundation for the harness of water and soil conservation and improvement of ecological environment in this area.

**Key words:** Loess Plateau; area with abundant and coarse sediment; erosion sediment yield; threshold response

黄河中游黄土高原是入黄泥沙的主要来源,也是我国水土流失最严重的地区,其中多沙粗沙区的产沙量又占整个中游产沙量的 60% 以上。因此多沙粗沙区同时又是黄河流域水土保持、生态建设的重点地区。而研究该地区高强度侵蚀产沙的主要原因及机理,对于寻求有效的治理对策具有重要的意义。长期以来,黄土高原侵蚀产沙的成因研究主要集中在自然要素对产沙过程的影响上,而对人为因素产沙影响的研究相对较少<sup>[1]</sup>。事实上,对黄土高原地区已有的研究表明,产沙过程随着影响要素尤其是自然要素的变化,存在着临界现象,如坡度<sup>[1, 2, 3]</sup>或河道比降<sup>[4]</sup>、降水、植被<sup>[4, 5]</sup>、泥沙中径<sup>[4]</sup>等。鉴于此,本文拟从临界的角度出发,比较系统地阐明和揭示黄土高原多沙粗沙区(含 45 个县、区、旗)主要影响要素的临界产沙响应及其内在机理,以便为该地区水土流失治理和生态环境建设提供一定的调控依据。主要数据来源文献[6]。

### 1 多沙粗沙区侵蚀产沙的影响要素识别及指标体系

黄土高原多沙粗沙区高强度产沙的形成,是自然因素和人文因素共同作用的结果。自然要素奠定了该地区水土流失地理过程的基本空间格局。从地理环境的角度,影响水土

流失的自然因素主要包括土壤、地貌、水文气象、植被四个方面。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的规模和强度产生重要的影响。黄土高原多沙粗沙区之所以水土流失严重的一个重要原因是黄土质地松软,抗蚀力较弱。地貌因素通过影响地表的侵蚀、堆积等过程进而成为影响该地区水土流失的重要因素,包括地面坡度和地表的切割程度。水文气象因素通过对地表物质的冲刷、剥蚀、运移影响水土流失过程,是土壤侵蚀的基本动力因素,包括降水量、降水强度、地表径流等。植被对侵蚀产沙量影响的大小主要取决于植被覆盖度对土壤保护作用的大小。根据数据的可得性,我们分别选择泥沙中径作为该地区土壤质地的衡量指标,用 25° 以上坡度比例和沟谷密度作为坡度和地表破碎程度的度量指标,采用多年平均降雨量作为水文气象的度量因子,选择林草覆盖率作为植被的度量因子。

黄土高原多沙粗沙区的侵蚀产沙还受到叠加于自然因素之上的人类活动因素或社会经济因素的干扰。从环境与发展的角度来看,经济发展对环境的影响可以归结为规模效应(不同的经济规模对环境的影响和压力不同)、结构效应(不同的产业结构、产品结构对环境的影响不同)和技术效应(不同的技术和管理水平也会对环境会产生不同的正向或负

\* 收稿日期: 2006-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 40571062)资助

作者简介: 陈劭锋(1972-),男,副研究员,主要研究方向环境与发展。

向作用)<sup>[7]</sup>。这些因素主要解释了环境与发展之间的库兹涅茨曲线(EKC) 关系即环境质量随着经济发展水平或人均收入的提高呈现出由不断恶化到逐渐改善的临界转变。同时, 人们的环境意识和保护程度也会对产沙过程施加直接或间接的影响。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, 考虑到该地区经济主要以农业为主, 经济规模的扩大和人均收入水平的提高在很大程度上依赖于农业经济结构, 因此我们着重选择了农业经济结构(非种植业产值占农业产值比例)、农业生产技术水平(粮食单产) 和治理保护水平(水土流失治理度) 三个指标进行考察。

黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙的影响要素及度量指标如图 1 所示。

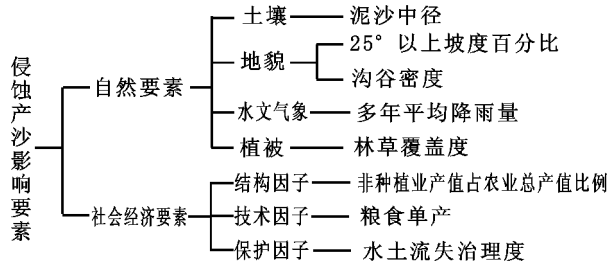


图 1 黄土高原多沙粗沙区侵蚀产沙的影响要素

2 多沙粗沙区自然因素侵蚀产沙的临界响应

2.1 泥沙中径与侵蚀产沙的临界响应关系

许炯心<sup>[8]</sup> 从高含沙水流悬移质泥沙组成的角度, 阐述了黄河中游高强度产沙的原因即当 0.05 mm 的百分比大于 40%, 小于 0.01 mm 的百分比小于 20% 时, 为该区高含沙水流最大产沙的最优颗粒组成区间。陈浩、陆中臣<sup>[4]</sup> 等人发现多沙粗沙区 13 条支流的泥沙中径与输沙模数之间呈二次抛物线关系, 也就是存在临界泥沙中径为 0.054 7 mm。本文用多沙粗沙区 45 个县的资料, 点绘了泥沙中径( $x_1$ ) 与侵蚀模数( $y$ ) 的关系, 结果也呈现出倒 U 型曲线, 其拟合方程为:

$$y = - 9756714x_1^2 + 1111151x_1 - 14496.1 \quad R^2 = 0.569, R = 0.754 \quad (1)$$

按上式计算的临界泥沙中径为 0.056 9 mm。从多沙粗沙区泥沙中径等值线图可以看出, 其临界线正处于皇甫川的二道河弯, 孤山川的府谷, 窟野河的神木, 秃尾河的高家堡以及无定河流域的石峁一线。出现高强度产沙临界中径的主要原因, 从宏观上来说, 与黄土的空间分布和地表物质组成有关<sup>[11]</sup>。从黄土堆积的整体看, 从西北向东南方向, 黄土堆积的分布厚度呈倒 U 型, 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在黄土堆积转换带, 而且黄土平均粒径也沿着此方向逐渐减小, 其临界粒径也分布在堆积转换带。同时, 黄土丘陵沟壑区也分布在转换带内, 包括窟野河、皇甫川的中下游, 秃尾河中下游, 孤山川等河都流经此地。因此, 出现高产沙极值区和泥沙中径临界值, 是多沙粗沙区特定自然地理条件下的必然产物。

2.2 地貌因素与侵蚀产沙的临界响应关系

2.2.1 坡度与侵蚀产沙的临界响应关系

坡度对侵蚀产沙的临界响应前人已做过不少研究工作。陈永宗<sup>[2]</sup> 根据离石和绥德的观测资料得到侵蚀量随坡度增加而增加, 但当坡度增大到 15~ 20°, 侵蚀有加剧趋势, 坡度增加到 30° 左右, 侵蚀量反而比 25° 左右减少。说明坡度对水流侵蚀的影响并不是无限地成正比增加, 而是有个侵蚀临

界, 即地貌临界。超过此临界, 水流的侵蚀力就不再继续增加。而且他认为, 在黄土地区临界坡度为 30° 左右。甘枝茂等<sup>[3]</sup> 也做过类似的研究, 认为在陇中地区流水侵蚀主要分布在 6~ 60° 之间, 而且在 30° 左右达到极值。由于资料来源限制, 我们用 25° 以上坡度的比例( $x_2$ ) 作为该地区坡度的间接衡量指标。它与侵蚀模数之间也呈倒 U 型关系, 其拟合方程为:

$$y = - 5.295x_2^2 + 555.949x_2 + 1311.582 \quad R^2 = 0.496, R = 0.704 \quad (2)$$

计算的临界坡比为 52.5%。出现临界坡比的主要原因是: 坡度是地面固有的总有效能量分配到整个景观的媒介, 在平缓的地面, 有利于水分入渗, 不易形成地表径流, 随着坡度的增加, 土粒的内摩擦角减小, 坡面物质的静止稳定性降低, 水流能量随之增加。因此, 冲刷力增强, 而当坡度达到一定值, 接受降雨的面积反而减小, 因此降雨产生的地表径流也随之减小, 其侵蚀也随之减小。

2.2.2 沟谷密度与侵蚀产沙的临界响应关系

沟谷密度( $x_3$ ) 与侵蚀产沙的关系, 已有研究如陆中臣等<sup>[1]</sup> 齐矗华和甘枝茂<sup>[3]</sup>、景可<sup>[9]</sup> 表明, 二者呈正相关关系。但是我们从运用 45 个县资料点绘的图形上来看, 二者呈倒 U 型曲线, 其拟合的二次抛物线方程为:

$$y = - 25.238x_3^2 + 2478.116x_3 + 3079.285 \quad R^2 = 0.4355, R = 0.660 \quad (3)$$

计算的沟谷密度临界值为 49 km/km<sup>2</sup>。这与目前的最大沟谷密度相比相差甚远。我们认为出现沟谷密度临界的原因与地貌发育阶段有关。目前该地区的沟谷密度正处于壮年期的中期发育阶段, 还将进一步发展, 只有当壮年阶段向老年期准平原过渡时, 才能达到临界值, 此后开始下降。根据地貌发育阶段轮回计算<sup>[11]</sup>, 尚需 125 万年。

2.3 降雨与侵蚀产沙之间的临界响应关系

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<sup>[4, 5]</sup>, 只不过是图形上和临界值上存在差异。通过资料分析, 可以发现多沙粗沙区 45 个县的降水( $x_4$ ) 与侵蚀产沙( $y$ ) 之间呈二次抛物线关系, 其关系式为:

$$y = - 0.788x_4^2 + 740.159x_4 - 158885 \quad R^2 = 0.286, R = 0.535 \quad (4)$$

产生降水临界的机理可用降雨的侵蚀力和地表的抗蚀力解释。由于研究区西北部与毛乌素沙漠接壤, 降雨量少, 地势平坦, 入流能力强, 产沙能力差, 侵蚀力较小。位于东南部半湿润的土石山区, 黄土丘陵子午岭林区, 虽然降雨量大, 但由于林草覆盖度大, 抗蚀力强, 减沙能力就弱。而介于二者之间的黄土丘陵沟壑区、砭砂岩出露区, 植被覆盖度极差, 暴雨强度大, 加之人口密度也大, 面蚀和沟蚀及应力侵蚀作用强, 所以形成了产沙峰值区和最大极值。

2.4 植被与侵蚀产沙的临界响应关系

植被是抑制侵蚀产沙的主要自然因素, 植被的类型、结构、枯枝落叶层、根系对截留降水、增加入渗, 削弱地表径流起着重要的抑制和抗蚀作用, 所以是防止水土流失的重要因素之一。为此我们点绘了多沙粗沙区林草覆盖率( $x_5$ ) 与侵蚀模数关系, 拟合的二次抛物线方程为:

$$y = - 23.932x_5^2 + 1127.273x_5 + 1360.311 \quad R^2 = 0.366, R = 0.605 \quad (5)$$

产沙极值所对应的林草覆盖率为 23.6%。这种临界关系是由黄土高原多沙粗沙区所处的自然地带所决定的。以生物气候为主要依据, 以地貌、土壤、温度条件和水文状况为特征

指标,可将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阔叶阔叶林带<sup>[11]</sup>。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。大致在兰州-海源-同心-定边-榆林-神木-东胜一线以北,为干旱荒漠草原,该带年均降雨为 150~300 mm,植被为荒漠草原,植被在 20% 以下,自然植被净初级生产力(NPP)在 4 t/(hm<sup>2</sup>·a) 以下,属剧烈风蚀区。黄土高原中部的温带半干旱草原、森林草原带,其北部和西北部与荒漠草原带相接壤,东南界以武山-通渭-隆德-镇原-华池-延川-石楼-文水-太原一线。年降雨量 450~500 mm,植被主要为干草原,植被度最大为 23.6%,NPP 在 6~8 t/(hm<sup>2</sup>·a) 之间,地貌以黄土丘陵沟壑区为主体,沟谷密度为 5~6 km/km<sup>2</sup>,土壤组成为砂黄土,沙比系数为 0.5~1.0。属暖温带半干旱草原风蚀、水力侵蚀带。水土流失强烈,是产沙的峰值区和临界区。该区之南,为暖温带半湿润阔叶林带,降雨量 500~600 mm,具有森林草原和干草原交错的过渡性景观,NPP 在 9~10 t/(hm<sup>2</sup>·a) 之间,地形以黄土塬为主,沟谷密度为 2 km/km<sup>2</sup>,土壤组成为黄土和黏黄土,沙比系数为 0.4~0.5,水土流失为中度侵蚀。以上所述,可以清楚地看出,在植被的影响下,侵蚀产沙临界出现的规律。

3 多沙粗沙区社会经济因素侵蚀产沙的临界响应

3.1 农业经济结构与产沙的关系

黄土高原多沙粗沙区的农业经济结构是指种植业、林业、牧业、副业之间的比例关系。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。可以预期,随着该地区经济发展,种植业在农业产值中所占比例下降,而非种植业的比例将趋于上升。有鉴于此,我们将非种植业产值占农业产值的比例( $x_6$ )作为农业结构优化和升级的标志性指标,而且也是该地区人民生活水平提高的希望所在。非种植业产值占农业产值的比例与年侵蚀模数之间的关系如下图所示。

从图上来看,二者之间呈现出倒“U”型关系,即年侵蚀模数随着非种植业比例的提高而增大到一定程度时开始下降。其拟合方程为:

$$y = -9.997x_6^2 + 1030.246x_6 - 10912.0 \quad R^2 = 0.329, r = 0.574 \quad (6)$$

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。出现这种现象的原因主要在于在临界点以下,非种植业比例的提高所带来的潜在减沙效应不能抵消种植业所造成的水土流失效应,导致侵蚀模数不断增加,而当超过临界点,这种趋势将得以扭转。

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,因为提高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<sup>[12]</sup>。因此我们用粮食单产来表征该地区的生产技术水平。在黄土高原多沙粗沙区,人均粮食产量平均只有 210 kg,远低于保障粮食安全的最低标准(400 kg),因此生存问题仍是该地区社会经济发展面临的重大问题,也是该地区环境可持续性面临的主要问题。目前该地区粮食产量平均只有 1.80 t/hm<sup>2</sup>,十分低下。因此,提高粮食单产对缓解这一地区人口生存对脆弱生态环境的压力具有重要意义。

从该地区粮食单产( $x_7$ )与侵蚀产沙的关系来看,二者基本符合倒 U 型关系,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,如图。其拟合方程为:

$$y = -1574.858x_7^2 + 8459.909x_7 + 4680.318 \quad R^2 = 0.313, R = 0.559 \quad (7)$$

通过对方程求导,可以确定粮食单产的临界点为 2.69 t/hm<sup>2</sup>。在临界点以下,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增沙作用。其原因主要在于在面临投入不足和资源利用技术落后的情况下,该地区人口为了维持基本生计,不得不采用陡坡开垦、挤占林草用地、广种薄收等一系列不合理的耕作制度和方式措施来提高粮食产量进而加剧水土流失,由此导致粮食单产提高所带来的潜在水土流失压力减轻仍然无法平衡人口生存所导致的水土流失压力。

3.3 生态环境治理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占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。水土保持措施通常包括修梯田、建淤地坝、植树造林种草等生物和工程措施,从而直接或间接对该地区的土地利用结构(耕地、林地、草地)和生态环境质量施加影响。从该地区年侵蚀模数( $x_8$ )与治理度之间的关系来看,二者也呈现出一种倒 U 型关系,即产沙强度随着治理度增加到一定程度才开始下降。二者的拟合关系如下:

$$y = -2.205x_8^2 + 347.576x_8 + 4654.750 \quad R^2 = 0.356, R = 0.597 \quad (8)$$

其临界点为  $x_8 = 78.9\%$ ,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。

从整个多沙粗沙区来看,在临界点以下,侵蚀产沙随着治理度的增加而增加,但增加速度相对趋缓,其原因大体可以归结两方面的原因:一是人为的水土流失治理速度跟不上水土流失的增加破坏速度,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,不但不会起到治理作用,反而从宏观上会在一定程度上加剧水土流失,如淤地坝因质量问题造成跨坝而形成的水土流失、开垦梯田而引发新的水土流失等。从目前来看,该地区的治理措施远未达到有效控制水土流失的作用。

4 结 论

黄土高原多沙粗沙区的高强度产沙是自然要素和人为要素综合作用的结果。产沙过程随着上述影响因素的变化存在着多个维度的临界响应。而揭示这些临界响应和临界阈值可以为该地区的生态环境治理提供一定理论和调控依据。由于自然因素难以调控,因此该地区的水土流失治理重点应该放在对人为因素的调控上。从各要素侵蚀产沙的临界响应阈值来看,如果要遏止该地区水土流失恶化的趋势,其目标首先要使得该地区林草覆盖率达到 23.6% 以上,非种植业产值的比重达到 51.5% 以上,粮食单产达到 2.69 t/hm<sup>2</sup>,治理度达到 78.9% 以上,而目前该地区上述指标的平均值分别只有 20.8%,45.3%,1.80 t/hm<sup>2</sup> 和 31%。由此可见,该地区的水土流失治理任重道远。

(下转第 211 页)

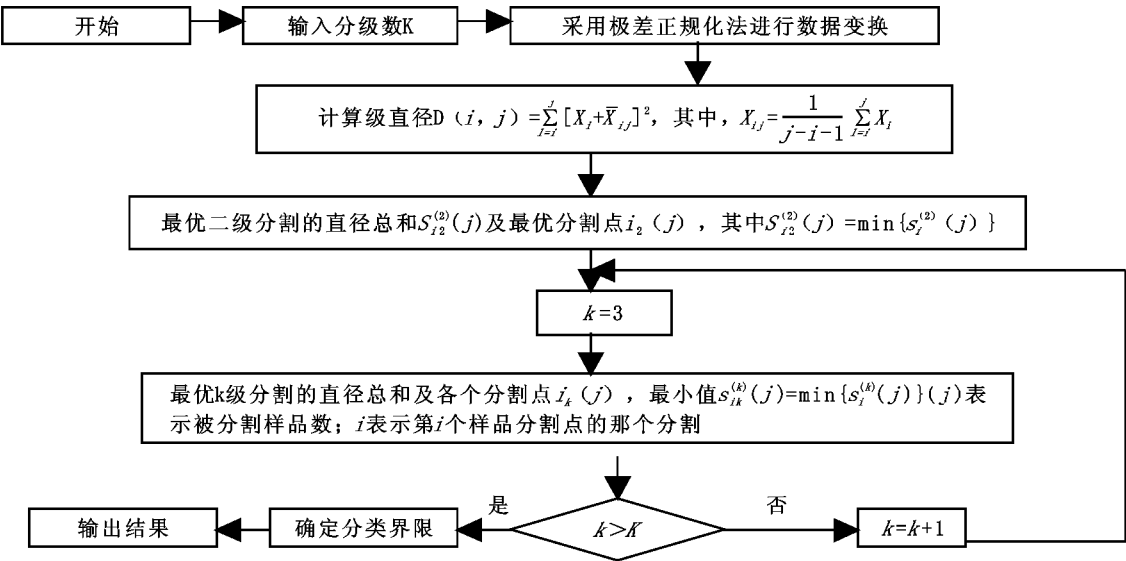


图 3 计算步骤框图

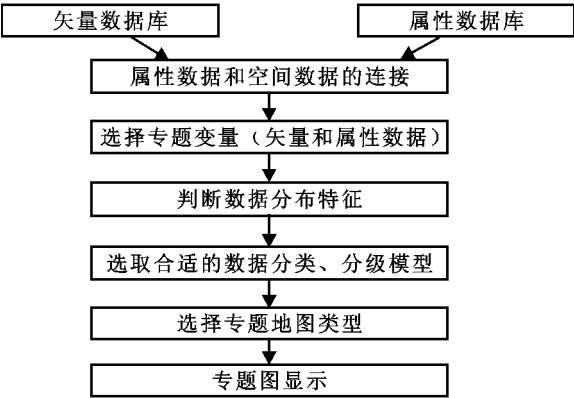


图 4 制作数字统计地图流程图

4 环境具体操作

数字统计地图的制作是根据某个或某些特定统计属性数据值(又可称作字段名、专题变量、专题指标)对地图进行渲染的过程。环境的具体操作流程见图 4。

数字统计地图生成环境在 MapInfo 主界面中开发,采用 MapBasic 及面向对象的程序设计语言 VC++ 分别完成操作界面的设计和分类、分级模型库的开发、调用,克服了目前 MapInfo 在专题图制作方面的缺陷,使统计地图的制作更加科学合理。在今后的研究中,还应该对制作的专题地图进行完善,如提供更多的专题地图类型、丰富的符号库等,使之向专家系统的方向发展。

参考文献:

[ 1 ] 邹艳红, 向南平, 刘兴权. 在 Mapinfo 系统中嵌套 Access7.0 的方法[ J ]. 测绘通报, 1999, (8): 28- 30.  
[ 2 ] 刘光. 地理信息系统二次开发教程——语言篇[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 59- 110.  
[ 3 ] 党安荣. 地理信息系统可视化专题制图要素分级探讨[ J ]. 地理学报, 1998, 6( 增刊): 61- 66.  
[ 4 ] 谢鹏, 候祺棕, 黄晔莹. 空气污染扩散模型与 GIS 应用结合的探讨[ J ]. 工业安全与环保, 2005, (4): 14- 16.  
[ 5 ] 周劲, 董洁文, 张平. 最优分割分析在水环境监测优化布点中的应用[ J ]. 济南大学学报, 2005, (4): 316- 318.

( 上接第 208 页 )

参考文献:

[ 1 ] 陆中臣, 袁宝印, 等. 流域地貌系统[ M ]. 大连出版社, 1991. 308- 333.  
[ 2 ] 陈永宗. 黄河中游黄土丘陵地区坡地的侵蚀发育[ A ]. 《地理集刊》地貌 10[ C ]. 北京: 科学出版社, 1976.  
[ 3 ] 齐矗华. 黄土高原侵蚀地貌与水土流失关系研究[ M ]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1971. 15, 154.  
[ 4 ] 陈浩, 陆中臣, 李忠艳. 流域产沙中的地理环境要素临界[ J ]. 中国科学, D 辑, 2003, 33(17): 1005- 1012.  
[ 5 ] 许炯心. 降水- 植被耦合关系及其对黄土高原侵蚀的影响[ J ]. 地理学报, 2006, 61(1): 57- 65.  
[ 6 ] 黄河上中游管理局. 黄河流域水土保持基本资料[ M ]. 西安: 黄河上中游管理局, 2001.  
[ 7 ] Panayotou, T. Environmental degradation at different stages of economic development[ A ]. In: Beyond Rio: The Environmental Crisis and Sustainable Livelihoods In the Third World[ M ]. (eds. Ahmed, I, Doleman, J A ), Macmillan, Houndmills and London, 1995.  
[ 8 ] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区高含沙水流的粒度组成及其地貌学意义[ J ]. 泥沙研究, 1999, (5): 13- 17.  
[ 9 ] 景可, 卢金发, 梁季阳, 等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势[ M ]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 70.  
[ 11 ] 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[ M ]. 北京: 科学出版社, 1991.  
[ 12 ] 世界环境与发展委员会. 我们共同的未来[ M ]. 国家环保局外事办公室译. 北京: 世界知识出版社, 1989. 34- 35.