

黄河中游侵蚀产沙环境要素临界与交互作用研究进展

陈 浩¹, 蔡强国¹, 周金星², 胡文生¹, 梁广林¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘 要: 目前黄河中游产沙的峰值区(多沙粗沙区)的范围已明确界定。但是, 产沙峰值区的形成与地理环境要素(自然、人类活动)变化的响应机制是什么, 影响产沙峰值区环境要素的综合作用和主导环境因素又是什么, 还有待于深入研究。在前人研究的基础上, 论述了黄河中游的环境因子和人类活动对流域侵蚀产沙影响研究的最新进展, 根据研究中存在的问题及结合黄土高原正在开展的退耕还林的生物工程建设, 指出加强流域产沙与环境要素临界特征与交互作用研究的重要性, 揭示自然、人类活动在流域产沙的综合影响与交互作用, 探讨在人类活动影响下植被的恢复前景与综合治理的减沙效益, 是近期需要开展的主要研究方向。

关键词: 交互作用; 环境要素临界; 植被恢复; 黄河中游

中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2004) 04-0054-06

Research Progress of Interactive Influence and Thresholds of Geographic Environmental Elements on Sediment Yield of Drainage Basins in the Middle Reaches of the Yellow River Basin

CHEN Hao¹, CAI Qiang-guo¹, ZHOU Jin-xing², HU Wen-sheng¹, LIANG Guang-lin¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CA S, Beijing 100101, China;

2. Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry Scientific Research, Beijing 100091, China)

Abstract: At present, the range of peak area (especially in the coarse and overburden sediment area) about runoff and sediment in the middle reaches of the Yellow River has been definitely ascertained. However, the response mechanism between the forming of the peak area and the changes of the geographical environmental factors is unknown. And the environmental factor, which has the most important effect on the peak area, needs further study. Based on the existing study, this project discusses the new research progress about the comprehensive effect, which environmental factors and human activities have on the erosion and sediment yield in the middle reaches of the Yellow River. Considering the existing problems and the key project of returning farmland into forest at present, the main research aspects at present in soil erosion field go as follows: (1) the importance of study on the critical characteristic and the interaction between sediment yield and environmental factors; (2) the integration and interaction between physical geographic environment and human activities; (3) the benefits of vegetation restoration and comprehensive control in reduction of sediment.

Key words: interactive influence; environmental elements thresholds; vegetation recovery; middle reaches of the Yellow River basin

黄土高原严重的土壤侵蚀令世人瞩目。为了改善当地的生态环境, 减少黄河中游的粗泥沙对下游河道的威胁, 早在上个世纪 50 年代我国就开展了黄土高原不同自然带、地貌类型区的侵蚀分区、泥沙来源、以及水土保持综合治理的实验研究, 至目前黄河中游流域产沙的峰值区(多沙粗沙区)的范围已明确界定^[1~3]。但是, 多沙粗沙区流域产沙峰值区的形成与地理环境要素(自然、人类活动)变化的响应机制是什么, 影响产沙峰值区环境要素的综合作用和主导环境因素又是什么, 还有待于深入的研究。

分析黄河中游的自然地带性、非地带性环境因子和人类活动在侵蚀产沙中的综合和交互作用, 对于揭示多沙粗沙区流域产沙极值形成的复合临界环境条件, 深入认识黄土高原

流域产沙与环境因素影响的响应机制, 以及我国正在进行的西部大开发与退耕还林生态环境恢复与建设, 有重要的理论与实际意义。

1 影响流域侵蚀产沙的环境要素临界与交互作用

最早涉及环境因子对流域侵蚀产沙影响的临界问题是地貌临界的研究, 早在上个世纪初, Hudson, N. W. (1917)、Renner(1936)、Horton(1945)就探讨了坡度与土壤侵蚀的关系, 发现存在影响侵蚀强度变化的临界坡度和径流作用的分带性^[4~6]。Schumm 等人(1973)提出了内、外地貌临界的概念, 研究了流域系统侵蚀、输移、沉积的临界问题^[7]。鉴于临界问题是地表剥蚀过程中广泛存在的自然现象(地表剥蚀过

① 收稿日期: 2004-07-10
基金项目: 香港特区政府研究资助局支持项目(HKU 7017/01E); 国家基金委和黄河水利委员会重点基金项目(50239080)
作者简介: 陈浩(1954-), 男, 山东鄄城人, 西南农业大学客座教授。

程中的临界是指在影响因子作用下, 土壤侵蚀方式、强度、地表形态发生突变的转折点), 70 年代后, 人们不断注重侵蚀产沙机理和具有物理基础理论模型的研究。其间开展了一系列有关降雨能量、径流剪切作用、细沟发育、坡面侵蚀作用方式、坡度、坡长, 流域侵蚀与产沙关系、水流侵蚀力学、降雨、入渗、径流过程的小流域三维空间侵蚀模型研究、降雨径流的水动力机制及泥沙输移过程的关联研究, 均涉及侵蚀力转换的临界特征研究^[8~17]。

自 Davis 侵蚀循环和 Penck 地貌发育理论模式问世以来, Horton(1945) 的沟道发育与河系结构形态量计定律、Strahler(1952, 1964) 等人高程积分法的地貌演化研究, 及 Carson 等人(1970) 的地貌形态过程- 响应模型, 也涉及了地貌发育中的临界问题^[60, 66]。近十几年来, 随着 RS、GIS、GPS 技术以及非线性科学在地学上的应用, O'callaghan 等人进行了流域地貌三维数值模拟及地貌形态之间关系的研究, Rinado 等人和 Dodrigue 等人分别根据最小能耗原理和自组织临界概念, 开展了流域地貌演化动力学及流域地貌形态侵蚀演化特征的临界研究^[18~20]。

在我国, 地貌临界研究开始于 50 年代, 郭继志研究了径流和冲刷量发生变化的临界理论坡角。罗来兴、承继成、陈永宗、蔡强国等人研究了发生在黄土坡面上细沟发育的临界现象。有关黄土高原坡面与各级沟道发育阶段中的临界, 坡度、坡长、坡地侵蚀分带性, 沟谷发育及河床演变中的地貌特征, 坡、沟侵蚀演化关系与泥沙输移比和高含沙水流形成过程等研究, 以及杨志达(1981) 的耗散结构和朱晓华(1999) 分形等的非线性地貌特征研究均涉及一系列的临界问题^[21~32]。

所谓流域产沙环境要素临界是指在气候、下垫面、人类活动影响下, 流域产沙量发生突变的环境要素特征的转折点^[33]。临界阈值(驻点、拐点) 的存在, 不仅揭示了地表剥蚀过程中发生突变的物理现象和侵蚀产沙机理, 更重要的是根据所发生的临界条件和揭示的每个环境要素的侵蚀作用, 将有助于人们有的放矢的采取相应的整治措施。

自上个世纪 50 年代末 Langbein 和 Schumm(1958) 著名的降雨与产沙上凸左偏 S 型曲线问世以来, 国内外开展了大尺度、甚至于全球尺度流域悬移质产沙量的研究, 研究表明, 由于地貌、地表物质组成、人类活动等影响起着重要的控制作用, 虽然在全球的范围内, 年降雨量与产沙量之间不存在确定的关系, 但在区域范围内, 流域悬移质产沙量与流域环境要素之间在图形上呈明显的上凸或下凹的单峰、双峰、多峰式曲线关系, 存在影响流域产沙的环境要素的临界特征^[34]。近年来, 为了认识气候变化和人类活动在产沙过程中的作用, 人们更加注重长历时、大空间的变化, 根据河流悬移质泥沙通量长期增减变化分析气候变化和人类活动对产沙的影响, 研究世界范围不同气候带降水- 地形- 岩性因素与流域产沙的预报模型^[35~38]。

在我国, 许炯心(1997)、景可(1990)、顾弼生(1990) 等人首先开展了中国不同自然带、黄河中游、黄土高原不同地貌类型区的流域环境与侵蚀产沙耦合关系研究, 并建立了流域产沙与环境要素的回归模型。研究表明, 流域产沙量与年降雨量呈上凸的曲线关系, 并存在影响流域产沙的环境要素临界, 反应出当自然地带性因子起主要作用时 Langbein 和

Schumm(1958) 定律在区域空间上的普遍意义^[39~41]。

流域侵蚀产沙受环境要素的综合影响, 流域环境要素之间存在着影响流域侵蚀产沙的交互作用^[33], 黄河中游侵蚀产沙峰值区(多沙粗沙区) 流域产沙极值的形成与其形成的地理环境要素的综合(或称复合) 临界特征有关。环境因子交互作用存在会使流域侵蚀产沙的极值区范围发生变化, 当某个环境因子(自然或人类活动) 作用为主时, 会使复合临界阈值偏移或产沙极值减小或消失。因此, 揭示自然因素和人类活动的作用, 以及二者之间对流域产沙的交互作用, 将有助于不断深入探讨黄河中游多沙粗沙区流域侵蚀产沙极值的成因, 并寻求相应的治理对策。但是, 长期以来有关宏观尺度流域产沙的研究主要注重自然带环境因子的影响。而对其它非地带性因子对侵蚀产沙影响的定量研究不够。尤其是对流域产沙中的复合环境要素临界和地带性因子与非地带性因子对流域产沙影响的交互作用研究就更少, 目前定量研究人类活动与自然要素对流域产沙峰值区形成的交互作用研究尚属空白。

在世界上许多地区, 当自然地带性因子起到主要控制作用时(指年降雨量与植被类型、密度的对应关系), 流域侵蚀产沙的变化可以用 Langbein—Schumm 关系加以解释, 但在另外一些地区, 随年降雨量的增加出现的流域产沙量双峰或多峰变化, 显示出当非地带性因素在流域产沙中起重要控制作用时, 如人类活动的影响致使天然植被发生破坏, 原生地带性特征已不明显, 植被密度也起不到原有的保护作用等, 而其它非地带性因子(如地表物质组成、坡度等) 就会显现其在侵蚀产沙过程中起到主要的控制作用。

非地带性因子是以地貌因子作用最为典型, 其中包括坡度、坡长和流域尺度对侵蚀产沙影响的研究。坡度、坡长与侵蚀的关系比较复杂, 许多的研究表明, 存在影响坡面侵蚀产沙的临界坡度、临界坡长(包括细沟、浅沟、切沟等临界), 不同的是在临界坡度、临界坡长的判别上有着较大的分歧。同时也有一些的研究显示, 不存在影响坡面侵蚀产沙的临界坡角和临界坡长, 或临界坡长只在特定的降雨条件下存在^[32]。上述出现的认识不统一, 其重要原因就是没有考虑到将非地带性环境因子的坡度、坡长, 与其在不同自然带上的作用区分开, 也就是说, 目前研究的是特定条件下的坡度、坡长, 具有区域上的意义, 在有其它环境因子的作用时(如岩性、不同自然带、人类活动等), 坡度、坡长的作用就会发生改变。此外, 非地带性因子之间也存在着交互作用, 除了水平面和绝对不透水层或一定坡度下的坡长外, 坡长对于侵蚀产沙的影响, 往往伴随着坡度的交互作用。流域尺度对侵蚀产沙的效应也是涉及环境因子的交互作用问题。如何将小流域的侵蚀产沙研究成果推导到大流域, 其间的降雨径流侵蚀产沙的尺度关系如何转换? 特别是大尺度流域可以跨越不同自然带, 由于涉及地带性与非地带性因子的交互作用问题, 小流域的侵蚀产沙机制是否可以向大流域转换, 尺度转换模型势必要考虑流域下垫面的环境特征。而准确地揭示宏观非地带性因子(包括坡度、流域尺度在内) 的作用机理, 对于明确黄土高原非地带性因子所起的作用和相应整治的对策具有重要的意义, 也是目前研究的难点和亟待解决的问题。近年来, Michal Church et al^[42]从流域地貌的角度对流域尺度的产沙效

应的研究,得到比较广泛的关注。

此外,陆中臣等^[24]从黄土高原流域地貌发育的角度、许炯心^[43]从高含沙水流的角度对黄河中游多沙粗沙区的成因也进行了不同程度的揭示。

2 气候变化和人类活动对流域产沙的影响

面对黄土高原正在开展的退耕还林的生物工程建设,作为退耕还林(草)土地利用的宏观景观格局的一部分,黄河中游不同自然带宏观尺度植被自然恢复背景值,及现状不同自然带的林(草)恢复与产沙的治理前景,更是迫切需要解决的问题。目前,气候、地貌、地表物质组成的大自然环境人类是难以控制的,但人类活动具有二重性,既可以破坏环境起到侵蚀加速的作用,也可以通过有益的人类活动,使自然环境得到改善或恢复,抑制侵蚀产沙过程。70年代中后期,历史地理学家史念海就从黄土高原森林植被环境的历史演变角度研究了人类活动对环境和侵蚀产沙的影响。80年代,洪业汤、戴英生等人从地质环境的角度讨论了黄土高原的侵蚀问题。同期唐克丽讨论了黄土高原环境与侵蚀产沙的演变,景可、陆中臣等人讨论了自然侵蚀与人类加速侵蚀的问题^[43-46,40,24]。

早在上个世纪50年代黄土高原就开始了水土保持环境整治,并制定了治坡为主、坡沟兼治的治理方针,但在执行过程中并未全部贯彻。直到80年代黄土高原才重视植树造林(草)等生物与工程措施、治坡与治沟兼治的最优综合治理方案,并认识到不同自然带适地适树(草)的特点,事实上在控制来自黄河中游的泥沙进入下游的问题上,80年代后已有显著的成效^[47]。在黄河中游开展大规模水土保持之前,每年约有16亿t的泥沙进入下游,经过30年的治理,黄河的泥沙到80年代中期已减少了一半,只有8~9亿t。据研究,减沙作用中气候波动、水土保持约各占50%^[48,49]。目前又经过了近20年,50年来水土保持的减沙效益究竟有多大?气候波动、人类活动的贡献率占多少?近几十年来流域水沙变化成因仍是需要深入探讨的问题。目前水沙变异的成因研究主要采用水文法和水保法二种,所选用环境要素也仅限于降雨量的变化。近期作者采用地理环境要素法进行了水沙变异成因的初步分析,但是,气候波动和人类活动的定量界定仍是需要深入研究的问题。

由于种种原因,目前造林保存率仅15%以下,种草保存率就更低。也就是说黄河中游、特别是河口镇-龙门区间的多沙粗沙区,水利水保工程措施对于控制流域产沙起到主要作用,而坡面生物措施还未起到显著的作用。近年来,结合黄土高原退耕还林(草)的生物工程的建设,总结以往治理工作中的经验教训,人们开展了黄土高原植被恢复中主要问题与对策、途径、水分生态环境、以及植被恢复的生态学依据研究^[50-53]。水分是制约黄土高原地区植被恢复与生态环境重建的决定性因子^[54]。造成造林过程中林木衰败,人工灌草衰败的是由于土壤水分亏缺的现象,宏观格局和流域内垂直空间林、灌、草的布局不合理和养护管理等问题^[55]。对于造林是改善气候增加水资源,还是起到抽水机的作用,还存在争

议。争议的存在,涉及退耕还林是以自然恢复为主,还是以人工造林为主,涉及到恢复速率的问题。目前,在植被主要依靠天然降雨的黄河中游半干旱地区,乔、灌、草空间降雨量界线的确定还有待于更为科学的界定。如何根据自然环境特征的空间差异性,尤其是根据黄土高原不同自然带水环境和侵蚀环境的特点,制定宏观坡沟治理与开发战略,确定坡、沟、生物、工程适宜区的宏观区域界线与地貌部位?还有待于黄河中游不同自然带、不同尺度(时间、空间)植被的变化、林、草的分布界线(水环境临界)、恢复能力(生态需水临界),以及与流域环境要素、环境质量(侵蚀产沙)耦合关系的继续深入研究。根据周金星等人半干旱区植被封育和恢复的研究成果,封山育林是恢复和重建森林植被的重要途径,通过35年以上的封育,流域中出现草、灌、小乔木的自然演替规律,受土壤水分的差异,坡向不同,自然演替的进程也存在差异^[56]。不过,在相同的自然带和时段,采用人工造林、封育的方法,可以获得与自然封育相同的沟壑中草、灌、小乔木植被类型与密度。但是,植被自然演替和恢复进程中对侵蚀产沙的影响,目前尚缺乏深入的定量研究。这些问题的解决,对于认识黄土高原重点产沙区的生物、工程综合治理前景,以及定量评价人类活动在流域产沙中的作用,确定宏观区域工程、生物、坡面、沟道适宜区的界线临界阈值有重要的理论与实际意义。根据黄河中游不同自然带的水环境特点,确定林、灌、草适宜区的空间格局及临界降雨量的界线,以及植被恢复的生态需水临界阈值的确定,在人类活动影响下的植被恢复前景将是需要研究的重要内容。

植被是决定一个地区生态环境质量的基本要素,它对抑制土壤侵蚀(水蚀、风蚀)起到十分重要的作用。植被的抗蚀作用主要体现在植被盖度上。大量研究表明,存在抑制土壤侵蚀的林草有效植被度(抗蚀速率拐点)^[3]。黄土高原地区植被对侵蚀的抑制作用一般存在着双重临界(30%和60%之说,如卢金发等^[57]),王兆印等^[58,59]则通过建立植被-侵蚀动力学模型从理论解上给出了任一地区的植被系统都可能存在三种状态的临界域。但是以往的许多研究是建立在坡面径流小区或小流域或区域分析的基础上。而当流域尺度增大时,地貌、岩性、天然植被和地带性、地域性降雨和土壤水分等条件就会有很大的改变。多沙粗沙区及大的侵蚀类型区、地貌类型区植被的恢复程度、其中包括农业用地、经济林草等宏观土地利用方式的现状与调整,仍是需要不断探讨的问题。植被恢复就必然涉及黄土高原植被恢复的背景值,也就是植被恢复的程度。由于地质时期和历史时期黄土高原是否存在森林和茂密的林草植被,在学术界一直存在争议,观点的差异也就必然影响林草措施及治理前景认识的一致性。在黄河中游、尤其是半干旱的多沙粗沙区和不同地貌类型区,在退耕还林、植被恢复的背景下,根据现状植被景观格局及与流域产沙关系的定量研究,探讨宏观林草植被盖度能够恢复的程度目标和对产沙的影响,以及恢复目标的天然降雨生态需水临界阈值,也是退耕还林、植被恢复生态建设中亟待解决的理论问题。

3 存在问题与近期研究方向

近期陈浩等人^[33]综合考虑了坡度、降水、植被、悬移质泥沙中径等因素对流域产沙的影响,提出了流域产沙复合环境要素临界概念,并且初步研究了流域产沙量发生临界变化时环境要素综合特征值条件,以及地带性、非地带性环境因子对流域产沙极值形成的单、复合交互作用和环境因子交互作用临界变异空间^[62]。并初步探讨了近几十年来自然与人类活动对水沙变化的影响和成因。这些工作虽然在前人的基础上取得一定的进展,但研究的对象仅是黄河中游已控一级支流的变化范围,尚未包括黄河中游干流段的更大流域空间,也没有涉及一级支流内不同尺度流域产沙与环境的时空变化关系。此外还存在尚未涉及的环境因子。虽然流域下垫面环境要素特征是长期以来气候变化和人类活动共同作用下地表剥蚀过程的具体表征,但建立的流域产沙对环境要素过程响应模型,环境变量仍倚重于自然的属性,特别是近几十年来,在气候变化和人类活动影响下,流域产沙对环境要素(自然与人类活动)变化的过程响应机制,仍有待于深入的研究。

综上所述,目前关于流域产沙的环境要素临界研究主要偏重于自然因素的影响,而对人为因素的作用考虑甚少(包括自然因素和人为因素的交互作用),尤其是未能把自然环境系统的演变与人类活动的环境整治的关系有机地衔接起来,导致在流域产沙机理的揭示上还有待于进一步深入,而且难以与退耕还林(草)、植被恢复与生态环境重建的实践有效地结合起来。近期需要开展以下研究:

3.1 流域侵蚀产沙的地理环境要素单、复合临界与交互作用

研究目的是阐明黄河中游形成多沙粗沙区流域侵蚀产沙极值的临界环境要素特征及侵蚀产沙与环境变化的过程响应,主导因素及人类活动影响下流域产沙的响应机制。主要研究黄河中游多沙粗沙区环境演化中气候、植被、地貌、岩性等及人类活动等影响下,不同环境要素特征变化与流域产沙的耦合关系,并揭示形成流域侵蚀产沙极值的环境因子单、综合临界条件、权重和交互作用。包括:

- (1) 环境因子(地带性、非地带性)对流域侵蚀产沙的影响与临界特征。
- (2) 地带性、非地带性环境因子对流域产沙影响的交互作用。
- (3) 流域侵蚀产沙与尺度转换机制及环境要素的影响。

3.2 黄河中游植被恢复对流域侵蚀产沙的影响与治理前景

研究目的是面对黄土高原退耕还林生态环境建设,根据黄土高原林草土地利用的宏观格局,揭示黄河中游不同自然带水环境及林草植被空间分布的界线,和临界阈值,黄河中游植被恢复的天然降雨与林草恢复生态需水临界阈值。根据植被恢复与产沙的耦合关系分析生物措施的治理前景。包括:

- (1) 中游林、灌、草宏观格局和天然降雨临界阈值界线与林草恢复的天然临界生态需水量。

- (2) 河中游植被恢复与生物措施对流域产沙的影响与治理前景。

- (3) 河中游半干旱区典型区植被恢复的自然演替规律与侵蚀产沙关系。

生态用水是指维持各类生态系统正常发育与相对稳定必需消耗和现存的水分称为生态用水。

其中包括地带性和非地带性植被需水以及河湖湿地内水动物植物用水等等^[63]。天然生态用水是假定没有人类活动时的天然状态下的生态用水,该种生态用水计算有利于还原自然界的本来面目,有利于已经破坏的生态环境的保护。目标生态用水是指达到生态系统某一目标状况是的水,该种生态用水计算有利于按照实际需要规定生态生态系统的控制目标,有利于生态环境科学调控与水资源合理分配^[65]。

有关生态用水量的计算是目前研究的热点,但精确的得到森林覆被的生态用水量还存在一定困难。关于林、灌、草生态用水量有关参数(蒸散量)的估算一般分为二大类:一类是利用野外观测和建立模型相结合的方法。这类方法通常从水量平衡、能量平衡、空气动力学等基本方程出发,利用野外观测获取其中的参数,然后对方程简化和求解;一类是利用气象参数和植物生长参数直接求解,或建立相关方程。目前,对森林参数的估算,一般都是第一类方法。草地蒸散量的估算,虽然两类方法都可以。但由于第二类方法,求解简单,精度一般亦可以保证,故在实际应用上,通常都采用第二类方法。本文的植被生态需水量与上述生态用水量的概念不同,但可相互转换。本文的植被生态需水是指黄河中游宏观区域(县域、流域)与标准期(建站-60年代)相比,以及以标准期为能够恢复目标的单位时间、单位面积上植被生产力(包括林、灌、草)所需天然降雨量。根据初步建立的黄河中游各县、流域年降雨量与自然植被生产力的回归模型,存在极高的计算精度。可以根据估算的生态需水量与上述生态用水参数(林、灌、草的盖度)的计算即可得到对应单元林、灌、草生态用水量的转换值。

3.3 人类活动与自然环境要素对流域侵蚀产沙过程影响的交互作用

研究目的是根据黄河中游的地理环境特征(自然与人类活动)与流域侵蚀产沙的耦合关系研究,揭示自然与人类活动对侵蚀产沙过程的综合与交互作用,近50年来,水沙变异的成因。包括:

- (1) 流域侵蚀产沙与自然和人类活动的交互作用。
- (2) 50年来,黄河中游水沙变异与环境要素的过程响应与成因。
- (3) 人类活动影响下流域产沙过程对环境变化的复杂响应。

复杂响应的概念来源于Schumm, S. A (1963)和许炯心等人(2000)黄河下游河床调整对于水沙组合的复杂响应研究^[7,64]。许炯心根据黄土高原特有高含沙水流的现象,修正了国际上著名的Schumm来水来沙条件变化(未涉及高含沙水流)河床调整定性理论,揭示了包括非高含沙水流和高含沙流域在内的河道挟沙水流的复杂冲淤行为,即流水地貌系

统的复杂响应。本项研究的复杂响应是指在人类活动影响下,在一定天然降雨洪水影响下,流域侵蚀产沙过程与自然条件下发生变化的复杂行为称为复杂响应。

开展本项研究对于深入揭示黄河中游多沙粗沙区流域产沙的形成机理,探讨人类活动影响下流域产沙过程对环境

变化的复杂响应机制,以及自然环境和人类活动的作用和临界阈值,为有关部门黄土高原生态环境建设,水利水电工程措施和退耕还林草生物措施的宏观配置、科学实施与决策具有重要的理论和实际意义。

参考文献:

- [1] 黄秉维. 编制黄河中游流域土壤侵蚀分区图的经验教训[J]. 科学通报, 1955, (12): 15–21.
- [2] 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类[J]. 土壤学报, 1956, 4(2): 99–115.
- [3] 徐建华, 牛玉国. 水利水电工程对黄河中游多沙粗沙区径流泥沙影响研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
- [4] Hudson N W. Soil Conservation[M]. London: Batsford, 1917. 320.
- [5] Renner F G. Conditions influencing erosion on the Boise River Watershed[M]. Washington, D. C: U. S. Dept. Agric., Tech. Bull., 1932.
- [6] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bull. Geol. Soc. Am, 1945, 45: 111–120.
- [7] Schumm, S A. Geomorphic thresholds and the complex response of drainage systems[A]. In Morisawa (ed). Fluvial Geomorphology[M]. Binghamton: State University of New York, 1973.
- [8] Roels J M, et al. Modelling soil losses from the ardeche ranglands[J]. Catena, 1984, 16: 375–389.
- [9] Bryan R B, et al. Laboratory experiment on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development[J]. Earth Surface Processes and Landform, 1989, 14: 211–231.
- [10] Williams J R. Sediment Routing for Agricultural Watersheds[J]. Water Resources Bulletin, 1975, 11: 965–974.
- [11] Wolman M G. Changing needs and opportunities in sediment yield[J]. Water Resources Res, 1977, 117: 50–54.
- [12] Walling D E. The sediment delivery problem[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65: 209–237.
- [13] G G Leuven. Rill erosion on arable land in Central Belgium: rates, controls and predictability[J]. Catena Remlingen, 1991, 18: 133–155.
- [14] Rheon J E. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors[M]. Publication 59. Wallingford, England: International Association of Hydrology., 1962. 202–213.
- [15] Murray D, et al. Erosion thresholds and suspended sediment yields, Waipaoa River Basin, New Zealand[J]. Water Resources Res., 2000, 4: 1129–1142.
- [16] Karen P, et al. Spatial variations in the magnitude of the 1993 floods, Raccoon River basin, Iowa[J]. Geomorphology, 1994, 169–182.
- [17] Montgomery D R, Georgiou A F. Channel network source representation using digital elevation models[J]. Water Resources Research, 1993, 29(12): 3925–3934.
- [18] O'callaghan J, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Comput. Vision Graphics Image Process, 1984, 28: 323–344.
- [19] Rinaldo A, Rodriguez-Iturbe I, Rigon R, et al. Marani, Minimum energy and fractal structures of drainage networks[J]. Water Resource. Res, 1992, 28: 2183–2195.
- [20] Ignacio Rodriguez-Iturbe, Marco Marni. Self-organized river basin landscapes: fractal and multifractal characteristics[J]. Water Resource. Res., 30(12): 3531–3539.
- [21] 郭继志. 关于坡度与径流量和冲刷量关系问题的探讨[J]. 黄河建设, 1958, 20: 47–49.
- [22] 罗来兴. 甘肃华亭粮食沟坡面细沟侵蚀量的野外观测及其初步分析结果[J]. 地理学资料, 1958, (2): 111–118.
- [23] 曹银真. 黄土地区梁峁坡的坡地特征与土壤侵蚀[J]. 地理研究, 1983, (3): 19–28.
- [24] 陆中臣, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991. 132–160.
- [25] 陆中臣, 等. 安塞县的侵蚀与地貌演化趋势预测[A]. 黄土高原遥感调查试验研究[C]. 北京: 科学出版社, 1988. 202–201.
- [26] 承继成. 坡地流水作用的分带性[A]. 中国地理学会 1963 年年会论文集(地貌)[C]. 北京: 科学出版社, 1963. 109–116.
- [27] 陈永宗, 等. 黄土高原现代侵蚀与治理[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 106–113, 170–173.
- [28] 尹国康. 地貌过程界限规律的应用意义[J]. 泥沙研究, 1984, (4): 20–27.
- [29] 尹国康. 地貌发育的趋向与变异[J]. 地理学报, 1986, 41, (3): 45–52.
- [30] 陈浩, 等. 坡地影响坡面流、产沙过程的试验研究[A]. 见: 陈永宗. 黄河粗沙区来源及侵蚀产沙机理研究文集[C]. 北京: 气象出版社, 1989. 27–40.

[31] 陈浩,等. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙研究[M]. 北京: 气象出版社,1993.104– 108.

[32] 蔡强国,等. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社,1998.148– 151.

[33] 陈浩,陆中臣,李忠艳,等. 流域产沙中的地理环境要素临界[J]. 中国科学(D 辑),2003,23(10):1005– 1012.

[34] Langbein, W B,Schumm S A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation[J]. Trans. Amer. Geophys. Union., 1958, 39:1076– 1084.

[35] Walling D E, Webb, B W. Erosion and sediment: a global overview, Erosion and sediment yield[C]. Global and Regional,Perspectives,Proceeding of the Exeter Symposium,IAHS Publ.no.236, 1996. 3– 19.

[36] Wolfgang L,et al. A global modeling of the climatic, morphological, and lithological control of river sediment discharges to the oceans, Erosion and sediment yield[C].Global and Regional Perspectives,Proceeding of the Exeter Symposium, IAHS Publ.No.236, 1996. 21– 28.

[37] Dendy F E, Boilton, G C. Sedment yield– runoff– drainage area relationships in the United States[J]. J. Soil Wat. Conserv,1976,32: 264– 266.

[38] Wilson L. Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation[J]. Amer. J. Science. 1971,273:335– 349.

[39] 许炯心. 中国不同自然带的河流过程[M]. 北京: 科学出版社,1997. 95– 110.

[40] 景可. 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. 65– 71.

[41] 顾弼生. 关于黄土高原植树造林的认识[M]. 郑州:黄河水资源研究所,1990. 12– 25.

[42] Michnel church et al.Fluvial Clastic Sediment Yield in Canada:Scaled analysis[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1999,36(8):1267– 1280.

[43] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区的风水两相侵蚀产沙过程[J]. 中国科学(D 辑),2000,30(5):540– 548.

[44] 史念海. 黄土高原及其农林分布地区的变迁[J]. 历史地理,1981,创刊号:1– 10.

[45] 洪业汤. 黄河泥沙的环境地质特征[J]. 中国科学,1990,19(11):1110– 1119.

[46] 唐克丽,等. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京:中国科学技术出版社,1993.

[47] 顾文书. 黄河水沙变化及其影响的综合分析报告[A]. 汪岗,范昭. 黄河水沙变化研究(第一卷)[M]. 郑州:黄河水利出版社,2002. 1– 41.

[48] 张胜利,等. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社,1998.

[49] 熊贵枢,李世明,徐建华,等. 黄河河口镇至龙门区间水沙变化[A]. 汪岗,范昭. 黄河水沙变化研究[M]. (第一卷). 郑州:黄河水利出版社,2002. 74– 127.

[50] 王正秋. 黄土高原造林中几个问题的思考[J]. 中国水土保持,2000,(4):37– 39.

[51] 邹厚远,等. 关于黄土高原植被恢复的生态学依据探讨[J]. 水土保持学报,1995,9(4):1– 4.

[52] 毕慈芬,乔旺林. 沙棘柔性坝在砒砂岩地区沟道治理中的试验[J]. 沙棘,2000,13(1):28– 34.

[53] Zhu Zhihui. A model for estimating net primary productivity of natural vegetation[J]. Chinese Science of Bulletin, 1993,38(22):1913– 1917.

[54] 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1045– 1048.

[55] 唐克丽. 黄土高原生态环境建设关键性问题的研讨[J]. 水土保持通报,1998,13(1):1– 7.

[56] 周金星,陈浩,陆中臣. 封山育林是恢复和重建晋西黄土高原森林植被的重要途径[J]. 中国水土保持科学,2004,(1):34– 44.

[57] 卢金发等. 土地覆被对黄河中游流域泥沙产生的影响[J]. 地理研究,2002,22(5):571– 578.

[58] 王兆印,王光谦,等. 植被—侵蚀动力学的初步探索和应用[J]. 中国科学(D 辑),2003,32(10):1013– 1023.

[59] 王兆印,王光谦,等. 侵蚀地区植被生活动力学模型[J]. 生态学报,2003,23(1):98– 105.

[60] 卡森 M A,柯克拜,M J. 坡面形态与形成过程[M]. 窦葆璋译. 北京:科学出版社,1984.

[61] A N Strahler. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel network[A];Chow, V T(ed). Hand Book of Applied Hydrology[M]. New York: Meg– Yaw – Hill Inc.,1964.

[62] 陈浩,等. 黄河中游环境要素对流域产沙影响的交互作用[J]. 泥沙研究,2004,(2):40– 46.

[63] 左其亭. 干旱半干旱地区植被生态用水计算[J]. 水土保持学报,2003,17(2):35– 42.

[64] 许炯心,张欧阳. 黄河下游游荡段河床调整对于水沙组合的复杂响应[J]. 地理学报,2000,55(3):274– 280.

[65] 杨,等. 皇甫川丘陵沟壑区小流域生态用水实验研究[J]. 自然资源学报,2003,18(5):513– 521.

[66] A N Strahler.Hyosometric(area– altitude) analysis of erosional topography[J]. Bull. Geol. Soc. Amer., 1952, 63:1117 – 1142.