

地貌格局与流域侵蚀产沙过程关系定量分析 ——以黄河中游河龙区间为例

王计平^{1,2}, 黄志霖³, 刘 洋⁴, 许申来⁵, 卫 伟¹, 陈利顶¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国林业科学研究院国家林业局盐碱地研究中心, 北京 100091;

3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091;

4. 盐城工学院环境科学与工程学院, 盐城 224051;

5. 北京清华城市规划设计研究院环境与市政所, 北京 100085)

摘要: 以河龙区间42个流域为对象, 在流域地貌格局信息提取和侵蚀产沙过程特征指标计算及其相互关系分析的基础上, 探讨地貌格局对流域侵蚀产沙过程的影响。结果表明: ① 在河道系统水平, 河流数量、长度等几何特征指标和河流分叉率(Rb_{12})、分级率(Rd_{32})、相邻级别间的河流长度比等形状特征指标与流域侵蚀模数显著相关; ② 在流域系统水平, 坡度粗糙度、相对高差、圆度比、高长比是影响流域侵蚀产沙过程的主要指标, 其中坡度粗糙度是最根本的解释变量; ③ 各地貌格局因子间相互作用复杂, 且对侵蚀过程的影响要强于泥沙输移过程, 其通径分析模型对流域侵蚀模数、输沙模数和泥沙输移比变化的解释度分别为65%、33%和20%。这对正确认识影响流域侵蚀产沙过程的格局因素和建立准确的过程模型, 具有重要参考价值。

关键词: 地貌格局; 过程; 侵蚀产沙; 河龙区间

1 引言

泥沙物质的侵蚀与堆积是塑造地表形态一对相辅相承的矛盾, 侵蚀产沙是这个矛盾的主要方面。正是因为侵蚀过程的存在, 才出现泥沙搬运、输移等过程, 它们都与流域地貌格局有着紧密联系^[1,2]。在长时间尺度, 侵蚀过程强烈影响着地貌景观的发育和演化^[3,4], 而在短时间尺度上, 地貌格局作为土壤侵蚀及泥沙搬运的潜在条件, 时刻影响和改变着侵蚀产沙过程的方向和节律^[5]。地貌格局不仅可以改变水分和养分的迁移与积累过程来影响植被分布^[6], 同时也影响人们土地利用的方式和程度^[7,8]。地表覆被和土地利用变化反过来影响能量交换、侵蚀与堆积、生物循环等土壤生态过程^[9]。流域作为一个由地貌、水系结构和水文动态过程共同组成的多层次综合体, 既是现代地表侵蚀切割状况的指证, 又是影响自然过程和人类活动的重要地域单元^[10]。在流域尺度上探讨地貌格局对侵蚀产沙过程的影响, 对认识土壤侵蚀及泥沙输移过程, 指导区域土地利用和流域水土保持规划, 具

收稿日期: 2012-05-17; 修订日期: 2012-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40925003, 31100514); 林业公益性行业科研专项(201004058); 中国博士后科学基金项目(20100480365)

作者简介: 王计平 (1978-), 男, 山西保德人, 博士, 主要从事景观格局优化与生态过程模拟研究。

E-mail: wjp_gis@163.com

通讯作者: 陈利顶 (1965-), 男, 河南辉县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事景观生态学、土地利用变化的环境效应、水土保持和非点源污染控制研究。E-mail: liding@rcees.ac.cn

有重要理论价值和现实意义。

位于黄河中游上段的河龙区间是我国最强烈的侵蚀产沙中心。由于自然和人文特征的独特性,该地区的水沙问题一直是地球科学领域研究的热点^[11,12],同时又与黄土高原生态恢复与治理重大生态战略密切相关^[13,14]。侵蚀产沙是气候、植被、地形等多种因素在不同时空尺度上相互作用共同耦合的结果。在这一耦合系统中,地貌格局与水土流失存在着相互促进相互制约的复杂关系。地貌格局决定地形势能,并与大气降水共同决定了侵蚀力,植被和作为地貌要素的地表物质则共同决定了抗侵蚀能力^[15]。在一定气候背景下,人类通过对植被和微地貌要素进行合理调控,可将流域内的水土流失率控制在可接受的范围^[16]。目前,土地覆被对土壤侵蚀及水沙运移过程的影响多集中于地块和坡面尺度上^[17-19],由于研究尺度较小,故往往将地貌影响忽略或视其为均值。随着尺度逐渐放大,地貌条件对水沙过程的调控作用更加明显。在黄土丘陵沟壑区,地貌格局影响和决定着流域径流泥沙分配与汇集过程^[20,21],且与植被、土壤水分等水土流失因子关系密切^[22,23]。但由于问题的复杂性,地貌格局对流域泥沙输移影响机制的解释还有待于深化。本文以黄河中游河龙区间42个水文站控制流域为对象,在确定流域地貌空间特征和水土流失过程反应变量的基础上,定量分析地貌格局与流域侵蚀产沙过程的关系,旨在从流域尺度揭示地貌格局对泥沙输移过程的影响因子及其作用机制。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

河龙区间是河口镇至龙门区间段的简称,位于黄河中游区上段, $N35^{\circ}40' \sim 40^{\circ}34'$ 、 $E108^{\circ}02' \sim 112^{\circ}44'$,集水面积为11.2万 km^2 ,占黄河流域面积的14.8% (图1)。河龙区间是黄土高原的主要组成部分,是黄河泥沙尤其是粗沙最主要的来源区。属温带大陆性季风气候,春季短促,多风沙,常干旱;夏季南长北短,湿度大,高温多雨;秋季较短,天气温和;冬季漫长寒冷,干燥少雨。

区间年平均气温在 $3.6 \sim 11.8^{\circ}\text{C}$ 之间,气温由南向北递减,各地高温相差较小,低温相差较大,同一站点气温变化大。据1950-1999年资料统计,区间多年平均年降水量为431.2 mm。南部的黄龙山地区年降水量最大,北部内蒙古风沙区年降水量最小。区间植被条件相对较差,多为人工种植而形成的次生植被和干旱草本植物。河龙区间处在中国地势第二阶梯的尾部,平均海拔1000~2000 m。区间支流纵横,各支流下游及干流河谷海拔一般在600~1000 m。河龙区间是黄土丘陵沟壑地貌单元集中分布的地区,区间内冲沟密布,地形切割支离破碎,地表梁峁纵横,是我国水土流失最为严重的地区,同时也是开展水土流失研究的典型区域。

2.2 研究方法

选取河龙区间42个水文站控制流域,根据水文监测数据可获取性,以1979-1988年为时间序列,基于RUSLE模型估算各流域单元土壤侵蚀模数(EM),同时利用流域水文站

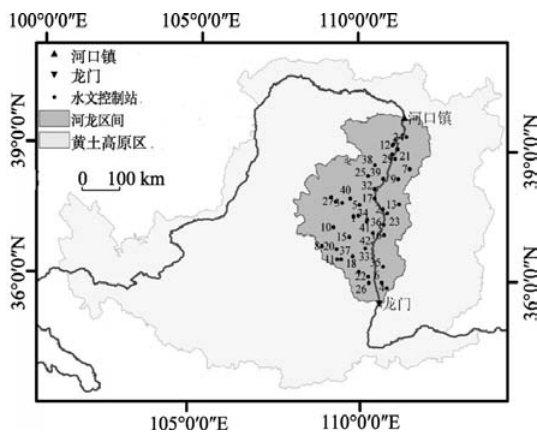


图1 河龙区间地理位置图

Fig. 1 Location of the study area

监测记录确定对应时段内各流域产沙模数 (SM), 计算其泥沙输移比 (SDR); 以DEM为基础数据, 从河道系统和流域系统两方面定量刻画流域地貌格局特征, 运用相关、回归、通经分析等方法, 分析地貌格局对流域侵蚀产沙过程的影响。统计分析软件包括 Minitab 15、SPSS 15+Amos 16。

2.2.1 数据来源 流域地形数据来源于国家基础地理信息数据库, 用于提取坡度坡长因子、水土保持措施因子和流域地貌格局要素; 黄土高原区 1985 年土地利用图, 来源于中国黄土高原地区资源与环境遥感系列图编委会; 1970-1988 年研究区主要水文站和部分雨量站次降雨数据, 通过地球系统科学数据共享平台——黄土高原数据共享运行服务中心申请获得, 用于建立河龙区间降雨侵蚀力简易预测方程, 并以此来计算 1979-1988 年各流域平均降雨侵蚀力; 研究区土壤分布图 (1:500 000) 来源于中国土壤信息系统, 各类土壤机械组成资料通过查询中国土壤数据库和文献资料方式获取, 用于估算土壤可蚀性因子。1979-1988 年径流量、悬移质输沙率等资料, 来源于历年水文统计年鉴。

2.2.2 地貌格局信息提取 采用 Coffman 等^[24]研究成果, 将流域地貌格局指标分为两组: 一组与河道系统相关; 另一组与流域系统相关^[25]。各指标及其概念如表 1。基于 DEM 数据 (25 m×25 m), 在 Arcgis 9.3 环境中提取各指标, 数据处理过程包括数据格式转换、拼接、裁剪、地形和水系信息提取等。流域集水区面积阈值确定通过一个可嵌入 ArcGIS 9.x 软件中的 TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) 模块来完成, 河流水系特征信息提取基于 Hydrology 模块和 Arc Hydro Tools 来实现。河网分级采用 Horton-Strahler 分级系统。

2.2.3 流域侵蚀产沙过程特征指标计算 选取土壤侵蚀模数、输沙模数和泥沙输移比作为表征流域侵蚀产沙过程特征指标。侵蚀模数是指单位时间内给定流域单元土壤侵蚀总量, 单位为 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$; 输沙模数表示给定时段内河流某断面以上单位面积所输移的泥沙总量, 单位为 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$; 泥沙输移比用输沙模数与侵蚀模数的比值来表示, 单位为无量纲, 用于综合反映流域的泥沙输移能力, 以及对上游区土壤侵蚀的响应程度。本文运用 RUSLE 模型来估算各流域单元的土壤侵蚀模数, 模型中各因子提取与计算过程可参见文献^①。其中作物覆盖与管理因子估算以 1985 年黄土高原区土地利用遥感普查数据为基础, 降雨侵蚀力因子估算以 1979-1988 年次降雨数据为基础。降雨侵蚀力用来表征降雨引起土壤发生侵蚀的潜在能力, 是土壤侵蚀最重要的动力因子, 故本文所计算的流域土壤模数用来反映降雨侵蚀力驱动时段内土壤侵蚀平均状况。输沙模数的估算以 1979-1988 年对应流域水文控制站径流泥沙监测记录为基础数据源。对应研究时段内输沙模数与侵蚀模数的比值即为流域泥沙输移比。

3 结果分析

3.1 河道系统格局与流域侵蚀产沙过程的关系

河道系统作为流域地貌格局的基本要素之一, 不仅是土壤侵蚀的对象, 同时也是水沙运移的重要载体。通过河道系统几何指标与流域侵蚀产沙过程变量相关性分析发现 (表 2), 各级河渠数、河渠总数与侵蚀模数和输沙模数呈负相关, 而与泥沙输移比呈正相关关系, 1、2、3 级河渠数、河渠总数与侵蚀模数呈显著负相关 ($P=0.05$, $n=42$)。同时给定

① 王计平. 景观格局对流域侵蚀产沙及泥沙输移过程影响研究. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2010.

表 1 河龙区间流域地貌分类体系

Tab. 1 Classification system for watershed topography in Hekouzhen–Longmen Section

水平	类型	指标	概念及含义	
河道系统	几何特征	给定级别河渠数(N_w)	表示流域内级别为 w 的河流分支总数,单位为 m 。	
		流域河渠总数(N_t)	给定流域内所有 w 级河流的总数量。	
		给定级别河渠长度(L_w)	是给定流域所有 w 级河流的总长度,单位为 m 。	
		流域河渠总长度(L_t)	流域内所有级别河流的长度累加,单位为 m 。	
	地形特征	分叉率(R_b)	低一级河流数与高一级河流数的比,无因次量,也称 Horton 河流数定律。	
		分级率(R_d)	流域内高一级河流与低一级河流数的比值,无因次量。流域中高一级的河流只接受比它低一级河流的来水,常作为降雨径流模型的估计参数。	
		河流长度比(R_w)	w 级河段的平均长度与 $w-1$ 级河段平均长度的比,无因次量。自然河网中该指标通常在 1.5 ~ 3.5 间。	
	流域系统	形状特征	流域长度(L_c)	流域从河源到河口的几何中心轴长,通常用干流长度近似表示,单位为 m 。
			集水面积(A_w)	对给定级别河流分支及所有低于该级别和河流分支的地面径流有贡献的区域在水平面投影的面积之和,单位为 m^2 。
流域周长(L_p)			表示在水平投影图上流域边界或给定级别流域分水岭量的长度,单位为 m 。流域周长与河网结构有关,是水文模拟中重要的参数。	
圆度比(R_c)			w 级流域面积与周长等于该流域周长的圆面积的比值,无因次量。	
伸长比(R_e)			表示与流域面积相同的圆的直径与流域最大长度的比,无因次量。	
形状因数(R_s)			干流长度与流域面积相同的圆的直径之比,无因次量。	
集水区体积(V_w)			集水区面积与集水区平均高程的乘积,单位为 m^3 。	
地形切割深度(H_w)			流域平均高程与流域最低高程的差,单位为 m 。	
形状系数(R_f)		是流域面积与流域长度平方的比,无因次量。		
结构特征		河道维持常数(C)	流域面积与河网内河流总长度的比,单位为 m ,表示维持 1 m 线性河道所需的流域面积,为一般条件下一定长度河道所需要最小流域面积的量度。	
		流域高长比(R_h)	高差和测量高差所用点间距离的比,无因次量,用来衡量流域总坡度。	
		流域相对高差(R_p)	流域高差与周长的比,无因次量。	
	地形粗糙度(R_g)	流域高程的标准差,无因次量。		
	河网密度(D)	流域所有河流总长度与流域面积的比,单位为 m/m^2 ,是河道空间密集程度的量度。		
	河道分支频率(C_f)	单位面积的河流数。		
	高差(H)	流域最高海拔对最低海拔的差,单位为 m 。		
	细度比(S_f)	河道总长度与流域周长的比值,无因次量。		
	结构比(R_t)	流域内等高线最大锯齿数与流域周长的比,无因次量, Coffman 等用流域周长除以 Strahler 河流分支总数来衡量。		
	粗糙数(R_n)	流域高差和河网密度的乘积,无因次量。		
高程变异系数(H_c)	基于流域栅格像元大小,用像元点高程标准差与平均值的比值来衡量,无因次量。			
坡度粗糙度(S_p)	用流域坡度的标准差来衡量。			

级别河渠长度特征指标与流域侵蚀模数和输沙模数的相关关系也呈现相似规律。河道系统河渠几何特征指标与流域泥沙输移比均呈现一定程度的正相关关系, 河渠级序越高且其几何特征越明显, 流域的泥沙输移能力越强。河龙区间大部分流域属于黄土丘陵沟壑地貌, 由于地貌侵蚀和演化的长期作用, 不同流域间水系和沟谷发育程度相差较大。通常, 对新增水土流失最具贡献意义的是那些发生下切侵蚀和溯源侵蚀的沟渠, 由于其河流级序最低, 低精度的DEM数据很难模拟其现实^[26,27]。本文利用河流分叉率、分级率、长度比等地形特征指标刻画河龙区间地形切割和河流分支现状, 分析发现分叉率 Rb_{12} 、分级率 Rd_{32} 和低级序河渠间河流长度比与侵蚀模数呈现出显著负相关关系, 但低级序河渠分叉率的增大更有利于提高流域泥沙输移能力。

3.2 流域系统形态特征与侵蚀产沙过程的关系

通过对42个流域单元各格局因子与侵蚀产沙过程变量进行相关分析(表3), 在流域系统水平上, 流域长度、周长和体积等形状特征指标与侵蚀模数显著负相关, 圆度比与输沙模数、泥沙输移比呈现显著正相关关系, 这说明集水区大小对流域土壤侵蚀的平均水平具有显著影响, 越接近圆形的集水区, 其产沙强度和泥沙输移能力越强。在结构特征指标中, 河道维持常数与输沙模数显著正相关, 表明在观测时段、河渠长度一定条件下, 集水区面积越大, 流域输沙量越大; 相对高差与泥沙输移比显著负相关, 这表明在景观阻力和流域系统泥沙传输能力一定条件下, 随着相对高差的增大, 流域单元的平均侵蚀势能也会随之增大, 因而其泥沙输移比会显著降低; 细度比与泥侵蚀模数显著负相关, 而与泥沙输移比显著正相关, 说明河渠的总长越长且周长越小的集水区, 其泥沙输移性能越高; 结构

表2 河道几何、地形因子与流域侵蚀产沙过程相关性
Tab. 2 Correlation coefficients between pattern factors and erosion-sediment process variables in river system

水平	类型	格局因子	侵蚀模数	输沙模数	泥沙输移比
河道系统	几何特征	河渠总数(Nt)	-0.314*	-0.123	0.121
		1级河渠总数(Nw_1)	-0.314*	-0.123	0.120
		2级河渠总数(Nw_2)	-0.311*	-0.129	0.107
		3级河渠总数(Nw_3)	-0.326*	-0.117	0.150
		4级河渠总数(Nw_4)	-0.274	-0.100	0.101
		5级河渠总数(Nw_5)	-0.341	-0.120	0.153
		流域河渠总长(Lw)	-0.312*	-0.140	0.109
		1级河渠总长(Lt_1)	-0.314*	-0.135	0.120
		2级河渠总长(Lt_2)	-0.309*	-0.139	0.100
		3级河渠总长(Lt_3)	0.316*	-0.152	0.106
	地形特征	4级河渠总长(Lt_4)	-0.270	0.145	0.053
		5级河渠总长(Lt_5)	-0.351*	-0.154	0.134
		流域平均分叉率	0.189	0.092	-0.142
		分叉率 Rb_{12}	-0.313*	-0.114	0.123
		分叉率 Rb_{23}	0.191	0.095	-0.139
		分叉率 Rb_{34}	-0.043	-0.116	0.103
		流域平均分级率	0.213	0.034	-0.188
		分级率 Rd_{21}	0.240	0.040	-0.195
		分级率 Rd_{32}	-0.325*	-0.109	0.151
		分级率 Rd_{43}	0.208	0.145	-0.149
		流域平均河流长度	-0.311*	-0.127	0.106
		河流长度比 Rw_{21}	-0.309*	-0.127	0.102
		河流长度比 Rw_{32}	-0.316*	-0.143	0.111
		河流长度比 Rw_{43}	-0.283	-0.112	0.095

注: * 相关系数在0.05水平上显著; Rb_{12} : 表示一级河渠数与二级河渠数的比值; Rd_{32} : 表示二级河渠数与一级河渠数的比值; Rw_{21} : 表示二级河渠平均长度与一级河渠平均长度的比值, 其他同。

比与侵蚀模数显著负相关,说明地形切割程度是影响流域土壤侵蚀过程的重要因素之一;坡度粗糙度与侵蚀模数呈现明显正相关且达到极显著水平,同时与泥沙输移比呈显著负相关,这说明坡度越粗糙,会增大土壤侵蚀,抑制泥沙输移,从而使得泥沙输移比降低。相比而言,地形粗糙度、河网密度等常用水文参数与流域侵蚀产沙过程反应变量无明显相关性。综合来看,在流域系统水平上,流域长度、周长、体积、圆度比等形状特征因子和河道维持常数、流域相对高差、细度比、结构比、坡度粗糙度等结构特征因子是影响流域侵蚀产沙过程的主要因子。流域是一个由地貌、河渠、水系等景观要素共同组成的多层次

综合体,在河道系统和流域系统水平上,各因子间不仅存在复杂的相互作用,同时在侵蚀力驱动下共同作用于流域水沙过程,因此有必要综合各层次上地貌格局因子相互作用关系来进一步揭示流域尺度上影响流域侵蚀产沙及泥沙输移过程的主导因子。

3.3 影响流域侵蚀产沙及输沙过程变异的地貌格局特征指标

综合河道系统和流域系统两个层次上的格局因子,运用逐步回归法 ($\alpha=0.05$, $n=42$),确定影响流域侵蚀产沙过程的地貌格局因子(表4)。分析表明,坡度粗糙度和相对高差是影响流域侵蚀模数的主要指标;圆度比可影响流域模数变

化,而坡度粗糙度、圆度比和流域高长比共同影响着流域泥沙输移比变化。这表明,在一定研究时段内,对于给定流域,坡面粗糙程度和地形起伏度对流域土壤侵蚀总量的控制起决定性作用,圆度比用来刻画流域基本形状,因而可在一定程度上控制流域径流过程线来影响流域侵蚀产沙及泥沙输移过程。此外,流域高长比刻画了流域的平均坡度的起伏程

表3 流域系统形态结构特征指标与侵蚀产沙过程的相关性
Tab. 3 Correlation coefficients between erosion-sediment process variables and pattern factors in watershed system

水平	类型	格局因子	侵蚀模数	输沙模数	泥沙输移比
流域系统	形状特征	流域长度(L_c)	-0.305*	-0.051	0.207
		集水面积(A_w)	-0.300	-0.121	0.121
		流域周长(L_p)	-0.319*	-0.147	0.093
		圆度比(R_c)	0.101	0.407*	0.310*
		伸长比(R_e)	-0.012	-0.025	0.004
		形状系数(R_f)	-0.031	-0.033	-0.011
		集水区体积(V_w)	-0.303*	-0.129	0.118
		地形切割深度(H_w)	-0.059	-0.103	-0.023
		流域形态因数(R_s)	-0.165	-0.028	-0.028
	结构特征	河道维持常数(C)	0.150	0.446*	0.166
		流域高长比(R_h)	0.125	-0.198	-0.292
		相对高差(R_p)	0.193	-0.157	-0.313*
		地形粗糙度(R_g)	0.056	-0.221	-0.251
		河网密度(D)	-0.185	0.004	0.076
		河道分支频率(C_f)	-0.195	0.007	0.049
		流域总高差(H)	0.038	-0.219	-0.238
		细度比(S_f)	-0.359*	-0.017	0.360*
		结构比(R_t)	-0.311*	-0.077	0.148
		粗糙数(R_n)	-0.066	-0.195	-0.169
		高程变异系数(H_c)	0.112	-0.168	-0.238
		坡度粗糙度(S_p)	0.616**	0.242	-0.388*

注: ** 相关系数在0.001水平上显著; * 相关系数在0.05水平上显著。

表4 影响流域侵蚀产沙过程的主要地貌格局因素
Tab. 4 The dominant geomorphological factors effect on erosion-sediment process variables

过程变量	格局因子(显著性)	R^2
侵蚀模数(EM)	$S_p(0.000)$ 、 $R_p(0.015)$	0.6165
输沙模数(SM)	$R_c(0.037)$	0.4028
泥沙输移比(SDR)	$S_p(0.032)$ 、 $R_c(0.002)$ 、 $R_h(0.007)$	0.8053

度, 对流域泥沙输移性能也具有明显影响。

3.4 地貌格局与流域侵蚀及输沙关系的通径分析

利用通径分析模型来直观表示流域地貌格局因子与侵蚀及泥沙输移强度特征指标间的关系(图2)。从模型拟合效果来看, $\chi^2=10.167$, $RMSEA=0.056$, $GFI=0.929$, 说明该模型具有很高的拟合度, 它可以解释65%的土壤侵蚀模数变化、33%的流域输沙模数变化和20%的泥沙输移比变化。由于河道系统结构因子在整个地貌格局水平上对流域泥沙输移过程特征变化无显著影响, 因此通径分析中观测变量的解释变量均来自流域系统水平上, 由此可见流域系统形态和结构对侵蚀及泥沙输移过程具有影响。从通径分析成果图可看出, 流域系统形态和系统结构因子间具有紧密而复杂的关系。坡度粗糙度(Sp)是最根本的解释变量, 它不仅直接作用于流域土壤侵蚀, 而且通过直接或间接作用流域高长比(Rh)、相对高差(Rp)、圆度比(Rc)等中间变量来影响流域土壤侵蚀特征, 最终影响泥沙输移比变化。

对坡度粗糙度(Sp)进行效果分解(表5), 可发现坡度粗糙度(Sp)通过6条路径来解释泥沙输移比变化, 其作用分解过程为:

间接作用1: $Sp \rightarrow EM \rightarrow SDR$: $0.620 \times (-0.586) = -0.363$

间接作用2: $Sp \rightarrow Rp \rightarrow EM \rightarrow SDR$: $(-0.387) \times (-0.350) \times (-0.586) = -0.079$

间接作用3: $Sp \rightarrow Rp \rightarrow Rc \rightarrow SDR$: $(-0.387) \times (-0.850) \times (0.280) = 0.093$

间接作用4: $Sp \rightarrow Rp \rightarrow Rc \rightarrow EM \rightarrow SDR$: $(-0.387) \times (-0.850) \times (-0.06) \times (-0.586) = 0.012$

间接作用5: $Sp \rightarrow Rh \rightarrow Rc \rightarrow SDR$: $(-0.407) \times (0.500) \times 0.280 = -0.057$

间接作用6: $Sp \rightarrow Rh \rightarrow Rc \rightarrow EM \rightarrow SDR$: $(-0.407) \times (0.500) \times (-0.06) \times (-0.586) = -0.007$

这6种间接作用的总和就是坡度粗糙度对泥沙输移比总作用, 其作用系数为-0.402, 这表明坡度粗糙度每增加1个单位, 泥沙输移比则降低0.402个单位。从解释度来看, 坡度粗糙度最终可解释泥沙输移比变化的16.2%, 占整个模型总解释度的80%以上, 可见, 相对于其他地貌格局因子, 坡度粗糙度是影响流域侵蚀及产沙强度的最主要因子。

从通径分析图可以看出, 地貌格局主导因子的共同作用能够解释流域输沙模数变化的33%, 然而流域输沙模数并没有对泥沙输移比产生直接作用, 原因可能是泥沙输移过程需要通过河道系统来完成, 而在整个地貌格局水平上, 河道系统水平上的各主导因子均被剔除, 故没有对泥沙输移比产生直接作用。但从地貌格局因子对泥沙输移比变化总的解释度来看, 作用系数仅为0.2, 这意味着仍有很大部分泥沙输移过程变异未能解释, 这表明地貌格局并不是影响流域侵蚀产沙和泥沙输移过程的主导格局要素。从对黄河中游河龙区间土地利用格局与流域水土流失过程关系研究发现^[28,29], 土地利用格局可解释侵蚀模数和输沙模数变异的60%, 而地貌格局仅能解释其变化的20%。这表明土地利用格局是影响流域侵蚀产沙过程的最主要因素, 该结果对正确认识影响土壤侵蚀过程的格局因素, 建立准确

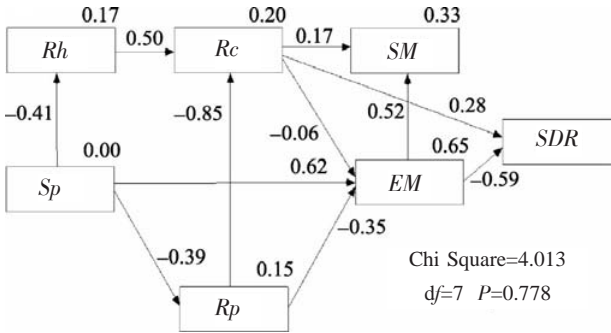


图2 地貌主导格局因子与泥沙输移过程特征指标间关系的通径分析 (n=42)

Fig.2 Path analysis on the relationship between erosion-sediment process variables and geomorphological factors (n=42)

表 5 地貌格局对流域侵蚀产沙过程影响作用分解
Tab.5 Interactions among geomorphological factors and effects of geomorphological pattern
on erosion-sediment process

指标	作用	坡度粗糙度(Sp)	相对高差(Rp)	流域高长比(Rh)	圆度比(Rc)	土壤模数(EM)
相对高差 (Rp)	直接作用	-0.387	0	0	0	0
	间接作用	0	0	0	0	0
	总作用	-0.387	0	0	0	0
流域高长比 (Rh)	直接作用	-0.407	0	0	0	0
	间接作用	0	0	0	0	0
	总作用	-0.407	0	0	0	0
圆度比 (Rc)	直接作用	0	-0.855	0.496	0	0
	间接作用	0.129	0	0	0	0
	总作用	0.129	-0.855	0.496	0	0
土壤模数 (EM)	直接作用	0.620	-0.349	0	-0.063	0
	间接作用	0.127	0.054	-0.031	0	0
	总作用	0.747	-0.294	-0.031	-0.063	0
输沙模数 (SM)	直接作用	0	0	0	0.168	0.521
	间接作用	0.411	-0.297	0.067	-0.033	0
	总作用	0.411	-0.297	0.067	0.135	0.521
泥沙输移比 (SDR)	直接作用	0	0	0	0.276	-0.586
	间接作用	-0.402	-0.063	0.155	0.037	0
	总作用	-0.402	-0.063	0.155	0.313	-0.586

的土壤侵蚀过程模型具有重要参考价值。

4 结论与讨论

在河龙区间黄土丘陵沟壑区，流域地貌格局不仅制约着大气降水的再分配和携沙水流的汇集，而且与土地覆被格局等其他水土流失因子存在着紧密的关系。利用地貌分类体系，从河道和流域系统两个层次选取典型指标量化流域地貌特征，分析地貌格局对流域侵蚀产沙过程的影响。结果表明：

(1) 在河道系统水平，给定级别河流数量、长度及其总量等几何特征指标是影响流域土壤侵蚀强度的主要因子，河流分叉率 Rb_{12} 、分级率 Rd_{32} 及四级河流以下的河流长度比等地形特征因子对土壤侵蚀模数变化具有明显影响。

(2) 在流域系统水平，坡度粗糙度、流域相对高差、圆度比、流域高长比是影响流域侵蚀产沙过程变异的主要因子，其中坡度粗糙度是最根本的解释变量，它不仅直接作用于土壤侵蚀过程，而且通过直接或间接作用流域高长比、相对高差、圆度比等格局要素来影响土壤侵蚀和泥沙输移过程。相比来说，地貌格局对土壤侵蚀的影响较流域输沙过程明显。

(3) 在不同层次上，各流域地貌格局因子间相互作用复杂，通过直接或间接作用影响流域侵蚀产沙过程。基于通径分析所构建的模型最终可解释侵蚀模数变化的65%，输沙模数变化的33%和泥沙输移比变化的20%。侵蚀产沙过程中部分变异未能解释，这与流域土

地利用格局有关。

地貌格局作为景观格局的基础,对流域水土流失过程具有重要影响。目前研究过多关注于地块、坡面尺度上土地利用配置对流域侵蚀产沙过程的影响,而从流域或区域尺度定量探讨地形格局对侵蚀产沙过程影响的研究较少。本文从较大时空尺度以流域为对象探讨景观格局对流域系统侵蚀产沙过程的影响,这对进一步深化理解景观格局与生态过程关系具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] Dabral P P, Baithuri N, Pandey A. Soil erosion assessment in a hilly catchment of North Eastern India using USLE, GIS and remote sensing. *Water Resources Management*, 2008, 22(12): 1783-1798.
- [2] 杨波, 徐勇. 黄土高原坡耕地苜蓿产量及水土流失地形分异模拟——以延安燕沟流域为例. *地理科学进展*, 2010, 29(5): 530-534.
- [3] 信忠保, 许炯心, 马元旭. 黄土高原面积-高程分析及其侵蚀地貌学意义. *山地学报*, 2008, 26(3): 356-363.
- [4] Hancock G R. The impact of depression removal on catchment geomorphology, soil erosion and landscape evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, 33(3): 459-474.
- [5] 郭彦彪, 李占斌, 崔灵周. 模拟降雨条件下地貌发育与侵蚀产沙的关系. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 40-44.
- [6] 吴大千, 刘建, 王伟, 等. 黄河三角洲植被指数与地形要素的多尺度分析. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 237-245.
- [7] 陈利顶, 杨爽, 冯晓明. 土地利用变化的地形梯度特征与空间扩展——以北京市海淀区和延庆县为例. *地理研究*, 2008, 27(6): 1125-1134.
- [8] 卜心国, 王仰麟, 沈春竹, 等. 深圳市地形对土地利用动态的影响. *地理研究*, 2009, 28(4): 1011-1021.
- [9] 张志强, 王盛萍, 孙阁, 等. 黄土高原吕二沟流域侵蚀产沙对土地利用变化的响应. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1607-1612.
- [10] 崔灵周, 李占斌, 郭彦彪, 等. 基于分形信息维数的流域地貌形态与侵蚀产沙关系. *土壤学报*, 2007, 44(2): 197-203.
- [11] 卢金发. 黄河中游流域特性对产沙量与降雨关系影响. *地理学报*, 2000, 55(6): 737-743.
- [12] 冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究. *资源科学*, 2006, 28(1): 93-100.
- [13] 张世杰, 焦菊英, 李林育, 等. 黄河河龙区间河流泥沙对相关重大事件与政策的响应. *地理科学*, 2009, 29(6): 905-910.
- [14] 张晓萍, 张槽, 李锐, 等. 基于DEM的黄河中游植被恢复对年均径流量影响的估计. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1056-1064.
- [15] Molina A, Govers G, Cisneros F et al. Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage on gully beds in a degraded mountain area. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(6): 755-767.
- [16] 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.
- [17] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. *地理学报*, 2002, 57(6): 717-722.
- [18] 许炯心. 无定河流域的人工沉积汇及其对泥沙输移比的影响. *地理研究*, 2010, 29(3): 397-407.
- [19] Wei W, Chen L D, Fu B J et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3/4): 24-258.
- [20] 徐勇, 田均良, 刘普灵, 等. 黄土高原坡耕地水土流失地形分异模拟. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 18-25.
- [21] 罗红, 马友鑫, 刘文俊, 等. 采用最大溯源径流路径法估算RUSLE模型中地形因子探讨. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1185-1189.
- [22] 王盛萍, 张志强, 张建军, 等. 黄土残原沟壑区流域次生植被物种分布的地形响应. *生态学报*, 2010, 30(22): 6102-6112.
- [23] 刘金涛, 冯德程, 陈喜, 等. 山坡地形曲率分布特征及其水文效应分析——真实流域的野外实验及相关分析研究. *水科学进展*, 2011, 22(1): 1-6.
- [24] Coffman D M, Turner A K, Melhorn W N. The WATER System: Computer Programs for Stream Network Analysis. Purdue University Water Resources Research Center, Lafayette, Indiana, 1971.
- [25] Singh V P. *Hydrologic Systems: Rainfall-Runoff Modeling (Volume 1)*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1988.

- [26] 蔡强国, 范昊明. 泥沙输移比影响因子及其关系模型研究现状与评述. 地理科学进展, 2004, 23(5): 1-9.
- [27] 刘学军, 卢华兴, 仁政, . 论DEM地形分析中的尺度问题. 地理研究, 2007, 26(3): 433-442.
- [28] 王计平, 杨磊, 卫伟, 等. 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响(1): 斑块类型水平. 生态学报, 2011, 31(19): 5739-5748.
- [29] 王计平, 杨磊, 卫伟, 等. 黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响(2): 景观水平与多尺度比较. 生态学报, 2011, 31(19): 5531-5541.

Quantitative analysis of the relationship between watershed topography and erosion-sediment processes: A case study of Hekou-Longmen section in middle Yellow River

WANG Jiping^{1,2}, HUANG Zhilin³, LIU Yang⁴, XU Shenlai⁵, WEI Wei¹, CHEN Liding¹

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China;

2. Research Center of Saline and Alkali Land of State Forestry Administration, CAF, Beijing 100091, China;

3. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091;

4. School of Environmental Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology,

Yancheng 224051, Jiangsu, China;

5. Beijing Tsinghua Urban Planning & Design Institute, Department of Environmental Technology, Beijing 100085, China)

Abstract: The patterns of topography and landform, defined as basic landscape elements in watershed, have important impacts on soil erosion processes. In this paper, the watersheds based on 42 hydrological stations, located within the region from Hekouzhen to Longmen (Helong section) in the middle reaches of the Yellow River, were selected as the study area, and the relationship between watershed topography and erosion-sediment processes was analyzed by the correlation and path analysis based on acquisition of topographic features and estimation of soil erosion and sediment yield. The results showed that the number and length of streams and its total number at a given level were the main factors affecting the intensity of soil erosion, and the stream-length ratio, the ratio of bifurcation and stream order have a close relationship with the soil erosion modulus at the river channel level. However, at watershed level, slope roughness (Sp), watershed relative height difference (Rp), roundness ratio (Rc) and watershed valley length ratio (Rh) are the main topographical landscape indices that affect the spatial variation of soil and water loss, among them, slope roughness is the most fundamental and most important explanatory variable of all topographical landscape indices. The complex interaction among the indicators directly or indirectly affects the process of soil erosion and sediment yield. The path analysis model constructed with topographical factors could explain 65% of the variation for soil erosion modulus (EM), 33% of the variation for sediment transport modulus (SM), and 20% of the variation for sediment delivery ratio. These analysis and computation results are helpful to get a better understanding of the importance of topographic patterns and to build more accurate soil erosion process models.

Key words: geomorphology pattern; process; soil erosion and sediment; the Hekou-Longmen section