

黄土高原沟谷密度空间分异特征研究

田 剑^{1,2}, 汤国安¹, 周 毅³, 宋效东¹

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046; 2. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要:以5 m分辨率DEM为信息源,借助样方分析思想,运用数字地形分析方法和克里格插值模型,获得黄土高原全区的沟谷密度分布图。在此基础上,探讨黄土高原沟谷的空间分异特征及影响因素。实验结果表明,黄土高原沟谷密度空间分异明显,沟谷密度在陕北的绥德-米脂一带达到高峰,由北向南递减。以六盘山和吕梁山为界,沟谷密度有三种变化特征,六盘山以西地区,沟谷密度较低且变化平稳,六盘山以东吕梁山以西地区的沟谷密度由北向南呈现梯度显著下降变化,吕梁山以东地区,沟谷密度呈现起伏变化,沟谷密度值分布在1.7~6.4 km/km²范围内。在宏观上,由陇西盆地、鄂尔多斯地台和汾渭裂谷等地质构造控制沟谷空间分布态势;降雨强度因素对沟谷侵蚀作用显著,加剧了沟谷密度空间分异特征;植被条件和地面组成物质呈现由西北向东南变化制约着沟谷发育。土壤侵蚀方面,沟谷密度与输沙模数空间耦合性较强,存在明显的正相关。

关键词:黄土高原;DEM;沟谷密度;空间分异

中图分类号:P931.6 **文章标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2013)05-0622-07

黄土高原千沟万壑的地貌景观,既表现出在形成机理与形态特征上的相似性,又具有显著的区域差异性。对黄土高原沟谷空间分异特征与规律的认识,是黄土高原地貌空间格局的重要研究内容之一^[1-3]。黄土高原的沟谷侵蚀是塑造地表形态的重要侵蚀方式,沟谷密度作为一种反映区域受沟蚀程度的重要的指标,对于揭示该地区的地面破碎程度与地貌发育进程,具有重要的意义。沟谷密度也称沟壑密度,指单位面积内沟谷的总长度,是地形发育阶段、降水量、地势高差、土壤渗透能力和地表抗蚀能力的综合标示值^[4-7]。在地质构造、气候、岩性等因素作用下,沟谷密度在流域尺度下存在空间分异特征,指示着沟谷发育过程^[8,9]。黄土高原的形态特征之一是沟谷纵横,以沟谷密度作为宏观统计指标衡量区域内沟谷分布情况,其沟谷空间变异特征一直是地貌景观、土壤侵蚀研究专题。中国科学院综合考察委员会于七五期间编

制了1:50万黄土高原沟壑密度专题图。陈渭南以地貌要素特征值区域变化,分析黄土梁峁区的土壤侵蚀规律^[10,11]。景可借助沟谷密度研究黄土高原沟谷侵蚀过程^[12]。吴良超等以25 m分辨率的DEM为信息源,完成了陕北地区沟谷密度的提取与制图工作^①。研究中沟谷密度以地形参数在地貌演化、土壤侵蚀研究中发挥着重要的作用。然而,在宏观上系统分析沟谷空间分布特征,及其沟谷发育影响因素空间上控制程度,与土壤侵蚀之间联系等研究稍显不足。基于DEM的数字地形分析方法和遥感技术广泛使用,为大范围、快速计算沟谷密度提供了有效途径^[13-15]。本文以高精度DEM为基本信息源,利用数字地形分析方法提取沟谷密度,总结黄土高原沟谷密度空间分异特征,分析黄土高原沟谷密度影响因素,探讨沟谷密度与土壤侵蚀之间定量的关系,加深黄土高原沟谷空间分异特征的认识。

收稿日期:2012-06-27; **修订日期:**2012-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40930531, 41101365, 41001294)、“资源与环境信息系统国家重点实验室”开放基金项目(92010KF0002SA)资助。

作者简介:田 剑(1982-),男,安徽庐江人,博士研究生,主要从事GIS与数字地形分析。E-mail: tianjian.1999@163.com

通讯作者:汤国安,教授。E-mail: tangguoan@njnu.edu.cn

^① 吴良超.基于DEM的陕北黄土高原沟壑密度提取与空间分异.中国地理学会2004年学术年会暨海峡两岸地理学术研讨会论文摘要集.广州,2004年12月.

1 研究基础

1.1 实验样区

根据李郎平等黄土高原区域范围的研究^[16],确定本次研究范围是太行山以西,日月山、乌鞘岭以东,秦岭以北,毛乌素沙地以南。实验样区的选择按照完整、典型等采样原则,选取114个实验样区,每个实验样区面积不小于100 km²,其中104个样区为研究样本(图1),10个样区是检验样区。实验数据采用国家测绘部门标准化生产的5 m分辨率的DEM,其数据生产采用1:1万地形图数字化内插方式,符合国家测绘行业标准。

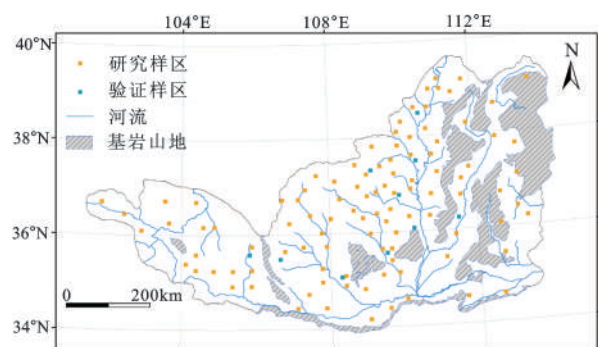


图1 样区分布

Fig.1 Distribution of the test area

1.2 实验方法

沟谷是能量的自然选择,具有随机性特征,本次研究采用样方分析思想,在标准面积内衡量沟谷空间随机分布特征。在沟谷密度提取过程中,基于DEM的黄土地貌沟谷密度已经形成了较为成熟的提取方法^[4,17]。本文以4幅标准图幅拼接形成的DEM为一个样区,采用ArcGIS中水文分析方法提取沟谷网络。实验中,在部分特殊的地貌类型中(如黄土塬区)提取的沟谷网络常常由于出现平行河网而带来较大误差,可采用赵明伟等提出的方法进行纠正^[18]。在沟谷密度计算中,沟谷长度选取基准非常关键,影响着其最终计算结果大小。依据前人研究,选取沟长大于100 m的沟谷,其结果较接近真实沟谷分布特征^[19],故本次实验也采用该计算基准。

鉴于自然地理要素分布规律,本次试验在沟谷密度、植被覆盖、降雨量和输沙模数分析中,选择地统计方法中的克里格插值模型^[20,21]。克里格插值以有限的离散数据为基础,对区域化变量进

行线性最优无偏估计而获得空间上连续分布的数值,并对预测的不确定性进行估计。其主要优点是能得到内插计算中产生的独立误差的估值,且由已知点内插估计样点间相关性,而不是简单的根据数学原理线性内插确定,具有较好的内在关联属性和精确性^[22]。

2 结果与分析

2.1 沟谷密度空间插值及不确定性

采用克里格方法实现沟谷密度的空间插值,主要过程如下:

1) 离散点数据探测分析。以每个样区作为离散点,包括数据分布检验、异常点分析、趋势分析等。使用克里格插值方法前提是数据要服从正态分布,否则要进行变换。数据分布结果显示沟谷密度数据分布显示需采用Log变换满足其要求。同时,克里格方法要求变量满足平稳假设,若变量存在主导趋势,则应采用泛克里格法,并在估值时要去除趋势。根据沟谷密度趋势分析表明,数据在东西和南北两方向上二次变化趋势,故采用泛克里格模型。

2) 确定克里格模型参数。主要包括建立半变异函数模型、确定搜索领域和交叉验证。通过多次参数优选,采用最小二乘法拟合得到最佳半方差理论模型是Spherical模型,并确定邻域搜索点数是12,交叉验证得到模型标准化平均误差为0.000 2,标准化均方根误差为0.924 9,平均标准误差为1.513 9。图2表示交叉验证结果。

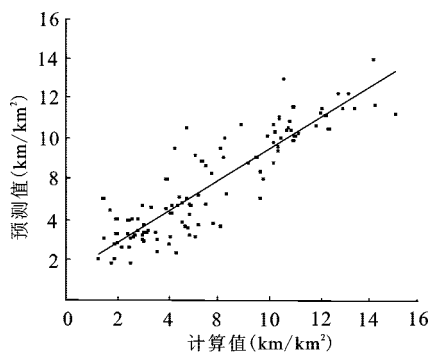


图2 沟谷密度克里格模型误差

Fig.2 Plots of Kriging model error for gully density

3) 插值结果检验。对沟谷密度进行空间插值过程中,需要考虑估计值的不确定性,本次采用验证方法是选择10个未参与内插采样点作为检验

样本,得到表1所示的验证结果。

表1 沟谷密度插值模型验证结果				
Table 1 Interpolation model validation of gully density				
编号	计算值 (km/km ²)	预测值 (km/km ²)	预测 误差	相对误差 (%)
1	7.24	8.38	-1.14	15.75
2	9.78	10.91	-1.13	11.55
3	9.69	8.7	0.99	10.21
4	8.04	9.02	-0.98	12.19
5	4.02	4.08	-0.06	1.49
6	4.7	3.89	0.81	17.23
7	5.9	3.84	2.06	34.91
8	6.38	6.44	-0.06	0.94
9	8.8	8.11	0.69	7.84
10	3.2	3.6	-0.4	12.5

由于黄土高原研究范围大,采样点之间距离影响和地形复杂多变的等原因,导致少量采样点沟谷密度预测误差稍大。从预测精度来看,泛克里格方法在沟谷密度插值中总体表现较好,沟谷密度预测值能够反映沟谷密度在黄土高原分布趋势。由图3可以看出的沟谷密度变化趋势与景可等^[13]制作的沟谷密度等值线趋势相同。陈渭南,景

可等人的研究^[12,13]表明采用1:5万的等高线数据提取较大的冲沟及主沟道,可以得到正确的沟谷密度空间分布趋势。但提取结果的沟谷密度数值偏小,且区分不够明显。原因在于1:5万的等高线数据对原始地形综合程度高,损失了较多地形信息,一定程度上影响沟谷密度计算值。同时,由于采样区在吕梁山等基岩山地周围分布均匀,得到的插值结果受基岩山地影响甚微,只在吕梁山以西、汾河和清水河以东之间地区影响较大。但该地区面积较小,总体上不影响黄土高原总体的沟谷空间分异规律。

2.2 沟谷密度空间分异

由图3可知在黄土高原地区沟谷密度的空间分异明显。其中六盘山以东、吕梁山以西的沟谷密度由北向南方向呈现梯度下降态势。具体表现为绥德、柳林、吴堡和临县一带的沟谷密度大于10.0 km/km²,属于沟谷密度第一梯度。无定河流域的沟谷密度空间变化情况与陈渭南研究^[11]相一致,验证了插值结果的可靠性。区别在于本文得到的沟谷密度稍高,究其原因是本文数据是1:1万的DEM数据,其精度受到提取数据影响小。延长、甘泉、大宁、志丹、延安一带的沟谷密度在(7.0~

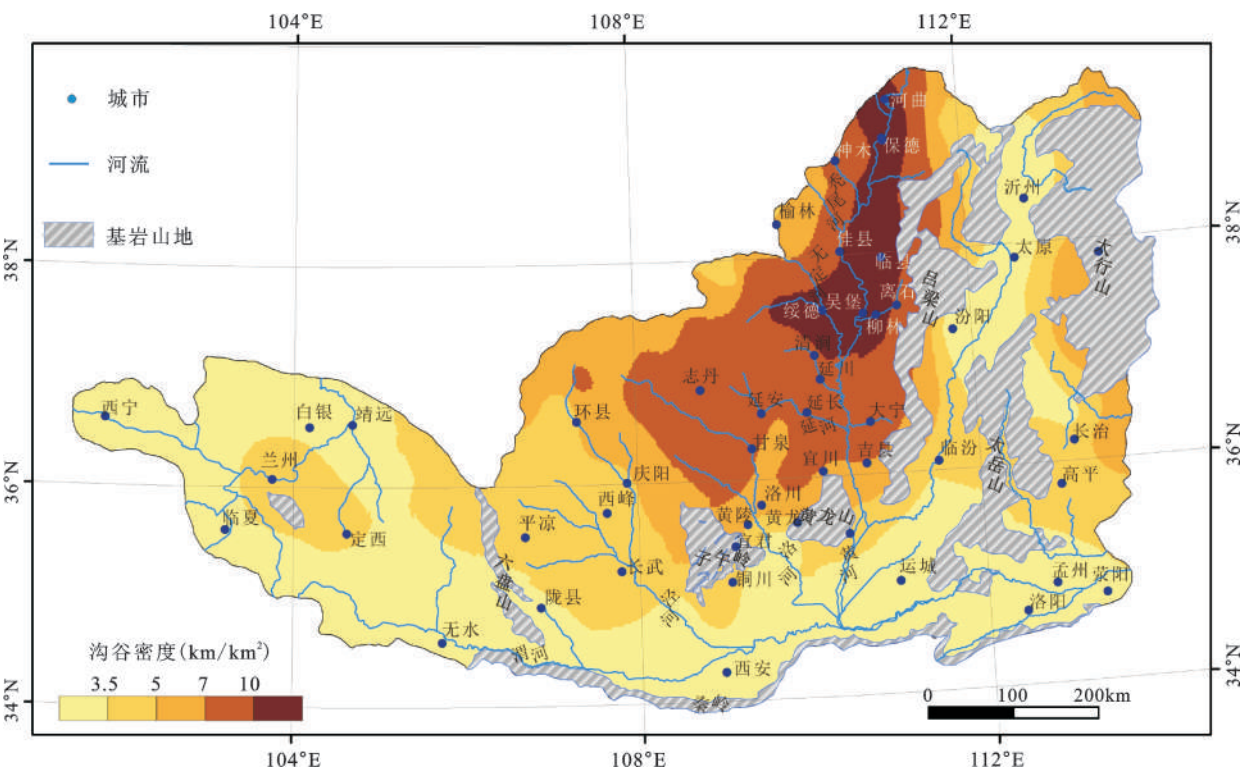


图3 黄土高原沟谷密度空间分布
Fig.3 Gully density map of the Loess Plateau

10.0) km/km^2 之间,处于沟谷密度的第二阶梯,覆盖了洛河、延河和清涧河等流域。西峰、铜川、黄陵和宜川沿线是沟谷密度处于第三阶梯,沟谷密度(5.0~7.0) km/km^2 之间,沿水系方向呈现梯度变化。该地区地貌属于从黄土峁梁、斜梁、残塬向塬区的过渡地带。以六盘山、子午岭、黄龙山和吕梁山为界线的地区处于沟谷密度值阶梯。以上4个阶梯区域在地质构造上均属于鄂尔多斯地台,区域内第四纪黄土覆盖完整、连续,在水蚀的作用下,呈现出复杂多样的地貌景观。

六盘山以西黄土高原地区沟谷密度局部变化平缓,其值分布在(2.0~4.0) km/km^2 范围。在兰州北部一带沟谷密度局部较高,主要为黄土梁、峁等地貌类型。该地区主体是陇西盆地,其第四纪风成黄土堆积很薄,下伏地形控制作用明显,沟谷侵蚀不强烈,沟谷密度也处于较低水平。尽管该地区的黄土分布不甚连续,镶嵌于其中的部分基岩山地影响沟谷密度在该区域的连续内插计算,但仍不影响对其空间分布基本态势。

吕梁山-黄龙山-子午岭以东地区沟谷密度空间变化较明显,其值分布在(1.7~6.4) km/km^2 范围。其中沟谷密度值较高的寿阳,临汾一带的地貌类型是黄土斜梁、黄土峁梁,而沟谷密度较低区域的地貌类型是黄土台塬。从地质构造方面属于汾渭裂谷带,所属黄土地貌类型相对单一,且变化不大;另外,构造形成盆地狭窄,河流两侧很少发育巨大的汇流,使得台塬的切割不强烈,沟谷密度总体不高。

2.3 沟谷密度影响因素

沟谷密度大小受诸多因素的控制,黄土高原上影响沟谷分布主要因素有地质构造、降雨、植被和地面组成物质等。

1) 地质构造。黄土高原的地形发育特征受晚新生代以来的新构造运动控制形成。黄土高原基本上处于以垂直方向差异性运动为主的新构造运动区域内,控制着全高原区的地貌骨架发育过程和发展方向,以及水系的发育。在此基础上形成了现代的黄土高原大区域地貌骨架:自西向东,形成高程的梯级地形面。六盘山以西的地区,在构造上属陇西盆地,黄土分布较广,在第四纪后期以新构造运动上升为主,地面经历强烈侵蚀的历史较短,沟谷密度较小,地貌演化处于缓慢侵蚀向强烈侵蚀发展的过度阶段。六盘山、子午岭之间,

构造上属间山盆地,黄土塬、黄土台塬、黄土残塬分布较广。子午岭以东、吕梁山以西地区构造上书鄂尔多斯台向斜的主体部分,第四纪以来以间歇性上升位置,整体由西北向东南掀斜式抬高和渭河谷地的下沉,侵蚀基准面相对下降,冲沟系统长度和深度增大,在黄河峡谷区域尤为明显。侵蚀基准面的变化也影响着沟谷的坡度和溯源侵蚀速度,控制着黄土沟谷的发育。吕梁山以东地区是在一系列台隆、台凹构造的基础上形成的山盆相间的地貌格局。吕梁山东麓地区属于汾渭强拉张剪切断陷带,盆地两侧为河湖相与黄土交互沉积,发育了6级阶地和两道黄土台塬。晋东中等挤压抬升地块区域内,黄土较薄,地形起伏大,盆岭相间,沟谷发育程度相对较高。在宏观上,黄土高原沟谷密度空间分布受地质构造控制,形成了以六盘山和吕梁山为界限,沟谷密度空间变异规律。

2) 降雨与植被。水蚀是塑造黄土高原地形重要的外力,其降雨数量和强度综合影响着黄土沟谷发育的程度。黄土高原地区受大陆季风气候的影响,年降雨量不大但雨季集中^[19]。黄土高原年降雨量总体差异不大,分布的总趋势是南多北少,东多西少,由东南向西北递减(图4)。沟谷密度超过的7 km/km^2 的地区降雨量400~550 mm,但时间分布不均匀,有70%的降水在7~9月,且黄土高原暴雨中心、暴雨产生径流大,侵蚀能量大,加剧了沟谷的发育进程。六盘山以东子午岭以西的沟谷密度分布在(3.5~7) km/km^2 范围内,区域降水量400~600 mm,总体由东南向西北逐渐减少,年降水量55%集中在7~9月,降水强度西部强于东部,与沟谷密度空间分布耦合。渭河和汾河谷地地区沟谷密度较低,年降雨量500~700 mm,分布较均匀,降雨强度较弱。黄土高原降水强度比降水量对沟谷发育影响更大。

植被是加速或控制沟谷侵蚀的敏感因子,黄土高原的表征植被状况由植被覆盖指标表示,由归一化植被指数计算得到(图4)。以上降雨与植被数据来源于水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室。黄土植被覆盖与降雨量趋势相反,总体由西北向东南方向增加,在吕梁山、子午岭、黄龙山、六盘山等及南部地区植被覆盖度较高,沟谷密度值较低。在沟谷密度较高的无定河、秃尾河、窟野河等流域属于草原区,自然环境脆弱,植被覆盖率低。黄土高原的植被也是地表沟蚀程度差异的影响因素。

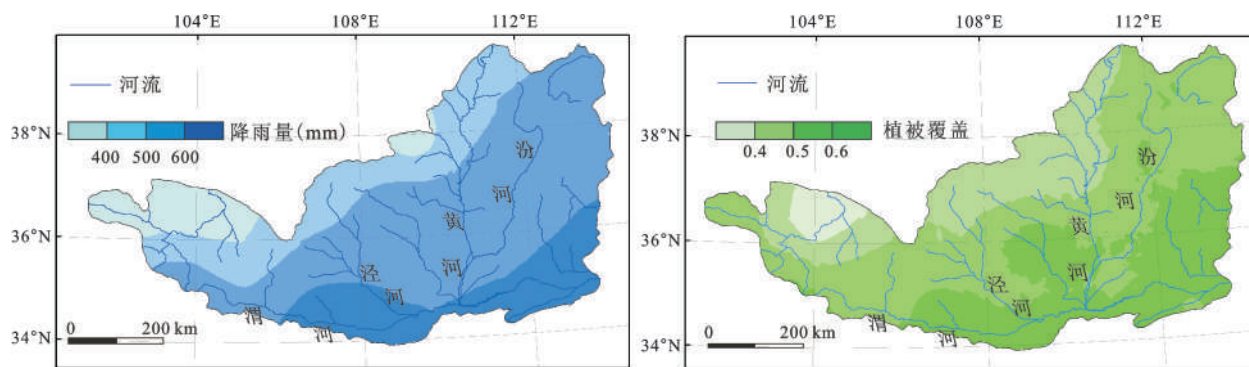


图4 黄土高原降雨与植被覆盖分布

Fig.4 Distribution of precipitation and vegetation cover in the Loess Plateau

3) 地面组成物质。黄土高原地面组成物质的抗蚀性是影响沟谷发育的因素,不同黄土颗粒组成的黄土微结构影响着抗蚀能力。黄土的粒度组成以粉砂为主,结构疏松,极易为水流冲刷,也是黄土高原出现严重侵蚀的原因。黄土颗粒越粗,天然孔隙越小,颗粒间结合力越小,粘滞力越小,稳定性就差,沟谷侵蚀剧烈。北部砂-黄土地带黄土的相对可蚀性为(24.8~27.55)mm/100 mm,中部绥德和延安地区为(9.62~10.80)mm/100 mm,南部细黄土地带为8.87 mm/100 mm。也就是说,砂黄土地带的相对可蚀性最大,细黄土地带最小,中部地区居二者之间^[20]。表明黄土颗粒组成的变化一定程度上影响沟蚀由南向北逐渐加重的变化。

2.4 与土壤侵蚀关系

在黄土高原土壤侵蚀研究中,通常以输沙模数来反映侵蚀产沙的强度。根据水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室提供的黄土高原水文站点侵蚀模数数据,采用克里格方法拟合出黄土高原输沙模数空间分布(图5)。可以看出陇东-陕北-晋西地区输沙强度存在明显的地带性,输沙模数空间有明显的纬向变化。具体表现在高强度侵蚀地区如黄河峡谷、无定河、延河和洛河上游等地,其沟谷密度亦是较高,且变化趋势相同;在经向上侵蚀强弱地区呈现交替分布,由西向东侵蚀强度呈现先递增后减少的变化趋势,其中位于东经109.5°线上,侵蚀强度变化最大,与沟谷密度在经度方向上分布特征基本一致。图6表示104个样区的沟谷密度与输沙模数之间的关系。由图6可知,沟谷密度与输沙模数相关性强,存在明显的正相关,在黄土高原中沟谷密度可作为衡量土壤侵蚀程度的重要参数。

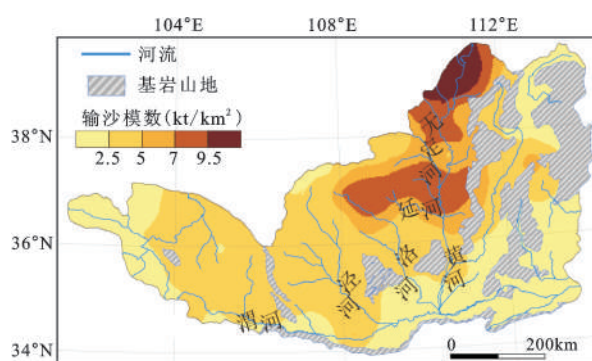


图5 黄土高原输沙模数空间分布

Fig.5 Sediment transport modulus map in the Loess Plateau

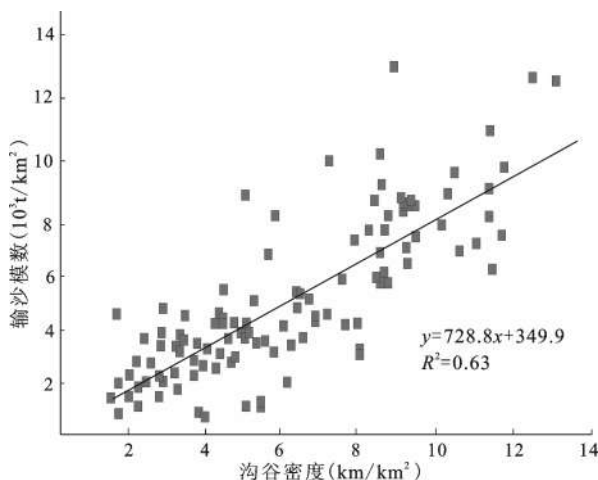


图6 沟谷密度与输沙模数关系

Fig.6 Relationship between gully density and sediment transport modulus

3 结 论

本文依据高精度的DEM数据,借助数字地形分析方法,从宏观角度研究黄土高原的沟谷密度

分异规律,并探讨了沟谷密度与黄土厚度、土壤侵蚀的关系,主要结论如下:

1) 采用样方分析思想和数字地形分析方法,得到104个数据样区的沟谷密度,并以泛克里格插值模型生成可靠、空间连续的沟谷密度预测表面。

2) 沟谷密度在黄土高原上空间分异明显,南北方向上呈现沟谷密度逐渐减少趋势,东西方向在保德、河曲一带沟谷密度最高,向东、西两侧呈现递减的态势;

3) 由陇西盆地、鄂尔多斯地台和汾渭裂谷等地质构造控制了沟谷密度宏观分布,以六盘山、子午岭-黄龙山-吕梁山为界线划分为沟谷密度平稳变化区、梯度剧烈变化区和起伏变化区。植被因素与沟谷密度呈现负相关;降雨强度因素对沟谷发育影响强烈,沟谷密度贡献较大;地面物质组成由西北向东南逐渐变化影响了沟谷密度空间变异特征。

4) 沟谷密度与输沙模数耦合性较强,表现出显著的正相关,因此在黄土高原地区沟谷密度可作为衡量土壤侵蚀强度的重要参数。

参考文献:

- [1] 罗来兴.划分晋西、陕北、陇东黄土区域沟间地与沟谷的地貌类型[J].地理学报,1956,22(03): 201~222.
- [2] 张宗祜.我国黄土高原区域地质地貌特征及现代侵蚀作用[J].地质学报,1981,(4): 308~320.
- [3] 陈永宗.黄河中游黄土丘陵区的沟谷类型[J].地理科学,1984,4(4): 321~327.
- [4] 汤国安,刘学军,闫国年,等.数字高程模型及地学分析的原理与方法[M].北京:科学出版社,2005.
- [5] Cotton C A.The control of drainage density[J].N.Z.J.Geol.Geophys,1964,7(2):348-352.
- [6] Madduma Bandara C M.Drainage density and effective precipitation[J].J.Hydrol.,1974,21(2):187-190.
- [7] Oguchi T.Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure[J].Earth Surf. Processes Landforms,1997,22(2):107-120.
- [8] Tucker G E,Bras R L.Hillslope processes,drainage density and landscape morphology[J].Water Resour.Res,1998,34(10):2751-2764.
- [9] Tucker G E,F Catani.Statistical analysis of drainage density from digital terrain data[J].Geomorphology,2001 36(3-4):187-202.
- [10] 陈渭南.黄土梁峁地区影响黄土侵蚀的地貌条件分析[J].地理科学,1988,8(4):323~329.
- [11] 陈渭南.无定河流域黄土区地貌要素之统计特征及其趋势面与聚类分析[J].干旱区资源与环境,1989,3(4): 21~32.
- [12] 景 可.黄土高原沟谷侵蚀研究[J].地理科学,1986,6(4):340~347.
- [13] 闫国年,钱亚东,陈钟明.黄土丘陵沟壑区沟谷网络自动制图技术研究[J].测绘学报,1998,27(2):131~137.
- [14] 张 婷,汤国安,王 春.黄土丘陵沟壑区地形定量因子的关联性分析[J].地理科学,2005,25(4): 467~472.
- [15] 闫业超,张树文,岳书平.克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析[J].地理科学,2007,27(2): 193~199.
- [16] 李郎平,陆化煜.黄土高原25万年以来粉尘堆积与侵蚀的定律估算[J].地理学报,2010,65(1):37~52.
- [17] 李 俊,汤国安,张 婷,等.利用DEM提取陕北黄土高原沟谷网络的汇流阈值研究[J].水土保持通报,2007,27(2):75~78.
- [18] 赵明伟,汤国安,李发源.黄土塬区DEM水文分析中消除地面伪沟谷的方法[J].中国水土保持,2011,(8):36~38.
- [19] 陈永宗,景 可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1988.
- [20] 石淑芹,陈佑启,李正国,等.基于空间插值分析的指标空间化及吉林省玉米种植区划研究[J].地理科学,2011,31(4):408~411.
- [21] 朱求安,张万昌,赵登忠.基于PRISM和泰森多边形的地形要素日降水量空间插值研究[J].地理科学,2005,25(2):233~238.
- [22] 李晓燕,张树文,王宗明,等.吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局[J].地理学报,2004,59(6):989~997.

Spatial Variation of Gully Density in the Loess Plateau

TIAN Jian^{1,2}, TANG Guo-an¹, ZHOU Yi³, SONG Xiao-dong¹

(1. *Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046, China*; 2. *School of Resources and Environment Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China*; 3. *College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China*)

Abstract: Gully density is used to describe the intensity of regional soil erosion and landform development, which is significant to understand the spatial pattern and formation mechanism of loess landforms by analyzing the spatial distribution. According to the principal of quadrat analysis, this article represent a series of maps revealing the spatial distribution of gully density in the Loess Plateau through digital terrain analysis method and Kriging interpolation model, as well as 5 m×5 m DEM data sets. The spatial variation characteristics of gully in the Loess Plateau were investigated. Moreover, some controlling factors on gully development were explored, and relationship between gully density and soil erosion was revealed. Results showed that the spatial variation feature of gully density was obvious, and gully density reached the peak in region of Suide-Mizhi in northern Shaanxi, then, it decreased from north to south in the Loess Plateau. On the macroscopic, the distribution trend of gully was controlled by geological structure so that it was classified into three parts. To the west of the Liupan Mountains as the first part, its value was low with smooth changes. The second part located in the middle and southern parts of the Loess Plateau to the east of the Liupan Mountains, the west of the Luliang Mountains, and its value decreased in gradient from north to south. To the east of the Luliang Mountains as the third part, its value ranged from 1.7 to 6.4 km/km² with fluctuant change. Rainfall intensity was rather significant for spatial variability of gully erosion, which was coupled with the diversification of gully density in space. In addition, vegetation condition and composition of ground material in the Loess Plateau varied from northwest to southeast, which influenced gully development. Gully density was positively and strongly correlated with the sediment transport modulus in the soil erosion in spatial, especially for regions of the middle Loess Plateau, indicating it is an important factor reflecting the capacity of gully erosion. In conclusion, gully density was significantly indicative on understanding the spatial pattern of loess landform.

Key words: the Loess Plateau; DEM; gully density; spatial variation