

黄土高原典型小流域道路特征及影响因素

曹龙熹, 张科利*, 张卓栋, 张 卫

(地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 通过 GPS 野外实测黄土高原纸坊沟小流域的道路特征, 在 GIS 空间分析等方法支持下研究了流域内各级道路的分布规律。研究表明: 黄土高原道路可分为 4 级, 2 级以下的土路是小流域的代表路型。各级别道路总长度都随级别增大而增加且累计总长度与道路级别线性相关, 道路平均长度和密度则随级别增大而减小。道路网系和流域水系在结构规律上具有一定的相似性。不同级别道路分布范围受地形特征影响不同。爬坡道路坡度与地表坡度之间存在线性回归关系, 且次级道路分布受主路控制; 典型爬坡路在大于 25° 坡度范围内多呈“之”字形弯曲, 随坡度的减小道路弯曲跨度和与等高线夹角增大。研究结果有助于定量模拟黄土高原地区道路分布特征, 并为土壤侵蚀模型中道路影响因子的确定提供参考。

关键词: 黄土高原; 小流域; 道路形态; 地形分析

文章编号: 1000-0585(2008)06-1271-10

1 前言

土壤侵蚀预报模型是开展水土流失定量评价和指导合理土地利用的有效工具。针对不同的使用目的, 国内外学者相继开发了坡面模型、小流域模型和区域水土流失预报模型^[1~5]。土壤侵蚀是自然过程和人类活动共同作用的结果, 由于生产和生活需要, 在一个流域或者区域, 必然存在由一系列道路组成的路网体系。作为一种特殊的土地利用方式, 道路网势必导致流域产流产沙过程变化和水土流失程度加剧^[6]。而在现有的侵蚀预报模型中, 大多都还未系统考虑道路网系对流域产流产沙过程的影响作用^[7]。在不同地貌类型条件下, 道路级别构成及分布特征各不相同, 对产流产沙过程的影响方式也必然存在差异。所以, 定量分析小流域特定地貌条件下道路的分布规律及其与地形等因素间的关系, 对深入认识道路侵蚀规律, 以及为土壤侵蚀模型提供定量参数都有重要意义。

由于道路网系独特的产流产沙规律, 道路侵蚀已引起了许多学者的广泛注意。早在 20 世纪 70 年代初, 国外就开始了有关道路侵蚀方面的研究, 针对森林地区水质恶化问题, 道路水土流失及其对河流泥沙的影响进行了探讨^[8,9]。在分析道路对流域尺度水沙过程影响的研究中, 学者们从不同角度考虑了道路的空间分布特征, 如路网密度、道路坡度分布特征与道路水沙效应的关系^[10], 道路分布高程范围和不同坡面位置道路的水沙运动方式调查^[11]。这些研究对于深刻理解道路侵蚀特点及影响因子, 精确模拟道路水文和泥沙过程从而进行道路侵蚀预报, 进行公路水土流失防治措施评价等方面都具有重要意义。

收稿日期: 2008-03-11; 修订日期: 2008-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40671112)

作者简介: 曹龙熹 (1982-), 男, 河南汝南人, 博士研究生。研究方向为土壤侵蚀与水土资源利用。

E-mail: geoclx@mail.bnu.edu.cn

* 通讯作者: 张科利, 教授, 博士生导师。E-mail: keli@bnu.edu.cn

相对于国外同类研究,我国系统的道路侵蚀研究开展较晚,且主要集中于黄土高原地区。郑世清等对典型小流域道路侵蚀特征及其影响因素进行了分析,结合地形部位对道路的分布特征进行了定性描述^[12],并提出了一些道路防治体系的设计方案及其配套措施^[13,14]。李军超等则对道路防蚀草灌品种的选择和防治效益进行了讨论^[15]。这些工作主要集中于对道路侵蚀现象的分析和相关防护措施的探讨方面,而针对小流域道路分布特征进行的定量研究还不多见。本文以野外实测道路数据和 DEM 高程数据为基础,在地理信息系统空间分析等功能支持下,分析黄土高原小流域内道路的分布特征及其和地形特征的关系。本研究用量化指标表现道路的分布规律,可以更精确地反映道路的特征,为进一步探讨道路对侵蚀影响的水文动力过程、构建模型参数提供依据。

2 研究区概况及研究方法

2.1 研究区概况

研究区纸坊沟流域位于陕西省安塞县,东经 $109^{\circ}13'46'' \sim 109^{\circ}16'03''$,北纬 $36^{\circ}42'42'' \sim 36^{\circ}46'28''$,属于黄土丘陵沟壑区,是延河支流杏子河下游的一级支沟。流域呈南北向狭长形,面积 8.27 km^2 。平均年气温 8.8°C ,平均年降水量为 549.1 mm ,降水年际变化大,且年内分配不均,主要集中在 7~9 月间。年蒸发量大于 1463 mm 。流域海拔变化于 $1425.71 \sim 1041.5\text{ m}$ 之间,平均高程 1200 m ,梁峁顶与沟谷的相对高差多为 $150 \sim 200\text{ m}$,上下游高差 210 m 。流域平均纵比降为 3.7% 。垦殖率高达 28% ,陡坡面积大。大于 15° 的陡坡耕地面积占总耕地面积的 60% 以上。流域地形破碎,沟壑密度为 8.06 km/km^2 ,水土流失严重,多年平均侵蚀模数达 14000 t/km^2 。

2.2 研究方法

2.2.1 数据准备 研究所用 DEM 数据由 1:1 万大比例尺地形图数字化生成,栅格尺寸为 5 m ,坐标系统为高斯-克吕格投影。道路数据通过 GPS 野外实测获得,测量中使用的 GPS 接收机为 Trimble 4600 DGPS,基准站设在流域北部居民区内,为使不同时相的测量数据统一在同一地理参考空间中,每次测量的基准站必须设置在同一位置^[16]。工作人员携带流动站对流域内所有道路进行测量。在测量过程中会存在道路过长和过短的误差,前者主要是人为原因所致,由于测量采用按时间间隔 5 秒的记录方式,工作人员在同一个地点停留 5 秒以上就会出现两个甚至更多的定点,由于各点之间存在定位误差,造成在本该是一个点的地方出现多个位置不同的点,使道路产生错误的曲折而过长。后一种误差主要是卫星信号接收不良导致,当道路位于山谷或受山体遮挡时,卫星信号被山体阻隔而导致该段道路不能定点,使道路被错误的截弯取直而过短。这两种误差都要进行必要的处理以减小其对道路精度的影响。在原始数据转换为 ArcGIS 支持的矢量数据格式之后,要将错误的道路曲折删除,对不能定点的路段要根据实际道路特征进行增补。最后对道路数据进行投影变换,将其与 DEM 数据准确叠加。

2.2.2 分析方法 本研究首先在考虑人类活动规律和对侵蚀的影响方式对黄土高原小流域道路进行分级,然后分别从数量、结构和形态 3 个方面分析道路的空间分布特征。

道路数量特征主要是流域内道路的长度、密度和宽度特征。对这些特征的深入探讨和量化分析可以从宏观尺度上对道路的水沙效应进行估算。各级别道路总长度和平均长度以及分布密度可以通过 GIS 空间量算功能计算获得。道路结构特征包括路网的级别构成、道路的起伏规律和分布范围。这些特征和规律可以为定量分析道路对水沙过程的具体影响

范围提供依据。由于道路网络与河流网络有一定的相似性，可以借鉴 Horton 水道定律分析路网的级别构成。通过计算道路平均分枝比研究道路数量与级别之间的关系。分枝比最初由 Horton 定义为某一级水道的数目与比其高级水道的数目之比，Strahler 在此基础上提出平均水系分枝比，这是一种更合理的水系结构尺度^[17]。道路平均分枝比可以看作代表高级别道路对低级别道路的控制能力。道路的起伏程度由高程标准差描述。道路分布范围的分析分别考虑地形和人类活动因素影响。在 GIS 数字地形分析功能支持下计算正地形和平面曲率参数具体分析道路分布的地形部位。正地形表示地形的起伏方向为上凸^[18]，平面曲率是在地形表面上，用过某点水平面沿水平方向切地形表面所得的曲线在该点的曲率值，也就是每一点所在的地面等高线的弯曲程度^[19]，由于地形的凸凹必然对应等高线的弯曲，这一指标对于考察地形凸凹程度有重要意义，结合表征地形起伏方向的指标即可得到研究区地形的凸凹分布规律。缓冲区分析用来研究道路长度变化特征与人类活动主要场所距离之间的关系。道路形态特征的分析主要从道路坡度与地表坡度的关系、道路的弯曲特征和与等高线之间的夹角等，对这些特征的量化是精确研究道路对水沙过程影响方式的基础。

道路的分布方式决定于特定条件下的人类活动行为模式，在研究区里地形是限制人类活动的主要因素。由于流域南北地形特征差别较大，北部地势陡峭、空间狭小而南部较开阔，为了更好地反映道路特征的差异性，将研究道路从流域主河道分叉处分为南北两部分(图1)分别进行分析。

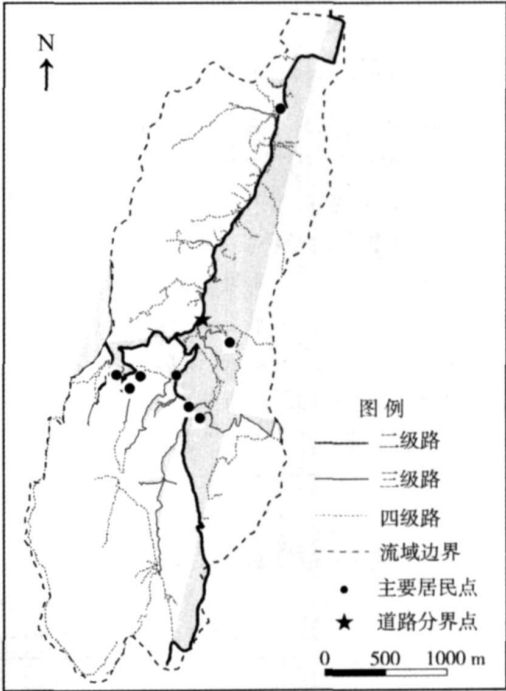


图1 流域道路示意图

Fig 1 Sketch map of roads in the watershed

3 黄土高原道路分级及依据

3.1 道路分级的意义及依据

道路分级是刻画道路运输能力和性质的重要依据，不同级别道路的工程技术要求不同，所产生的环境效应也不相同，对道路进行分级研究对于更准确地揭示其对流域侵蚀影响规律具有重要意义。我国公路根据功能和交通量分为5级，由高到低分别是高速公路、一级公路、二级公路、三级公路和四级公路^[20]。这种分级体系中的道路一般对工程措施要求较高，对大范围环境影响复杂且深远。但由于黄土高原小流域中极少出现上述分类中的高级别道路，所以这种分级并不适用于本研究。小流域道路分级必须以其水沙效应为依据，道路的水沙效应取决于路面特征及其与地形的关系，与道路的使用方式密切相关。

3.2 道路分级及特征描述

我们在考虑研究区道路使用方式的基础上结合野外实测数据，将黄土高原小流域道路分为4级：一级路，指通行所有机动车辆的油路，这是流域内最高级别的道路，路面较

宽,对流域地形改变较大,且由于路面物质的特殊性,对侵蚀产沙过程有着独特的影响。但该级别道路一般沿着较高级别的水系分布,在小流域内并不多见。二级路,指能通行汽车等较大型机动车辆的土石路,这类道路是大多数小流域内的主要道路,宽度小于一级路,对地形改变也较大,路面侵蚀比较严重。三级路,是指仅能通行拖拉机等小型机动车辆的道路,这种道路一般是人们在特定生产需求(如耕种、采石)驱动下形成的,对地形改变程度低于二级路,很多情况下表现出顺从地形的分布特征。四级路,指只能供行人或农具(架子车、犁耙等)通过的道路,路面较窄,基本顺从地形分布,很少改变地形。与大多数黄土高原小流域一样,本研究流域内没有一级路,二级路是贯穿流域的主要道路,三级和四级路基本以二级路为主干分布。

4 小流域道路分布特征

不同级别道路反映的人类活动目的和强度不同,分布特征也各不相同。二级路主要用于较大规模的生产活动和与其他流域之间的联通,贯穿流域南北。三级路一般用于小规模生产活动,主要分布于流域平坦地带。四级路为日常生活道路,在流域内广泛分布。(图1)

4.1 流域道路数量特征

由计算结果可知流域道路总长度为44.55km,路网密度为5.39km/km²。各级别道路的长度和密度统计结果见表1,可以看出,在整个流域范围内道路总长度和密度随级别的增高而减小,道路平均长度则增大。为进一步分析道路长度与级别之间的关系,我们将道路按Strahler水系级别赋值方式对级别进行量化,级别最低的四级路对应的量化级别为1,三级路为2,流域内级别最高的二级路为3。统计分析表明道路累计总长度与道路级别之间存在较好的线性关系:

$$L_u = 9.49u + 16.20 \quad R^2 = 0.9995$$

其中 u 为道路级别, L_u 为 u 级以下所有道路的总长度(km)。

表1 流域各级别道路的长度和密度特征

Tab 1 Length and density of roads in the watershed

道路级别	总长度(km)			平均长度(km)			宽度(m)	密度(km/km ²)
	总计	北部	南部	总计	北部	南部		
二级	9.13	3.34	5.79	3.04	3.34	1.93	4.5	1.10
三级	9.86	1.54	8.32	0.47	0.22	0.59	2.5	1.19
四级	25.57	10.41	15.16	0.34	0.27	0.41	0.5	3.09

道路分布主导因素差异使南北道路长度特征显著不同,地形条件限制,北部的二级路只能沿狭窄的主河道阶地分布,道路长度有限,南部地形条件较好,居民点的分布状况使道路出现分叉(图1),道路总长度增加。北部三级路主要分布于沟底短促的平缓地带,道路总长度和平均长度都明显偏低,南部的三级路长度特征符合流域道路整体的变化趋势。四级路的平均长度在北部由于受地形限制而较短,南部道路的平均长度较北部有显著增加。

4.2 流域道路结构特征

4.2.1 道路级别特征 流域道路的数量呈现出随级别增高而减少的特征,且南北高级别道路数量差别较大,北部少而南部多,与道路总长度的变化特征相同。根据各级别道路的数目计算流域尺度道路的平均分枝比为4.26(表2),与河流水系的平均分枝比(r_b)比较接近(3~5之间)。为了研究南北道路结构的差异,分别对流域北部和南部的道路计算

平均分枝比，结果表明北部道路平均分枝比较南部偏大。道路分枝比反映了高级别道路对低级别道路的控制程度，北部地形陡峭，低级别道路必须以高级别道路为主干。南部地形条件较好，道路分布相对自由。

表 2 道路数量与平均分枝比

Tab 2 Relationships between road number and mean furcation ratio			
	总计	北部	南部*
二级路数量	3	1	3
三级路数量	21	7	14
四级路数量	75	38	37
平均分枝比 (r_b)	4.26	5.67	3.15

* 流域内有一条二级路贯穿南北，在分区统计道路数目时产生了重复计算

根据 Horton 水系定律，水系数量的对数与级别之间存在线性关系： $N_u = a - bu$

其中， N_u 为第 u 级水系数目的常用对数， u 代表水系级别，回归系数 b 为正数并且满足 $b = \log(r_b)$ ， $a = b \times m$ (m 为流域内水系最高级别数)。对道路进行的统计分析表明道路级别与数目之间也满足这一线性关系 (表 3)。

由分析结果可以看出，对整个流域及南北分区道路分析得到的回归方程系数 b 与道路平

表 3 道路数量与级别回归方程
Tab 3 Coefficients of regression equations between road number and road class

方程参数	总计	北部	南部
R^2	0.986	0.998	0.983
a	2.62	2.39	2.15
b	0.70	0.79	0.55
$\log(r_b)$	0.63	0.75	0.50
$3 \times b$	2.10	2.37	1.65

均分枝比的对数 $\log(r_b)$ 比较接近，说明道路网系与水系具有相似的特征。北部道路方程中的 a 则与水系方程的常数项 ($3 \times b$) 十分接近，由图 1 也可以看出北部道路网系与水系的 结构十分相似。

4.2.2 道路起伏特征 通过提取道路对应的 DEM 高程带求取每条道路的高程标准差并计算各级道路的平均高程标准差如表 4 所示，可以看出二级路起伏最大而三级路最小。且高级别的二级和三级路与四级路的起伏特征明显不同，高级别道路在北部的起伏程度较南部偏小，北部的二级路高程标准差为 20.25m，而南部平均值为 39.75m，爬坡上分水岭上的道路高程标准差最大达到 82.46m。北部三级路的平均高程标准差为 3m，最大值为 6.27m，而南部平均值则为 9m，最大值为 40.68m。流域北部沿坡面分布的四级路较多，道路高程标准差最大达到 68.77m，高程标准差大于 10m 的道路占 60% 以上，说明道路起伏较大。而南部四级路分布在高差相对较小的地区，道路高程标准差最大为 41.5m，且有将近 60% 的道路高程标准差小于 10m，说明道路的起伏程度较北部小。

表 4 流域道路高程标准差

Tab 4 Elevation standard deviation of roads in the watershed						
道路级别	总计		北部		南部	
	平均值 (m)	最大值 (m)	平均值 (m)	最大值 (m)	平均值 (m)	最大值 (m)
二	34.87	82.46	20.25	20.25	39.75	82.46
三	7.14	40.68	3.00	6.27	9.00	40.68
四	14.33	68.77	16.48	68.77	12.07	41.50

4 2 3 道路分布范围 道路分布与坡面形态关系密切, 通过 GIS 空间分析对流域进行坡面形态凸凹分区, 在此基础上计算各级道路落在不同坡形区内的长度, 结果如表 5 所示。在流域范围内二级路和三级路分布在凹形坡上的长度略大于在凸形坡的长度, 而四级路则相反, 大部分位于凸形坡上, 在流域北部表现最为明显, 几乎全部的二级路和三级路都沿水系分布于凹形坡而四级路主要在凸形坡上, 这是由于地形条件限制高级别道路不能沿坡面攀爬, 而 4 级路则更为自由。南部的高级别道路大部分位于凸形坡上, 这是由于本区二级路需要爬坡与相邻流域联系, 很多三级路分布在凸起的梯田上。对于北部分布在凸形坡上的四级路对水沙过程影响较大, 结合平面曲率分析道路分布位置发现凸形坡上道路累计长度随平面曲率的增大呈 logistics 曲线增加 (图 2 散点图), 经过计算, 发现平面曲率为 70 处存在拐点, 曲线通过此点之后斜率变小。这是因为本区地形平面曲率很少大于 80, 故此范围内分布的道路长度较短, 道路分布在 65~ 75 分段平面曲率范围内最多, 占总长度的 41. 4% (图 2 柱状图), 可见道路主要分布在平面曲率较大的区域, 其原因有两方面: 平面曲率较大的地形分散水流的能力较强, 地面受水流侵蚀较弱而相对平整, 便于道路的形成和保存; 另一方面由于凸形坡下部坡度较大, 道路易发生弯曲导致总长度较长。

表 5 不同形状坡面上道路长度统计

Tab 5 Road length statistics on slopes of different shapes

坡形	道路级别	总计		北部		南部	
		长度 (km)	百分比 (%)	长度 (km)	百分比 (%)	长度 (km)	百分比 (%)
凸形坡	二	3.98	43.65	0.21	6.15	3.78	65.25
	三	4.77	48.39	0.00	0.00	4.77	57.33
	四	13.69	53.55	5.93	56.93	7.77	51.24
凹形坡	二	5.14	56.35	3.13	93.85	2.01	34.75
	三	5.09	51.61	1.54	100.00	3.55	42.67
	四	11.88	46.45	4.48	43.07	7.39	48.76

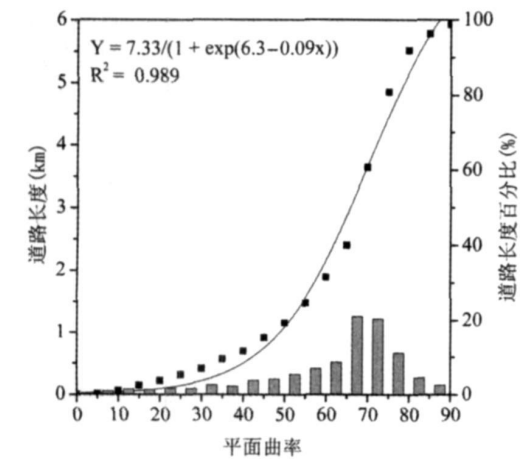


图 2 道路长度与地形平面曲率关系图
Fig. 2 The relationship between road length and plan curvature

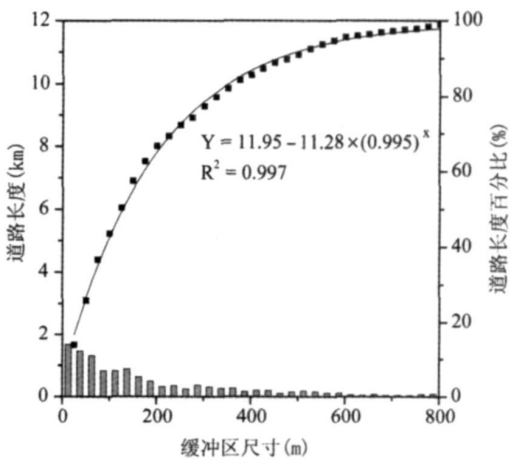


图 3 不同大小缓冲区内道路长度变化
Fig. 3 Road length as a function of buffer zone

道路分布特征与人类行为模式关系密切, 在流域北部, 由于地形狭窄, 人类活动受限较大, 沿沟边分布的主路成为人们活动的主要通道, 低级别道路主要以二级主路为轴向两侧延伸。为了研究道路长度的变化特征和主要分布范围, 在分析中以主路为轴做缓冲区, 从 50m 开始以 25m 为间距向外扩展至 800m 将道路覆盖, 记录每个缓冲区范围内的道路长度, 经分析得出分段缓冲区内的道路长度随距主路距离的增大呈递减特征 (图 3 柱状图), 道路的累计长度则随缓冲区尺寸呈指数函数增加 (图 3 散点图), 在距离主路 400m 范围内道路长度为 10.28km, 占北部道路总长度的 86.5%。

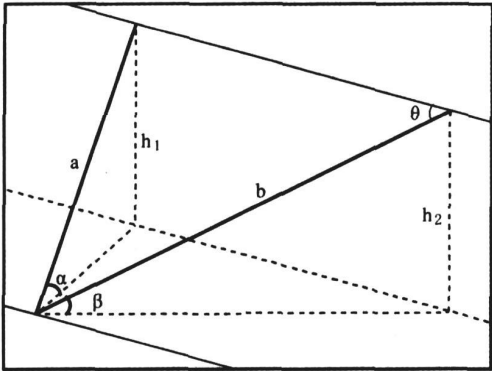
南部道路多表现为以居民点为起点沿等高线延伸的分布特征, 提取经过居民点的等高线作缓冲区以分析道路的分布范围 (由于贯穿流域的主路和沿山脊分布的道路不受居民点控制, 排除在分析范围之外)。结果发现有 13.38km 长的道路分布在等高线两侧 10m 范围内, 占全部道路长度的 65%, 缓冲区范围内道路密度为 8.86km/km², 明显大于流域平均道路密度 5.39 km/km²。

4.3 道路形态特征

4.3.1 道路坡度特征 流域北部道路多受地形限制而爬坡分布, 而南部道路多近似平行于等高线自由分布, 两类道路坡度与地形坡度之间关系不同。分别求取南北每条道路的平均坡度及其对应地表的平均坡度, 计算道路坡度与地表坡度之间的相关系数, 得出北部 46 条道路坡度与地表坡度之间相关系数达到 0.89, 而南部 54 条道路则为 0.64, 说明北部以爬坡为主的道路受地表坡度控制较明显。爬坡分布的道路坡度与地表坡度之间存在如图 4 所示的关系:

$\sin\alpha = h_1/a, \sin\beta = h_2/b$, 由 $b \approx a/\sin\theta, h_1 = h_2$, 得出: $\sin\beta \approx \sin\theta \times \sin\alpha$

即道路坡度和地表坡度的正弦之间存在线性关系, 回归方程的系数近似等于道路与等高线夹角的正弦值。统计分析流域北部以爬坡为主的四级路坡度与对应地表坡度之间的关系, 结果如图 5。



图中两条细实线为等高线, 地表坡度为 α , 道路坡度为 β , a 为等高线间的垂直距离, b 为道路, θ 为道路与等高线之间的夹角

图 4 道路坡度与地表坡度之间几何关系
Fig. 4 Geometric position of both road and ground surface slope

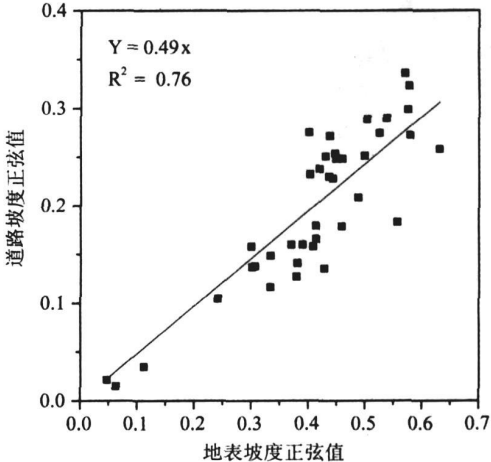
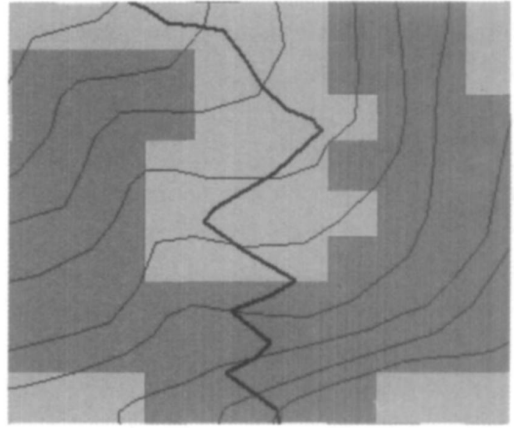


图 5 道路坡度与地表坡度之间回归关系
Fig. 5 The sine value of road slope as a function of ground surface slope

可见北部道路坡度与地表之间存在如图 5 及其推导得出的线性关系, 由回归方程的系数可以估算出道路与等高线夹角的平均值 $\theta = \arcsin(0.49) = 29.3^\circ$ 。

4.3.2 道路弯曲特征 流域内道路受到地形等因素影响会产生弯曲, 爬坡和沿沟分布的道路表现出显著不同的弯曲特征, 通过计算每条道路起点和终点直线距离与道路长度的比值描述道路的弯曲程度, 发现爬坡分布道路平均值为 0.69, 沿沟道路则为 0.89, 爬坡道路的弯曲程度明显高于沿沟道路。北部爬坡分布的四级路在较陡的坡面上会发生“之”字形弯曲, 这种弯曲特征随坡度发生有规律的变化, 通过选取典型弯曲路段进行分析, 得出道路弯曲主要发生在大于 25° 的坡度范围内, 且在 $25^\circ \sim 35^\circ$ 和大于 35° 两个不同坡度范围内的弯曲特征也不同, $25^\circ \sim 35^\circ$ 坡度范围内道路与等高线夹角及道路弯曲跨度相对于大于 35° 坡度范围内较大 (图 6)。通过统计取众数得出的值分别为 36m 和 39.8° , 在大于 35° 坡度范围内这两个指标的值分别为 9m 和 31° 。



(图中粗线为道路, 细线为等高线, 深色区域坡度大于 35° , 较浅色区域坡度为 $25^\circ \sim 35^\circ$)

图 6 不同坡度范围内道路弯曲特征变化

Fig 6 Changes of roads zigzag characteristics with different slopes

5 讨论

流域道路特征对产流产沙有重要影响, 考察道路的分布规律对于正确认识道路和侵蚀的关系有重要意义。流域南北的道路在数量、结构和形态特征上都存在显著的差异, 主要影响因素是流域地形以及在此基础上形成的人类活动规律差异, 北部地形陡峭, 沿主沟形成狭长平坦地带, 人类活动主要集中在平坦条带内的主路上, 以此为轴向两侧坡面扩展且受地形限制而强度逐渐减弱; 南部地势开阔, 平坦地带面积较大, 人类广泛活动在以居民点为中心的面状区域内。这些差异使南北道路各代表一种典型道路特征, 北部代表紧闭地形条件下人类行为受限型的道路 (多为爬坡的四级路), 道路长度短、起伏大且受高级别道路和地表坡度控制显著; 南部代表人类行为自由型的道路, 道路长度大, 起伏小且与地表坡度关系不大。对这两种道路特征进行对比分析有助于更精确地揭示道路分布特征及其控制因素, 增加道路量化特征的可推广性。

6 结论

- (1) 黄土高原道路可以分为 4 个等级。不同等级道路的人类活动方式和对地形的影响程度不同。在典型小流域内很少出现一级油路, 代表性道路为二级及其以下的土路。
- (2) 各级道路总长度随级别增大而增加且累计总长度与道路级别线性相关, 道路平均长度和密度则随级别增大而减小, 道路平均宽度在 $4.5 \sim 0.5\text{m}$ 之间。
- (3) 按我们的道路分级标准, 道路数量与级别之间存在同 Horton 水系定律相似的

定量关系。二级和三级道路起伏程度较四级路小, 主要沿水系分布于凹形坡内; 四级路则多为爬坡道路, 主要分布于凸形坡上地形平面曲率较高的区域内。道路分布受人类行为模式影响显著, 受限型道路以人类活动的主要通道为轴分布, 密集程度向外侧逐渐减小, 道路总长度则呈指数增加趋势; 自由型道路集中分布于居民点所在的高程带内。

(4) 以爬坡为主的受限型道路与地表坡度的关系较密切, 且两者正弦值之间存在线性关系, 由此得出道路与等高线之间平均夹角为 29.3° 。爬坡道路的弯曲程度较大且在坡面上的弯曲特征随坡度而变化, 道路与等高线的夹角以及道路的弯曲跨度都随坡度的减小而增大, 在坡面上的弯曲频率减小, 当坡度减小到 25° 以下时道路基本不再发生弯曲, 与等高线接近垂直。

参考文献:

- [1] Wischmeier W H, Smith, D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agricultural Handbook No. 282. Washington, D. C. USDA, 1965
- [2] Laflen J M, Lwonnard J L, Foster G R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. Journal of Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 34~ 38
- [3] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS: A non-point source pollution model for evaluating agricultural watersheds. Soil and Water Conservation Society, 1989, 44 (2): 168~ 173
- [4] De Roo A P J. The LISEM project: An introduction. Hydrological Processes, 1996, 10: 1021~ 1025
- [5] 史培军, 刘宝元, 张科利. 土壤侵蚀过程与模型研究. 资源科学, 1999, 21(5): 9~ 18
- [6] 姚文波. 硬化地面与黄土高原水土流失. 地理研究, 2007, 26(6): 1097~ 1108
- [7] 徐宪立, 张科利, 刘宪春. 道路侵蚀研究进展. 地理科学进展, 2006, 25(6): 52~ 61
- [8] Duncan S H, Ward J W. The influence of watershed geology and forest roads on the composition of salmon spawning gravel. Northwest Science, 1985, 59(3): 204~ 212
- [9] Fransen P J B, Phillips C J, Fahey B D. Forest road erosion in New Zealand: Overview. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26: 165~ 174
- [10] Ziegler A D, Giambelluca T W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. Journal of Hydrology, 1997, 196(1/4): 204~ 229
- [11] Wemple B C, Swanson F J, Jones J A. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26: 191~ 204
- [12] 郑世清, 周保林, 赵克信. 长武王东沟实验区沟坡道路侵蚀及其防护措施. 水土保持学报, 1994, 8(3): 29~ 35
- [13] 郑世清, 周佩华, 刘元保. 长武王东试验区道路侵蚀及其防治途径. 中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊, 1990, (12): 40~ 44
- [14] 郑世清, 霍建林, 李英. 黄土高原山坡道路侵蚀与防治. 水土保持通报, 2004, 24(1): 46~ 48
- [15] 李军超, 陈一鹏, 李文华. 王东沟沟坡道路生物措施防蚀技术研究. 水土保持通报, 1995, 15(6): 84~ 87
- [16] 游智敏, 伍永秋, 刘宝元. 利用 GPS 进行切沟侵蚀监测研究. 水土保持学报, 2004, 18(5): 91~ 94
- [17] 承继成, 江美球. 流域地貌数学模型. 北京: 科学出版社, 1986
- [18] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005
- [19] 周启鸣, 刘学军. 数字地形分析. 北京: 科学出版社, 2006
- [20] 中华人民共和国交通部. 公路工程技术标准. JTG B01-2003

Road distribution and controlling factors in watershed of the Loess Plateau

CAO Long-xi, ZHANG Ke-li, ZHANG Zhuo-dong, ZHANG Wei

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: An agricultural watershed generally consists of farmland and road networks, of which unpaved roads are a significant land use type in rural watersheds. Road surfaces are quite different from farmland soil in physical properties, compared with farmlands, road surfaces may limit infiltration and increase the rate of sediment yield in watershed. Also, road networks can influence and change hydrologic and geomorphic processes greatly in a watersheds. Hence, roads distribution patterns should be taken into consideration in soil loss prediction models as crucial factors.

In order to explore the spatial distribution characteristics of roads in small watersheds of the Loess Plateau, a field survey was conducted in the small watershed of Zhifanggou located on central Loess Plateau to get roads network data with the aid of GPS in the study. On the basis of field data and DEM of Zhifanggou watershed, GIS spatial analysis and statistical methods were used to analyze road network in view of their quantity, structure and morphology respectively as well as controlling factors. The results showed that roads on Loess Plateau could be classified into 4 types based on their functions and scales. Unpaved roads of classs 2, 3 and 4 are representatives in small watersheds. Total road lengths are linearly related with road classes. Roads network was similar to the stream networks in construction and could be described by Horton laws. Generally, road construction was controlled by landforms and human activities, roads controlled by landforms were distributed along main road and total length changed as exponential function of distance from the main road. Roads that are relatively freely-distributed are mainly in zones of the same elevation with residential zones. Linear relationship exists between the slope gradient sine values of road controlled by landform and that of land surface. Based on which the mean angle between road and contour can be calculated as 29.3°. The microcosmic features of roads were different on surfaces of different slopes. Both the curve span and the angle between road and contour are increased with the decrease of slope gradients. Zigzag rarely happens and roads nearly upright with contours when slope is less than 25°. This study will be helpful in a good understanding of road network characteristics in a watershed and can provide powerful supports to the establishment and application of process-based models which estimate the effects derived from road networks on runoff and soil loss in watersheds.

Key words: Loess Plateau; small watershed; roads pattern; topographical analysis