

公路网系对喀斯特流域水系结构的影响

曹龙熹^{1, 2}, 张科利¹, 孔亚平³, 梁 音¹

(1. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;

2. 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;

3. 交通部科学研究院水上污染损害评估与溢油应急处置技术实验室, 北京 100029)

摘要: 为了定量评价公路对地表水文过程的影响, 选择典型喀斯特流域, 在GIS水文分析功能支持下探讨了公路网系对流域水系结构的改变。研究表明: 公路代表的人类强烈扰动集中分布在水系两侧1 km范围内。叠加路网之后流域内三级以下的低级水系数量和总长度显著增加, 主河道分枝能力和流域平均分枝比增大, 说明路网将增大河道行洪压力, 同时减弱喀斯特流域的溶蚀作用而增强流水侵蚀作用。对于流域单元的统计分析表明, 路面产流强度与子流域水系长度增加量之间存在较好的线性关系。在空间上, 路网增加的水系在流域出口附近的集中程度较高。公路影响抑制喀斯特地下水系的径流调蓄作用, 可能导致洪水期河流洪峰提前并增大洪峰流量, 从而加剧洪灾风险。

关键词: 公路网系; 水系结构; 水文分析; 喀斯特流域

DOI: 10.11821/dlyj201310007

1 引言

公路建设是区域经济发展的重要促进因素。近年来, 中国公路建设事业取得了巨大成就, 建成了世界第二位的高速公路网络体系, 且在今后一段时期内还将呈现出快速发展的势头。但公路建设对区域环境的影响也不容忽视, 其中对流域水资源和水环境的改变, 已成为日益突出的环境问题^[1]。大量研究表明, 公路建设会改变下垫面水文性质^[2], 公路网与河流水系重叠交汇而影响河流水文过程^[3], 公路施工中的工程措施会改变地表和地下径流路径^[4], 所有这些都导致区域水系自然属性以及流域水文特征的改变^[5]。因此, 需要构建合理的方法对公路影响流域水文过程的程度和方式进行评价。

当前对公路建设影响区域水资源和水环境问题进行了大量研究, 但这些研究大多集中于公路建设对水质的影响方面。学者们基于对公路路段水文过程和污染物性质的理解, 构建微观尺度的指标体系并提出相应的评价方法^[6], 或者探讨公路建设导致水土流失问题的发生规律及其防治措施^[7]。部分研究者从地表水文过程角度考虑了公路建设对区域水资源的影响。彭世寿等通过实地野外调查和研究, 分别对岩溶地区和西北干旱地区公路建设影响地表水和地下水运行的方式进行了总结, 并提出了一些治理措施^[4,8]。薛刚监测并分析了

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41101253); 国家重点基础研究发展规划项目 (2011CB403304); 长江委水土保持局资助

作者简介: 曹龙熹 (1982-), 男, 河南汝南人, 助理研究员, 研究方向为土壤侵蚀与水资源利用。

E-mail: lxcao@issas.ac.cn

通讯作者: 张科利 (1962-), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: keli@bnu.edu.cn

高速公路的拦截作用使沿线小流域集水面积和水文特征发生的变化,认为径流经公路排水沟集中排入行洪沟道,将加大对沟道的冲刷^[2]。这些研究对于理解公路影响地表水文过程的机制具有重要意义,但研究方法以定性描述为主,没有提出具有推广意义的公路影响评价方法。本文提出了基于区域环境背景条件和公路特征的水资源影响评价方法,该方法可用于评价公路影响相对程度并进行区域间横向对比,但不能评价公路建设对流域水文过程的实际影响程度^[9]。为了解决上述问题,本文以近年来公路建设发展迅速且生态环境脆弱的西南喀斯特地区为例,选择典型流域分析公路存在对流域水环境的影响。

与普通流域相比,喀斯特地区的流域水文系统表现为独特的二元三维空间结构,即喀斯特地区在水的溶蚀与侵蚀作用下,形成地下与地表两个水系、两个分水岭和两个流域,地下与地上两个流域常呈现复杂的边界不重合关系,但又通过水力联系构成一个密不可分的整体^[10],地表是喀斯特径流中的发生场和分配场,地下则是径流输送场和调蓄场^[11]。因此,在喀斯特流域内公路建设改变地表水文性质,对流域水文过程的影响比普通流域程度更深、范围更广。本文抓住这一特点,基于喀斯特流域内不同级别公路对下垫面水文性质的改变程度,采用GIS水文分析方法探讨公路建设对流域水系结构的影响特征,用水系结构的变化来表征公路在喀斯特流域尺度上对地表和地下径流分配模式的改变程度和空间分布,从而提出一种评价公路影响流域水文特征实际程度的方法。研究结果可为区域水资源评价以及制定交通建设规划提供依据。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况与数据来源

綦江是金沙江的一级支流,位于四川盆地和云贵高原之间的过渡地带。流域面积5924.51 km²,海拔高程200-2200 m,河道总长度2876.21 km,河网密度为0.49 km/km²。綦江流域属于中亚热带季风气候区,年平均气温13-19℃,年平均降雨量1050-1150 mm,雨量集中在5-10月,占全年降水量的80%以上。研究区为峡谷型喀斯特山地区,地貌类型以山地丘陵为主,其中西北部为流域下游,主要以浅切割低山为主,地形较为开阔;流域中上游以深切割岩溶槽谷中低山为主,地形复杂且沟谷密集。地层以侏罗系和三叠系为主,碳酸盐岩覆盖面积为2715 km²,喀斯特地貌广泛发育,平均地下水系密度为62.22 m/km²^[12]。

本文获取了流域内四个级别的公路网数据,包括高速(綦万高速和渝黔高速,分别于2004年和2005年建成通车)公路、国道(210国道)、省道和县级公路(图1)。量算各级公路长度并按照交通部公路路线设计规范为各级别公路宽度赋值如表1所示^[13]。还获取了研究区1:25万比例尺地形数据和河网水系数据,以地形等高线数据生成栅格尺寸为100m的DEM。同时收集了研究区1:20万比例尺地质图和水文地质综合图,在此基础上提取喀斯特水文地质要素。

2.2 评价方法

把公路当作不透水面,分析公路的存在对单位面积内地表产流能力的增大程度,进而借助GIS水文分析功能评价地表产流能力改变对流域水系结构的影响,通过对水系结构指标的定量分析探讨公路建设导致的丘陵山区流域水文和环境变化。

表1 綦江流域公路分布概况

Tab.1 Roads length and density in Qijiang watershed

	高速	国道	省道	县道
总长度(km)	148.5	194.2	76.1	1022
路宽(m)	24.5	21.5	9	6.5

2.2.1 地表产流强度计算 地表径流系数是地表降雨产流能力的衡量指标,也是评价公路对地表产流能力影响程度的关键参数。由于研究区位于喀斯特地区,流域水文过程具有二元性^[14],即流域河网水系汇水包括地表汇水径流和地下渗漏径流两部分,对径流系数的计算结果也因是否包含地下渗漏径流而不同。在该区域已有相关研究中,计算径流系数主要通过流域把口站观测和小区监测两种方法,流域把口站的控制范围一般是一个完整流域,观测得到的径流量包含地表实际产流量和地下径流量;而小区监测法覆盖的范围较小,可以避免地下渗漏径流的汇入,获得的径流系数反映了地表的实际产流能力。本文关注公路建设对地表产流能力的改变,因此小区监测法计算的径流系数更适合。本文采用彭韬等小区监测得到的地表径流系数平均值0.62%进行后续的分析^[15]。该小区所处的土壤和地质等环境条件与研究区相似,小区监测的结果表明喀斯特坡地大量降水通过裂隙以地下径流的形式渗漏,因而地表径流系数偏低,这也是喀斯特坡地有别于其他坡地的重要特征。公路的存在将改变地下水地表水的分配比例,与影响其他地表产流过程相比,公路对喀斯特地表产流过程的改变不仅表现为不透水面的存在减少了土壤入渗,更表现在路面阻断了地下径流的汇流管道,使地下径流转变为地表径流。

由于不同级别的公路宽度不同,对下垫面地表产流能力的影响范围也不相同。在实际分析中需根据DEM的精度确定公路对其所经过DEM栅格产流能力的增强程度,对于公路宽度大于栅格尺寸且栅格被公路完全覆盖的状况,作为不透水面的公路使所经过栅格径流系数增大为1。而对于公路不能完全覆盖的栅格,则要按照公式(1)计算路面对栅格产流能力的增强程度:

$$A = \left(\frac{1}{a} - 1\right) \frac{D}{R} \tag{1}$$

式中: A 为路面产流强度,即路面所经过栅格产流能力增加的倍数; a 为原始地表径流系数; D 为栅格内的道路宽度; R 为栅格分辨率。文中栅格分辨率为100 m,远大于流域内各级公路的宽度,根据公式(1)计算得出各级公路路面产流强度如表2所示。

2.2.2 GIS水文分析 GIS水文分析方法用来基于DEM数据提取研究流域的河网水系。该方法的原理为:首先依据水总是沿斜坡最陡方向流动的原理,确定流域内每一个DEM栅格的水流方向,然后根据水流方向数据追踪累加计算每一个栅格的上游累计流量,再根据上游累计流量数据,设

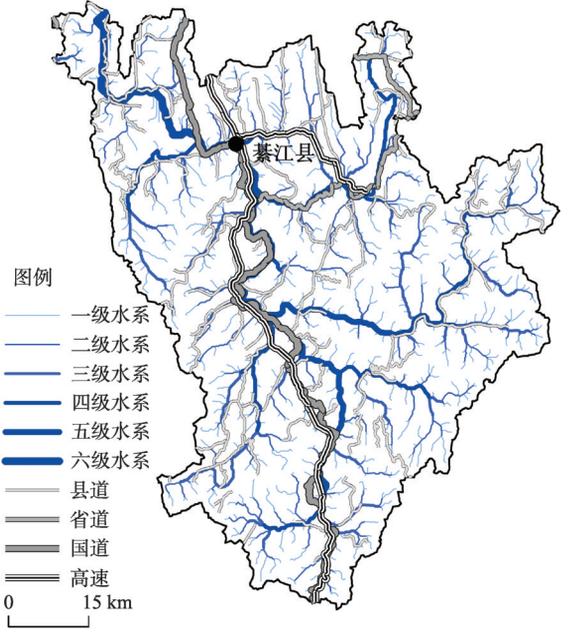


图1 綦江流域公路和水系网络示意图

Fig.1 Road and channel network of Qijiang watershed

表2 不同级别公路路面栅格产流强度
Tab.2 The runoff generation ability for raster cells on different roads

	高速	国道	省道	县道
路面产流强度	39	34	14	10
产流能力权重	40	35	15	11

定合理的阈值确定属于水系的栅格，最后根据水流方向数据，从水系源头开始，将整个水系追索出来^[16]。在 ArcGIS 9.0 中的运算过程如图 2 所示^[17]：



图 2 水系提取流程图

Fig.2 The flow chart of river network extraction

其中填洼处理为消除 DEM 中存在的高程值低于周围的栅格，以保证水流的连续性。产流权重代表地表的产流能力，本研究取原始地表产流能力权重为 1，公路网系导致的栅格产流能力权重为原始权重与相应级别公路的增大倍数之和（表 2）。阈值设定是保证河网提取精度的关键，在研究区 1:25 万水系数据的辅助下反复验证发现，将原始地表累计流量数据的阈值设定为 200 可以得到比较符合实际的河网水系。通过设定相同的阈值提取叠加公路影响权重的河网水系，即可对比分析公路建设导致的水系结构变化特征。

3 结果分析

3.1 公路与水系空间位置关系分析

丘陵山区流域内公路网系的分布受地形因素影响^[18]，而河流水系则是塑造流域地形的重要动力，因而公路网系分布与水系网络之间必然存在联系。路网一旦建成，就会对两侧水系产生持续影响，这种影响的程度和方式与路河位置关系有关，已有研究表明，公路对周边环境的影响集中在两侧一定的范围内^[19]，且与公路级别密切相关，因此，有必要探明不同级别的公路与流域水系之间的空间位置关系，以便深刻理解路网对水系的影响机制。

由图 1 可以看出，在很多路段公路的走向与水系一致（如国道和省道）。为了深入探讨公路分布与水系网络之间的关系，基于 GIS 空间分析功能由水系两侧向外做宽度为 100m 的缓冲区，共生成 10 个连续的缓冲区，覆盖水系两侧 1 km 的范围。将缓冲区与路网叠加，由近及远统计分布在不同缓冲区范围内的各级公路长度和长度累计百分比（图 3）。由图 3，各级公路落在水系两侧不同缓冲区内的长度都随距水系距离的增加而减少，说明公路的分布主要集中在水系两侧。从公路长度累计百分比折线图也可以看出，各级别公路在水系两侧 1 km 范围内的长度都占总长度的 80% 以上，其中高级别的省道、国道和高速在此范围内的长度则超过 90%，有 53% 的国道都分布在水系两侧 200 m 范围内，高速公路和省道分布在这一范围内的长度则分别有 42% 和 44%。导致公路沿水系分布的原因主要是由于沿水系具有开阔的空间，且河流阶地等较为平缓的流水地貌类型也为工程活动提供了便利。在不同级别的公路之间，县道的长度累计百分比曲线明显低于其他公路，说明县道在水系两侧的聚集程度相对较弱，这可能是由于县道施工难度较小，可以在起伏较大的地区分布，因而在水系两侧的聚集特征没有高级别公路明显。不同级别公路分布与水系之间的空间关系决定了公路对河流水文过程的影响特征，一般来说，公路级别越高、距离水系越近对河流水文过程的影响越深刻。以径流泥沙过程为例，高级别公路建设诱发的水土流失较为强烈，而距水系较近的公路泥沙迁移入河的比例也较大^[19]。

3.2 水系结构变化概况

水系级别组成是流域水系结构的基本属性，按照 Strahler 分级方案统计分析路网叠加

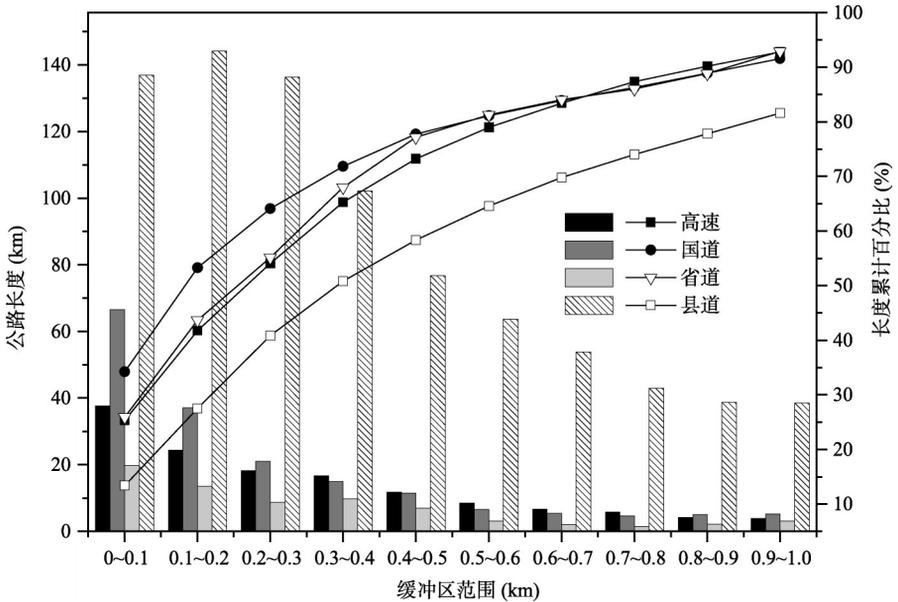


图3 公路分布与距水系距离关系

Fig.3 Relationship between roads distribution and their distance to rivers

注：柱状图为不同缓冲区范围内各级公路长度，折线图为各级公路长度累计百分比

前后的水系级别以及数量和长度变化(表3)。分析表明，公路对下垫面产流能力的改变没有影响流域水系级别数，路网叠加前后都为6级水系，但水系数量和长度发生了显著变化，路网叠加后流域水系数量和总长度都显著增加，而增加量则随水系级别的增大呈幂函数趋势减小(图4)，基本上集中在三级以下的低级别水系中，其中一级水系的数量和长度增加最大。已有研究表明，喀斯特流域一级水系密度比非喀斯特流域偏大^[20]，而本文结果则说明路网进一步增强了这一趋势。大量的第一级水系频度，能使流域内的水量在很短的时间内集中起来^[21]；另一方面，叠加路网后低级别水系的平均长度减小，也说明径流汇入高级水系的径流路径变短，这些变化将缩短汇流时间，增大洪水风险。同时按照 Shreve 水系分级方案对流域水系进行分级，路网叠加前后的水系最高级别分别为 819 和 1160。Shreve 水系分级方案反映了水系交汇的次数，可见路网的增加增加了地表径流的路径，使得水系的复杂性增大。

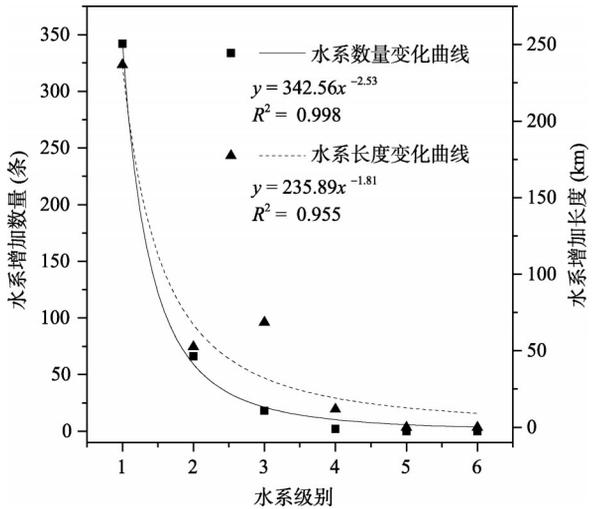


图4 水系增加量与级别之间的关系

Fig.4 Relationship between increased number and stream orders

为了进一步分析路网导致的水系结构变化，本文基于水系数量计算各级水系分枝能力和流域水系平均分枝比^[21]。分析表明各级水系的分枝能力在叠加路网前后存在明显不同，五、六级水系分枝能力增加最为明显，而二、三级水系分枝能力增加较少甚至减小(表

表3 不同级别水系数量和长度变化特征

Tab.3 The change of stream number and length of different orders

水系级别	叠加路网前			叠加路网后			增加量		
	数量 (条)	总长 (km)	平均长 (km)	数量 (条)	总长 (km)	平均长 (km)	数量 (条)	总长 (km)	平均长 (km)
1	827	1436.08	1.74	1169	1672.81	1.43	342	236.72	-0.31
2	193	703.38	3.64	259	755.98	2.92	66	52.60	-0.73
3	43	288.59	6.71	61	357.18	5.86	18	68.59	-0.86
4	13	174.88	13.45	15	186.62	12.44	2	11.74	-1.01
5	4	123.28	30.82	4	123.28	30.82	0	0.00	0.00
6	1	98.72	98.72	1	98.72	98.72	0	0.00	0.00
汇总	1081	2824.93	2.61	1509	3194.59	2.12	428	369.66	-0.50

4), 这是由于低级别水系本身数量增加十分明显, 因而按照表4计算出的分枝能力没有明显增加; 而五、六级水系数量没有增加, 低级别水系数量的增加导致其分枝能力增大。流域内各级水系的分枝能力与级别之间的关系可以用一条半对数直线来表示(图5), 这一结果与以往研究符合^[21], 但路网叠加后直线的斜率变大, 表明了路网叠加之后高级别水系对河网控制能力的增强, 在现实条件下则意味着水系主干道承载的行洪压力增大。

流域水系平均分枝比可以定量描述水系的系统结构。采用Strahler提出的方法计算, 叠加路网之前的平均水系分枝比为4.27, 叠加后为4.44。根据Horton水系定律, 水系的平均分枝比一般在3-5之间, 本文的计算结果在此范围之内。同时, 将本文结果与相同尺度下其他类型喀斯特流域^[22]对比(表5), 由于喀斯特峡谷区切割强烈, 地表水缺乏^[23], 綦江流域的平均水系分枝比较锥状喀斯特地貌类型区典型流域偏小; 而叠加路网之后, 流域平均水系分枝比增大到锥状喀斯特流域的水平, 说明路网的将导致部分地下径流转化为地表径流。水系分枝比越大, 说明支流越多, 河网发育的程度越好, 对于喀斯特流域来说则意味着溶蚀作用相对减弱, 流水侵蚀作用增强^[24]; 另一方面, 由于增加的径流路径主要表现为一级水系, 而第一级水道的比降较大, 往往是泥沙的主要策源地^[21], 可见路网的将加剧流域水土流失风险。事实上, 公路建设等工程活动导致的水土流失已经成为研究区一种重要的水土流失类型。遥感监测结果表明, 研究

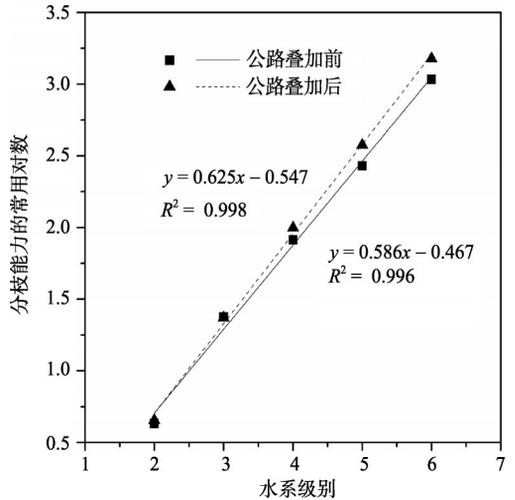


图5 水系分枝能力随级别变化曲线

Fig.5 Relationship between stream furcation ability and stream orders

表4 不同级别水系分枝能力变化程度

Tab.4 The change of stream furcation ability of different orders

分枝能力	计算方法	叠加路网前	叠加路网后
r_{a2}	n_1/n_2	4.28	4.51
r_{a3}	$(n_1+n_2)/n_3$	23.72	23.41
r_{a4}	$(n_1+n_2+n_3)/n_4$	81.77	99.27
r_{a5}	$(n_1+n_2+n_3+n_4)/n_5$	269.00	376.00
r_{a6}	$(n_1+n_2+n_3+n_4+n_5)/n_6$	1080.00	1508.00

表5 綦江流域水系分枝比与其他喀斯特流域对比

Tab.5 Comparison of stream furcation ratio between Qijiang and other karst watersheds

流域	分枝比	喀斯特地貌类型	比例尺
曹渡河	4.40	锥状喀斯特	1:20万
平里河	4.34	锥状喀斯特	1:20万
拉平河	4.43	锥状喀斯特	1:20万
涟江	4.40	锥状喀斯特	1:20万
綦江(叠加路网前)	4.27	峡谷型喀斯特	1:25万
綦江(叠加路网后)	4.44	峡谷型喀斯特	1:25万

区所处的三峡库区重庆段2000-2006年间公路工程侵蚀面积增加了100.37 km², 年侵蚀量增加5.49 × 10⁵ t, 綦万高速公路的建设造成新增水土流失31.12万t^[25], 其中包括工程建设活动对地表扰动和植被破坏等因素, 但公路导致的地表水文特性变化也已经被证明是加剧侵蚀的重要途径^[2,4]。

3.3 水系长度增加量估算

为了定量描述水系长度变化的影响因素并建立相应的估算方程, 将研究区划分为28个子流域, 统计分析每个子流域内的水系变化状况(表6)。分析表明, 所有28个子流域内的河网长度都有增加。同时按照公式(1)累加计算子流域内所有公路栅格的产流强度, 用回归分析方法建立路面产流强度与水系增加长度之间的关系(图6, 圈内数据未参与回归分析)。可以看出, 子流域内水系增加长度与路面产流强度之间存在显著的线性关系。需要指出的是第2和第28号小流域对应的点与总体趋势偏离较大, 第2号子流域位于流域出口处, 地势较为平缓, 公路与干流水系之间有较长的汇水距离, 因而公路对产流能力的增大表现为较多的地表水系长度增加; 第28号子流域位于流域源头, 地势起伏较大, 汇水单元内公路基本沿干流水系分布, 公路增加的产流经过很短的路径即可汇入高级别水系, 因而对水系长度增加不大。

表6 各子流域路面产流强度与水系增加长度

Tab.6 Road surface runoff generation ability and the increased stream length in each sub-watershed

流域编号	长度增加(km)	路面产流强度									
1	28.56	1909.0	8	3.55	181.7	15	9.05	897.0	22	5.23	163.6
2	49.65	2030.0	9	9.62	736.2	16	15.40	671.2	23	18.58	1467.8
3	7.87	457.5	10	12.04	711.5	17	0.00	61.4	24	14.35	457.6
4	9.22	414.3	11	9.91	528.5	18	4.38	527.9	25	32.64	2238.1
5	16.26	608.9	12	8.05	723.2	19	4.53	344.5	26	25.72	1467.5
6	13.46	1092.7	13	10.12	254.7	20	23.78	2223.0	27	4.55	109.6
7	19.72	1091.2	14	0.73	84.7	21	0.65	130.7	28	12.03	1989

3.4 水系变化空间分布状况

公路对水系改变的空间分布状况会影响不同地区径流到达流域出口的时间, 从而影响洪峰流量等水文过程指标; 另一方面, 由于研究区喀斯特地貌广泛发育, 公路影响范围与喀斯特地貌要素之间的空间关系也是影响流域水文过程的重要因素。为了探明流域内公路对河流水系影响的分布区域, 本文计算从流域出口向上游溯源的水流长度(upstream), 该长度体现了径流向流域出口汇流所需的时间。将水流长度按40 km等间距分级, 统计各范围内的水系增加长度、密度和喀斯特水文地质要素(表7), 有40%的水系长度增加都集中在距离流域出口80 km范围内, 在这一范围内的水系增加密度也比较大, 在一定程度上可以说明公路网系增加的地表产流在流域出口附近的集中程度较高, 这在洪水期可能导致

表7 不同空间范围内的水系增加长度和喀斯特水文地质要素

Tab.7 The increased stream length and karst features in different areas of distance from watershed outlet

流域出口距离 (km)	水系增加长度 (km)	水系增加密度 (km/km ²)	溶斗和落水洞数量 (个)	地下河出入口 (个)	碳酸盐岩面积 (km ²)
0~40	39.54	0.085	0	0	0.00
40~80	99.64	0.092	0	0	0.00
80~120	113.76	0.072	7	14	578.89
120~160	80.38	0.041	31	23	1549.11
>160	19.01	0.023	10	9	586.73

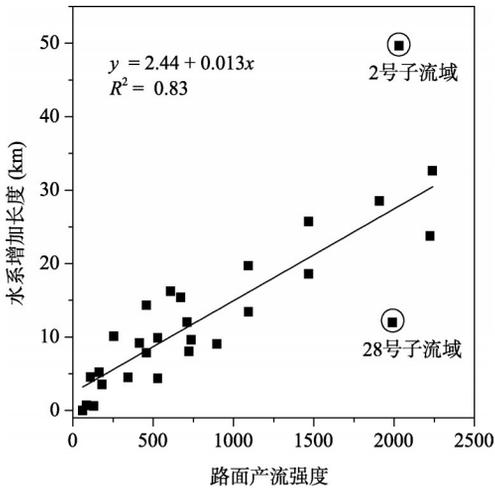


图6 子流域水系增加长度与路面产流强度关系

Fig.6 Increased stream length as a function of road surface runoff generation ability in each sub-watershed

3.72 m。说明该区存在较大的洪灾风险，

而公路等建设项目的影

洪峰提前和流量增加。而在流域中上游，水系增加的总长度占总增加量的60%，区域内碳酸盐岩广泛分布，溶斗、落水洞等喀斯特地下水系管道大量存在，密集分布的地下水系系统可以起到调蓄径流的作用。而公路的存在一方面直接阻断了地下水系的汇流路径，另一方面，公路建设产生的水土流失泥沙也将阻塞地下水系管道，抑制喀斯特地下水系的径流调蓄作用，导致地表径流系数的突变式增加^[15]，再加上綦江流域上、中游是暴雨区，暴雨急骤、强度大，因而易形成灾害性洪水。需要指出，本研究中所涉及的高速公路建成通车的2005年，綦江流域出现了自1998年大水以来的超保证水位最大洪水。綦江控制站五岔水文站6月4日洪峰水位202.00 m（流量3380 m³/s），超警戒水位

而公路等建设项目的影

4 结论与讨论

本文所得主要结论如下：

(1) 流域内不同级别的公路大多集中分布于水系两侧1 km范围内，在此范围内距水系越近公路密度越大，且高级别公路在水系两侧的集中程度比低级别公路明显，说明在研究流域内，公路所代表的人类强烈扰动密集分布在距水系很近的范围里。

(2) 路网的存在使得喀斯特流域内低级别水系数量和总长度显著增加，主河道分枝能力和流域水系平均分枝比增大，将加大主河道行洪压力，同时也将导致喀斯特流域溶蚀作用减弱、地表侵蚀作用增强。

(3) 流域尺度上的空间分析显示，叠加路网后在流域出口附近增加的水系较为密集，可能导致洪水期河流洪峰提前并增大洪峰流量；而在流域中上游，路网抑制喀斯特地下水系径流调蓄作用的可能性较大，也将加剧流域洪灾风险。

(4) 在子流域汇水单元的尺度上，公路路面产流强度与水系增加长度之间存在较好的线性关系，可以用来估算一定区域内路网导致的水系长度和地表径流增加量。

本文探讨了公路网络对喀斯特流域水文系统的影响, 由于流域面积较大, 再加上喀斯特流域边界的开放性和水文过程的复杂性, 研究结果很难用流域把口站水文过程数据进行验证; 另外, 公路对地下径流路径的改变也是一个重要方面, 但由于大范围内详尽的地下水水流路径资料难以获取, 因而尚无法评价公路对地下水系的具体影响范围和程度。今后可选定面积较小的典型喀斯特流域开展实地监测, 分析公路对流域水文过程和水土流失过程的影响。

参考文献(References)

- [1] 孔亚平, 李璐, 张科利, 等. 公路建设对水资源影响评价与保护技术研究评述. 交通标准化, 2007, (9): 39-43.
- [2] 薛刚. 宣大高速公路对阳原县沿线小流域治理的影响. 中国水土保持, 2003, (8): 39-40.
- [3] McCuen R H, Johnson P A, Ragan R M. Highway hydrology. Hydraulic Design Series No. 2, Second Edition. Washington D C: Federal Highway Administration, 2002.
- [4] 彭世寿, 程星, 王青, 等. 岩溶地区公路建设水环境问题及防治对策: 以贵州省为例. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2007, 25(1): 23-26.
- [5] Wemple B C, Jones J A, Grant G E. Channel network extension by logging roads in two basins, western Cascades, Oregon. Water Resources Bulletin, 1996, 32(6): 1195-1207.
- [6] 陈莹. 公路路面径流对水环境影响评价的方法初探. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 2004, 27(1): 34-40.
- [7] 朱颂茜, 林敬兰, 林文莲. 山区高速公路建设对边坡土壤侵蚀的影响初探. 资源科学, 2008, 26(增刊): 54-60.
- [8] 杨云峰, 赵剑强, 董小林, 等. 中国西北地区高速公路建设与水资源保护. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(6): 75-78.
- [9] 曹龙熹, 张科利, 孔亚平, 等. 公路建设对区域水资源影响程度评价方法研究: 以綦江流域为例. 资源科学, 2010, 32(2): 290-295.
- [10] 杨明德, 谭明, 梁虹. 喀斯特流域水文地貌系统. 北京: 地质出版社, 1998. 2-23.
- [11] 石朋, 侯爱冰, 马欣欣, 等. 西南喀斯特流域水循环研究进展. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 69-73.
- [12] 蒲俊兵. 重庆市地下河发育分布的控制机制及水文地球化学区域特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [13] 中华人民共和国交通部. 公路路线设计规范(JTG D20-2006). 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [14] 王在高, 梁虹, 杨明德. 喀斯特流域地貌类型对枯水径流的影响: 以贵州省河流为例. 地理研究, 2002, 21(4): 441-448.
- [15] 彭韬, 王世杰, 张信宝, 等. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报. 地球与环境, 2008, 36(2): 125-129.
- [16] 陈永良, 刘大有, 虞强源. 从DEM中自动提取自然水系. 中国图象图形学报, 2002, 7(1): 91-96.
- [17] 张超, 郑钧, 张尚弘, 等. ArcGis 9.0中基于DEM的水文信息提取方法. 水利水电技术, 2005, 36(11): 1-4.
- [18] 曹龙熹, 张科利, 张卓栋, 等. 黄土高原小流域道路分布特征及其影响因素. 地理研究, 2008, 27(6): 1271-1280.
- [19] Burroughs E R, King J G. Reduction of soil erosion on forest roads, USDA Forest Service General Technical Report INT-264, 1989.
- [20] 梁虹, 杨明德. 喀斯特峰丛洼地(谷地)流域产汇流特性分析. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1992, 10(1): 10-17.
- [21] 承继成, 江美球. 流域地貌数学模型. 北京: 科学出版社, 1986. 10-23.
- [22] 梁虹, 卢娟. 喀斯特流域水系分形、嫡及其地貌意义. 地理科学, 1997, 7(4): 310-315.
- [23] 熊康宁. 锥状喀斯特发育的水文结构与水动力过程: 以贵州安顺地区为例. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1995, 13(2): 14-22.
- [24] 杨太华, 苏维篪, 何凡峰. 黔南曹渡河流域水系的分形分维研究. 贵州科学, 1992, 10(1): 60-66.
- [25] 王海芳, 李仁东, 邱娟. 近6年三峡库区重庆段公路建设动态及其对土壤侵蚀的影响. 中国自然资源学会2011年学术年会论文集(下册). 北京: 中国自然资源学会, 2011. 328-329.

Impact of highway networks on stream structure in a karst watershed

CAO Longxi^{1,2}, ZHANG Keli², KONG Yaping³, LIANG Yin¹

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China. 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. China Academy of Transportation Science, MOC, Pollution Emergency Response and Evaluation Technology Lab, Beijing 100029, China)

Abstract: Highway networks spatially interact with stream networks in mountainous watersheds. The impervious highway surface may increase the runoff generation of underlying surface. Therefore, local hydrological processes and watershed stream network structure may possibly be changed. This research was therefore conducted to evaluate the degree of highway impact on watershed hydrological processes. The Qijiang watershed, located in the conjunction zone of Chongqing city and Guizhou province, was chosen as the research area. GIS hydrological analysis method was used to study how the highway network affects the structure of stream network. The results showed that highway networks were mostly distributed in the area within 1 km along both sides of stream networks. Provincial highway, national highway and expressway, which account for more than 90% of the roads lengths, were gathered in the above mentioned area. The existence of highway network led to remarkably increases in both number and total length of stream networks lower than the 3rd strahler order. Meanwhile, the main stream furcation ability was increased, which implied that highway networks may exacerbate watershed flood discharge pressure. On the other hand, the value of mean furcation ratio meant that highway networks can weaken underground dissolution and strengthened surface runoff erosion of karst watershed. Regression analysis illustrated that there was a good linear relationship between highway surface runoff generation ability and sub-watershed stream length increases. Further spatial analysis showed that the increase of stream length and density was mainly observed in areas close to watershed outlet, suggesting the potential flood risk as a result of the acceleration and enlargement of peak discharge during rainy seasons.

Key words: highway network; stream structure; hydrological analysis; karst watershed