云南省公路水毁时空分布宏观约束机制*

张家明[1]，王志奇[2]，张 勇[2]，徐则民[1]，张德成[1]

（1. 昆明理工大学 建筑工程学院土木系，云南 昆明 650500；2. 云南省公路科学技术研究所，云南 昆明 650000）

摘 要：运用实地调查方法和统计分析方法研究不同影响因子对云南公路水毁时空分布规律的宏观控制机理。研究表明，月降雨量和强降雨日的月分布概率是云南公路水毁时间分布的主控因子，地形地貌、水系、植被盖度、多尺度构造、地层岩性和新构造应力场使云南公路水毁广泛分布但又相对集中，中(间)尺度天气系统才是约束云南公路水毁空间分布的主要天气系统。

关键词：云南；公路水毁；自然地理；地质构造；天气系统

中图分类号：U418.5 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－811X(2011)03－0035－06

云南地处欧亚板块、印度洋板块和太平洋板块的结合部位。公路作为带状建筑贯穿于多尺度复杂脆弱地质环境中，其水毁时空分布规律的耦合约束机制是复杂的，整个耦合系统自组织演化，非线性发展导致系统混沌诱发公路水毁。

吕德寿[1]和周富春[2]应用 Scheidegger 法分别研究川西地区和凉山地区新构造应力场对公路水毁的约束效应。艾南山[3]用 Scheidegger 的对抗性原理和构造设计原理讨论了新构造应力场对公路水毁的影响。陈洪凯[4]讨论了大地构造、地层岩性和地质构造对四川公路水毁约束机制。方向池[5]简要阐述了云南公路水毁与地形地貌、岩土性质、大地构造、地质构造和新构造应力场的关系。张林洪[6]分析了水对公路工程的危害。公路建设工程地质灾害危险评估工作事关人民生命财产安全和公路运营安全，也是项目审批的重要依据[7]，而掌握地区公路水毁宏观约束机制对公路建设工程地质灾害危险评估具有重要意义。因此，本文系统阐述降雨量、自然地理环境、地质环境和天气系统对云南公路水毁时空分布规律的宏观约束机制。

1 公路水毁发生的时间约束

1.1 月际降雨量约束

云南省每年约有 90% 的公路水毁发生在 5－10 月，其中 6－8 月最为频繁，7 月是公路水毁的高发期。降雨是公路水毁的激发条件。图 1 给出云南省各地区月降雨量变化关系图。从图 1 可以看出，1－4 月各地区月降雨量总体呈缓慢增加趋势，最大值是腾冲地区 72.1 mm 的降雨量；4－7 月各地区月降雨量迅速增加，7 月最大值是临沧地区 329.2 mm 的降雨量，最小值是德钦一带 118.5 mm 的降雨量；7－12 月各地区月降雨量匀速减小，最大值是临沧地区 20.7 mm 的降雨量。可见，1－4 月和 11－12 月云南省各地区月降雨量都在 100 mm 以下，5－10 月降雨量以 7 月份为界呈正对称分布。综上分析，云南省各地区月降雨量与公路水毁月发生概率呈吻合关系，降雨量大的月份其公路水毁发生的概率也越大，说明月降雨量对公路水毁时间分布的约束效应是显著的。

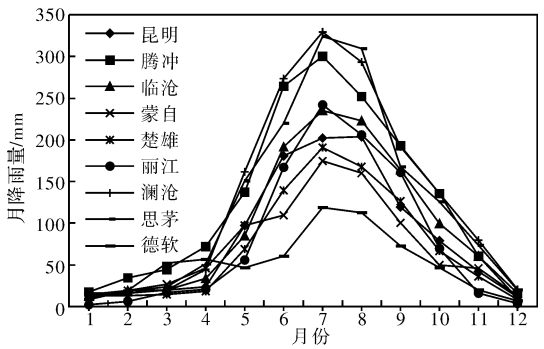


图 1 云南省各地区月降雨量变化关系

* 收稿日期：2010－08－04
基金项目：国家自然科学基金项目(40572159，40772189)；教育部高等学校博士点基金项目(20060674009)；地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(GZ2009－10)
作者简介：张家明(1984－)，男，云南泸西人，博士生，主要从事山区公路地质灾害与防范研究. E-mail:zjm_engeo@163.com

1.2 强降雨事件响应

降雨型滑坡预报理论常采用降雨阈值方法，即采用各种形式的降雨量或其变异形式作为斜坡滑动判据。目前常用降雨阈值主要有 *ID*、*MAP*、*ED* 和 *EI* 四种类型。滑坡是公路水毁中破坏最强，造成损失最严重的灾种，容易诱发其他公路水毁，故本节以强降雨日的月出现概率讨论公路水毁时间分布约束机制。

云南 1959－2005 年 125 个测站雨量资料显示（图 2），中雨以上强降雨日主要出现在 7 月，8 月、6 月次之，干雨季区分显著。雨季（5－10 月）的中雨日占全年中雨日数的 84%，干季占 16%；雨季的大雨日占全年大雨日数的 90%，干季占 10%；雨季的暴雨日占全年暴雨日数的 94%，干季占 6%；雨季的大暴雨日占全年大暴雨日数的 99%，干季占 1%。其中 6－8 月各级强降雨日分别占全年各级强降雨日数的 53%、61%、67% 和 75%，随着降雨量级增大，季节性越强，集中程度越高。综上分析：云南省公路水毁月发生概率与强降雨日的月分布概率吻合程度较高，强降雨日发生概率越大的月份，其公路水毁发生的概率越大，说明强降雨事件同样是约束公路水毁发生的主控因子。

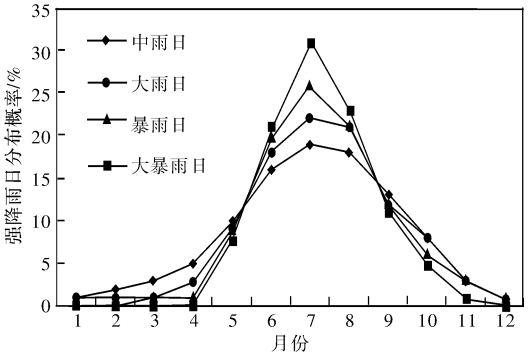


图 2 云南强降雨日月比例分布[8]

2 公路水毁发生的空间约束

2.1 自然地理环境约束机制

云南西部地区公路水毁分布密度较东部地区大，北部地区较南部地区大，滇西北最大，滇东南最小。公路水毁分布广泛但又相对集中，主要集中在滇东高原边缘和滇西横断山区河谷地带，地理位置主要在哀牢山－无量山、巧家－东川和中甸－丽江－大理带状区域。

2.1.1 多序次地形地貌

云南地势总体呈西北高、东南低的格局。北部、南部和西南部海拔分别在 3 000～4 000 m、1 500～2 000 m 和 800～1 000 m 之间。海拔和高差为滑坡发育提供势能条件。调查发现滑坡主要分布在 1200～3600 m 和 4 000～5 000 m 两个海拔梯度内[9]。前一个海拔梯度为高、中山峡谷地貌区，公路线位主要为山脊线、山腰线和沿溪线，谷坡不稳定诱发滑坡、公路坍塌和水毁路基；后一个海拔梯度为高山冰川地貌区，冻胀、冰劈和冻融等物理风化作用较强，影响路基稳定性，产生路基沉陷，所以滇西公路水毁明显较滇东强。

以丽江－大理－元江河谷一线为界，境内地形可分为滇东高原和滇西横断山区两大地形单元，以瓦窑－永平－下关一线为界，滇西横断山区又被分为南、北两段次级地形单元。滇西横断山区北段风化严重，高大山脉对从南部边境进入的西太平洋暖湿气流具有汇聚作用和阻挡抬升作用，增加水汽凝结量和触发不稳定能量释放，使局部突降暴雨诱发各种公路水毁。滇西南山脉呈叶脉状走向，形成喇叭口地形，对气流具有汇聚作用，诱发局部地区强降雨，产生公路水毁。哀牢山、无量山两山系之间形成省内腹地昆明盆地的天然屏障，使得该区域降雨量更为充沛，故无量山－哀牢山一带也为公路水毁高发区。

境内坡度在 25°以上的土地占全省土地面积的 40% 以上，理论上坡度超过 25°的地势即是泥石流的高发区。调查发现，云南省 80% ～90% 的公路水毁发生在地形坡度 20°～55°的坡度地段[10]，而云南急陡坡主要分布在高黎贡山－澜沧江、哀牢山山脉和东川－巧家带状区域，这些地区都是公路水毁高发区。

2.1.2 水文学条件

云南水系发达，自西向东依次为伊洛瓦底江流域、怒江流域、澜沧江流域、红河流域、金沙江流域和南盘江流域，其流域切割密度和径流平均深度逐步减小。极多水带主要分布在伊洛瓦底江流域，而没有极少水带；极少水带主要分布在金沙江和南盘江流域，而没有极多水带。这些水系分布宏观特征对云南公路水毁西多东少的分布格局具有显著控制作用。

水系对公路水毁分布宏观约束机制可以从以下 5 点阐述：①云南河流依地势盘旋，受科里奥利斯加速度作用的影响，水流运动方向发生偏离，对河岸产生侧向侵蚀；②境内河流多为降雨补给

型，极端天气诱发强降雨使径流量和流速迅猛增加，引起山洪泥石流，泥石流冲积物挟砂撞击河岸导致河岸严重侵蚀破坏。其次，洪水期水流结构复杂，形成循底分流式横向环流循环侵蚀岸坡；③河流基准面变化使河流的横断面特征、河床粗糙度、弯曲系数等随着调整[11]，在调整过程中会不同程度地产生侧向侵蚀。水系发达区域的公路线位主要沿河展布，通过前三种方式实现河流下切、侧向侵蚀和强烈消坡作用使岸坡坡脚支撑减弱，在不断地侵蚀环境下，路基边坡稳定性降低，易产生滑坡、路基坍塌、路基沉陷和水毁路基等。④河流侵蚀改变岸坡的地下水动力场，致使岩体间的填充物被掏空，同时磨平了岩体结构面，降低岩体抗滑力，引起路基失稳；⑤境内多级水系主要为降雨补给型，洪水、地表径流对斜坡冲刷作用强烈，多级冲沟微地貌发育，为路基和路基边坡失稳提供有利临空环境。

2.1.3　植被盖度约束

云南新平水塘等乡镇[12]、盈江槟榔江流域[13]及楚雄西舍高盖度植被区严重公路水毁事件和文献[14]既有研究表明，高盖度植被山区在强降雨(地下水)驱动下植被对公路水毁诱发具有促进作用。

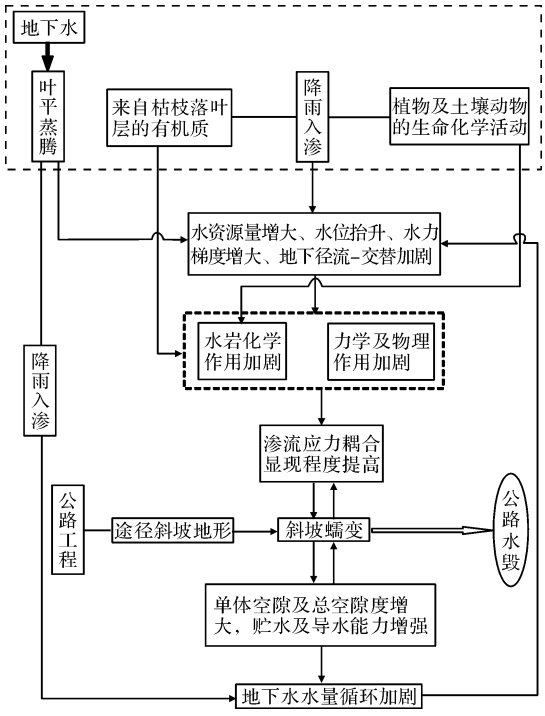


图 3　植被盖度与公路水毁演化关系

植被盖度对公路水毁约束主要是通过植被与降雨(地下水)耦合实现的，在细节上是相互交织的(图 3)。云南境内森林覆盖率大于 30% 的地区主要在四江(独龙江、怒江、澜沧江和金沙江)上游，大盈江流域，红河与澜沧江下游之间。滇中南、滇南、昭通－巧家和大姚一带的公路水毁是通过植被与降雨耦合实现的，而滇西、滇西北和滇中北地区公路水毁是通过植被与地下水相互作用实现的。

植物蒸腾强弱的季节变化与其生长发育节律有密切关系，生长旺盛季节其蒸腾强度越大[15]，说明植被盖度越大，蒸腾作用越强。蒸腾作用随温度增加而逐步增强，暗示即使在少雨季节，水资源丰富地区地下水循环也能顺利进行。在云南境内植被茂盛地区，无论是强降雨事件多发区，还是水资源丰富地区，蒸腾作用都能保持这些区域地下水持续循环。

在植被高盖度地区，不同成因的大空(孔)隙系统发育，且一般林地地表都存在很厚的枯落物层[16]，这使得大空(孔)隙系统具有更好的水稳定性[14]。在这些地区，地表径流是十分微弱的，降雨除了被植被拦截损失外，主要是通过以上不同种类的空(孔)隙补给地下水，增加地下水的径流模量[14]。植被对地下水的促进补给作用，造成不同序次地表河流在雨季出现水位上涨，且林地的产流方式为蓄满产流[16]。这种水－力耦合可使斜坡应力环境短时间内恶化到极限，加剧斜坡蠕变，诱发路基及路基边坡失稳。地下水“渗入－径流－蒸腾”循环及其对浸润曲线改变对路基边坡稳定是不利的。高盖度植被区根系促进斜坡 CWRI 的规模及进程，然而“渗入－径流－蒸腾”循环系统保证了 CWRI 持续进行，影响路基边坡稳定性，诱发公路水毁。

2.2　地质环境约束机制

2.2.1　多尺度构造约束

程海断裂带使宾川－永胜(星湖段)公路成为“病害”公路；南汀河东西两支断裂使临沧－云县、耿马－双江、勐永－勐撒、羊头街－头道水等公路段常年受灾；怒江深大断裂造成怒江洲 1980 年代间毁害桥涵 200 多座，并使瓦窑－六库、六库－福贡为病害公路[17]。小江断裂带与巧家－会泽－东川－寻甸一线大量公路水毁相对应，龙陵－芒市－瑞丽一线公路水毁与龙陵－瑞丽断裂带相对应。诸多事实说明这些断裂网络对云南公路水毁发育的约束机制是紧密的。

2000 年云南遥感综合大调查解译出 61 条不同尺度的断裂，滇西地区断裂分布密度大于滇东，滇北大于滇南，滇西北最大。滇西三大超岩石圈

断裂密集成带，断裂活动历史复杂漫长，而滇东以壳断裂为主。断裂带复杂的力学性质组合多期转变和活动方向的转变使断裂带及其附近挤压形成数公里宽的挤压破碎带。挤压破碎带内各种构造岩发育，诸多结构面相切割组成断裂(裂隙)网络使岩体破碎，浅表生作用加剧，地质体稳定性较差，而公路做为带状建筑贯穿断裂(裂隙)网络系统中，追踪发育多种类型的公路水毁。除此之外，一些褶皱的局部构造同样也对水毁的孕育起到支配作用。

图 4 给出云南境内泉水露头与断裂构造展布关系。滇西地区泉水露头较滇东多，大多数泉水都分布在断裂带附近，这与滇西深大断裂构造发育有关。多尺度断裂构造对泉水分布均有约束作用，而大尺度断裂构造对泉水分布约束最为显著。断裂带不仅是地表水的集中区，同时也是地下水的蓄水区。这些地下水在重力梯度驱动下沿深大断裂向深部渗透，到达深部某种热源被加热后改为沿断裂走向的近水平径流，当遇到阻水断流或运移通道变窄时便溢出地表成热泉，而冷泉可能是局部浅层地下水露头。地下水在循环过程中，伴随着热储温度的作用，能够对围岩体产生溶滤作用，影响围岩体稳定性。地下深部气体和地球化学组分通过高温热水上涌被携带到地表[18]，促进水岩化学反应，影响路基稳定性，诱发水毁路基、路基沉陷等。

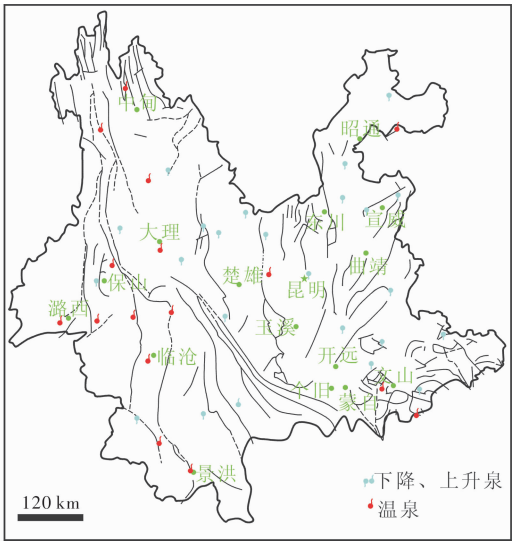


图 4 泉水分布与断裂展布

2.2.2 地层岩性响应

云南通海 - 建水公路 K16 + 580 ~ 750 段堆积层滑坡[19]，元江 - 磨黑高速公路 K303 ~ K371[20]、大保高速公路 K359 ~ K448 沿线滇西红层滑坡[21]和文献[4]既有研究表明地层岩性对公路水毁的控制效应。

从云南公路水毁对地层岩性的响应关系(表 1)可以看出，由泥岩、砂岩和页岩组成的互层岩组发生公路水毁的潜力比(35.3%)比单一粘土岩组的潜力比(19%)大得多，残坡积物的公路水毁潜力比为 20.5%。花岗岩在炎热多雨的气候条件下易分风化，岩体破碎，容易诱发滑坡泥石流等公路水毁(11.5%)。

表 1 云南境内地层岩性对公路水毁响应关系[5]

岩组名	岩性	工程地质评述	水毁潜力比/%
粘土岩组	粘土岩	遇水易松散，易发生崩塌、滑坡等水毁	19
砂泥岩组	泥岩、砂岩、页岩	软硬相间，易发生顺层滑坡，最易发生水毁	35.3
松散岩组	残坡积物	由于是松散堆积，边坡开挖，易发生水毁	20.5
碳酸盐岩组	灰岩、白云岩	工程地质性质良好	1.1
侵入岩组	花岗岩、辉长岩等	节理裂隙发育，风化后破碎，崩塌、滑坡易发生	11.5
喷出岩组	玄武岩、流纹岩等	构造破坏，岩体破碎，易发生坍塌等	7.5
千枚岩 - 片岩 - 板岩组	千枚岩、片岩、板岩	岩性较弱，片理发育，边坡稳定性差，易发生水毁	7.6
其他变质岩组	石英岩、片麻岩	工程地质性质良好，发生水毁的情况较少	4.8

红层通常由一套砂岩、粉砂岩、泥岩组成，偶有泥灰岩和砾岩，多为硬质岩与软质岩互层组成。软质岩强度低、透水性弱、亲水性强、遇水易软化、塑变、抗风化能力弱、易崩解等；硬质岩质地坚硬、抗压强度高，抗水性能强。滇中红层主要分布在楚雄、元谋和大姚一带，对该区公路水毁诱发起促进作用。滇中红层一般呈互层状产出，层面结合力差，当岩体解除约束力，出现临空面、极易顺层面解体滑落。滇西红层主要分布在澜沧江和元江之间。软 - 硬互层应力和应变不协调，导致边坡卸荷产生滑动等。第四系风化堆积层松散，透水性强，而下伏基岩相对隔水或弱透水性，降雨或地下水垂直入渗，水分来不及或很难排泄，堆积体含水饱和，粘聚力下降，抗剪强度降低，路基及路基边坡容易变形和失稳。在滇东地区碳酸岩发育，其强度高，不易风化，组成的路基边坡不易失稳。

2.2.3 新构造应力场约束

据 Scheidegger 的对抗性原理和地貌构造设计

原理，地球表面的任何地貌形态都能够反映形成它的新构造应力场的一些特征，其中水系结构是其最清晰的表现，这在我国西藏、陕、甘、宁、青、川和东南沿海地区都得到证实。据水系展布与新构造应力场的“反映－控制”关系提出一套确定新构造应力场的方法，即水系折线法。云南水系发达，公路主要沿河流溪谷展布，公路展布与水系展布成“依托－制约”关系。

水系展布优势方向与新构造应力作用下发育的剪切带吻合，水系展布的两个优势方向的锐角角平分线对应新构造应力场主压应力，钝角角平分线对应的是主张应力。剪切带是最破碎的，且滇西地区主要深大断裂和断层均沿剪切带方向发育。与剪切带方向平行的沟谷岩土体必然更易于风化，松散物质增多，为泥石流爆发提供很好的物源条件；而与主地应力方向垂直或近似垂直的临空面更趋于诱发崩塌、滑坡等灾害。因此，公路走向与剪切带平行或近似平行(与主压应力方向近似平行)，容易诱发泥石流、水毁路基、水毁路面、路基沉陷和道路翻浆；公路走向与主应力方向垂直或近似垂直，可能发生崩塌、滑坡等。

国道 320 线昆明－瑞丽公路主要呈东西向贯穿滇中、滇西地区，而两区最大主压应力方向分别以 NNW－SSE、NW－SE 为主，与公路走向近似垂直。故沿线崩塌、滑坡共发生 100 多处，水毁路基、水毁路面和水毁桥涵近十处，泥石流仅有 12 处[5]。滇西中部地区最大主压应力方向近似 SN 向，故近似南北走向的头道水－蚂蚁堆段公路水毁以泥石流为主。滇东小江流域河谷内的最大主压应力近似南北向，因此该流域近似南北走向的会泽－东川－嵩明公路水毁以泥石流最为突出。

2.3　天气系统约束

云南独特的地理位置决定其气候受多尺度天气系统约束。暴雨的产生要有一定的大尺度环境背景，它可以提供中(间)尺度天气系统形成的条件和环境场[22]，并对积云对流活动起到明显的组织和增强作用，而中(间)尺度天气系统才是造成降雨并诱发云南公路水毁的直接原因。

南亚高压对低层西南季风和孟加拉湾水汽具有很强的抽吸作用，为低纬高原地区雨季形成提供了环流背景场。当南亚高压上移青藏高原后，抽吸作用导致西南季风爆发，引起云南汛期降雨。西太平洋副热带高压常与印度低压配合形成西南气流，从印度洋获得水汽，诱发云南地区降雨。

造成云南 1985－1998 年汛期大雨暴雨的天气系统统计分析(表 2)表明，切变线和冷锋是云南汛期强降雨的主要天气系统，是最容易激发云南省公路水毁的天气系统，其次是两高压之间的辐合区和西南涡。昆明准静止锋常在冬季与川滇切变线配置诱发强降雨，是东川、小江一带公路水毁发育的天气系统条件。南海西行台风常从北部湾登陆于 7、8 月份进入云南，造成滇南地区普降大雨或暴雨，对滇南公路水毁发育有约束效应。滇黔辐合区主要在 7、8 月份为小江、东川一带公路水毁提供水条件。西南涡对云南降雨的影响主要集中在 5、6 月，为三江上游、昭通地区提供很好的水动力条件，故西南低涡天气系统是该区公路水毁多发的重大贡献者。如西南涡天气系统致使昭通地区 1998 年发生严重公路水毁[24]。

表 2　1985－1998 年汛期造成云南大雨暴雨主要天气系统次数[23]

月份	切变线	冷锋	西风槽	西南涡	孟湾风暴	南海台风	辐合区
5	9	16	3	5	8	0	0
6	17	11	1	8	3	3	9
7	19	10	2	14	0	4	14
8	14	11	5	7	0	7	19
9	12	12	4	3	1	1	9
10	8	15	4	0	7	0	0
11	6	7	1	0	7	0	0
合计	85	82	20	37	26	15	51
比例/%	26.9	26.0	6.3	11.7	8.2	4.8	16.1

孟加拉湾风暴主要通过与冷空气、南支槽、副热带急流等配置诱发云南省 5、10 和 11 月全省性强降雨，强降雨主要集中出现在哀牢山以西、以南地区，从而导致公路水毁发生。南支槽的“高层辐散－低层辐合”的循环机制循环进行并不断加强，这种循环机制耗散产生暴雨。南支槽常在 3、4 月造成怒江公路水毁。

3　结论

(1)云南公路水毁月发生概率与月降雨量、强降雨日的月分布概率呈显著吻合关系，其越大的月份，公路水毁发生的概率越大。

(2)海拔和高差为公路水毁发育提供势能条件，地形与天气耦合诱发局部地区强降雨致使公路水毁发生；河流通过多种方式侵蚀路基边坡，降低边坡稳定性，改变岸坡地下水动力场，降低岩体抗滑力，多级冲沟提供临空环境导致公路水毁发生；在强降雨区或地下水丰富地区，植被蒸腾作用和其对地下水补给实现力学和水岩化学方式降低路基边坡稳定性，诱发公路水毁。

(3)滇西断裂分布密度和规模均大于滇东，滇

北大于滇南，公路做为带状建筑贯穿于多尺度构造组成的断裂(裂隙)网络中，追踪发育各种公路水毁；多尺度构造转折点、交汇点为应力集中区，地应力释放诱发公路水毁；断裂构造对泉水有控制作用，促进路基 CWRI 进行诱发公路水毁；硬质岩与软质岩互层的红层是典型的易滑地层，对公路水毁发展有显著控制作用；公路走向与主压应力方向近似平行，容易诱发泥石流、水毁路基、水毁路面、路基沉陷和道路翻浆；而与主应力方向近似垂直，可能发生崩塌、滑坡等。

(4)云南特殊的地理位置决定其受多尺度天气系统影响，大尺度天气系统通常为中(间)尺度天气系统提供大气环流条件或与中(间)尺度天气系统配置诱发云南地区降雨，中(间)尺度天气系统才是引起云南局部强降雨诱发局部公路水毁的主要天气系统。

参考文献：

[1] 吕德寿，白子培，陈洪凯. 川西山地公路水毁与新构造应力场[J]. 重庆交通学院学报，1992，11(3)：8－11.

[2] 周富春，赖勇，翁其能，等. 从新构造应力场论区域公路水毁发育的宏观模式－以凉山境内公路水毁为例[J]. 重庆交通学院学报，2000，19(4)：47－50.

[3] 艾南山，陈洪凯，李后强. 从新构造应力场论公路水毁问题－兼论地貌发育的对抗性原理[J]. 地理科学，1996，16(4)：298－304.

[4] 陈洪凯，唐红梅，吴承平，等. 四川省公路水毁与地质环境的关系探讨[J]. 重庆交通学院学报，1994，13(4)：24－33.

[5] 方向池. 山区公路水毁地质灾害系统工程地质研究[D]. 成都：成都理工学院，1999：1－131.

[6] 张林洪，王甦达，唐正光，等. 水对公路工程的危害及公路建设对水环境的影响[J]. 灾害学，2008，23(1)：76－81.

[7] 袁素凤. 模糊综合评价高速公路建设工程地质灾害危险性[J]. 灾害学，2009，24(2)：57－60.

[8] 彭贵芬，刘瑜. 云南各量级雨日的气候特征及变化[J]. 高原气象，2009，28(1)：214－219.

[9] 张红兵，金德山. 影响云南省滑坡泥石流活动的几个自然因素[J]. 水文地质工程地质，2004(5)：38－41.

[10] 方向池. 公路水毁与地质构造[J]. 公路，1999(11)：56－62.

[11] 魏合龙，李广雪，周永春. 侵蚀基准面变化对河流体系的影响[J]. 海洋地质动态，1995，(5)：4－6.

[12] 陈晓清，韦方强，崔鹏，等. 云南新平 2002－08－14 特大滑坡泥石流灾害及防治对策[J]. 山地学报，2003，21(5)：599－604.

[13] 马东涛，张金山，冯自立，等. 2004.7.20 云南盈江滑坡泥石流山洪灾害成因及减灾对策[J]. 灾害学，2005，20(1)：67－70.

[14] 徐则民，黄润秋，唐正光，等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(3)：438－450.

[15] 潘占兵，蒋齐，郭永忠，等. 柠条蒸腾特征及影响因子的研究[J]. 中国生态农业学报，2006，14(2)：70－71.

[16] 高人，周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 农村生态环境，2002，18(4)：1－4.

[17] 姜朝松. 云南省地质灾害[J]. 灾害学，1990(4)：42－48.

[18] 张素欣，张子广，马玲儒. 地下水触发地震的初步认识[J]. 山西地震，2005(3)：11－13.

[19] 赵永玲，唐志忠，李金星，等. 云南通海－建水一级公路滑坡原因分析及防治措施[J]. 探矿工程，2003(4)：32－33.

[20] 朱平生，吴香根，李强. 云南元磨高速公路红层路段滑坡成因探讨[J]. 路基工程，2007(6)：76－78.

[21] 朱平生，朱春林，余其平. 云南高原红层滑坡特征[J]. 路基工程，2008(5)：155－157.

[22] 马艳，程麟生. 暴雨中尺度系统不稳定理论的数值试验[J]. 高原气象，1996，15(4)：414－424.

[23] 解明恩，程建刚，范菠. 云南滑坡泥石流灾害的气象成因与监测[J]. 山地学报，2005，23(5)：571－578.

[24] 周春花，唐川，陶云. 1998－07－06 云南境内金沙江流域暴雨泥石流的气象成因[J]. 山地学报，2006，24(6)：678－682.

Macroscopic Restraint Mechanism on Spatial-temporal Distribution of Highway Washout in Yunnan

Zhang Jiaming[1], Wang Zhiqi[2], Zhang Yong[2], Xu Zemin[1] and Zhang Decheng[1]

(1. *Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming* 650500, *China*; 2. *Highway Science & Technology Research Institute of Yunnan Province, Kunming* 650000, *China*)

Abstract: Macroscopic restraint mechanism of spatial-temporal distribution of highway washout in Yunnan province is analyzed by methods of field investigation and statistical analysis. Results show that the main controlling factors of temporal distribution of highway washout in Yunnan province are monthly rainfall and probability of monthly distribution of heavy rain days; landform and physiognomy, water system, vegetation coverage, multiple scale structures, formation lithology and the new tectonic stress field have made distribution of highway washout wide and relatively concentrated; the main climatic conditions that constrain spatial distribution of highway washout in Yunnan is the middle (inter)-scale weather systems.

Key words: Yunnan; highway washout; physical geography; geological structure; weather system