

丁明涛, 周鹏, 庙成, 等. 基于降雨垂直分异的泥石流监测网传感节点布设研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 128-132. [DING Mingtao, ZHOU Peng, MIAO Cheng, et al. Layout of sensor nodes in debris flow monitoring network based on rainfall vertical differentiation[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 128-132. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.022.]

# 基于降雨垂直分异的泥石流监测网传感节点布设研究\*

丁明涛<sup>1,2</sup>, 周鹏<sup>3</sup>, 庙成<sup>4</sup>, 黄涛<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川绵阳 621010; 3. 重庆市彭水苗族土家族自治县水务局, 重庆 409600; 4. 中山大学地理科学与规划学院, 广东广州 510275)

**摘要:** 泥石流监测网传感节点的布设是泥石流预警中重要的环节。以岷江上游作为研究区, 讨论区域降雨量垂直分异特征, 并在此基础上, 总结归纳出传感节点布设规则, 并在七盘沟流域进行实例验证应用。结果表明: 岷江上游传感节点从西北部、中部、东南部布设, 西北部在小于 3 650 m 处, 传感节点布设于海拔 2 650 m 处, 大于 3 650 m 的区域则在同一范围内布设于高海拔处; 中部区域传感节点布设于同一区域范围内高海拔处; 东南部区域(典型示范区: 汶川县七盘沟)在小于 5 162 m, 布设于海拔 4 238 m 处, 其余区域布设于高海拔区域处。

**关键词:** 降雨; 垂直分异; 泥石流; 监测网; 传感节点; 岷江上游

**中图分类号:** P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)02-0128-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.022

泥石流是我国山区常见的地质灾害现象<sup>[1]</sup>。自 21 世纪以来, 西部地区先后经历多次区域性强震, 震后这些地区接连出现多次泥石流灾害, 造成严重的人员伤亡和财产损失, 特别在西南地区尤为突出<sup>[2-8]</sup>。面对这一情况, 对于泥石流灾害多发区的监测预警, 成为当前泥石流防灾减灾工作的重要手段。

建国以来, 我国学者通过对西南、西北等部山区进行监测预警研究, 并取得了丰硕的成果。唐小明等<sup>[9]</sup>用 ArcIMS 技术开发的突发性地质灾害预警预报信息发布系统(LAPS-IMS)实现了突发性地质灾害概率空间分布预报预警图的发布、空间定位和空间叠加等功能; 殷坤龙等<sup>[10]</sup>使用 Web-GIS 技术设计的地质灾害实时预警预报系统, 主要包含空间预测模型、时间预测模型和时空耦合模型, 提升了人机交互体验; 吴莉娟等<sup>[11]</sup>根据不同程度泥石流灾害极次的最强回波强度、回波高度、强降水回波持续时间信息提出了泥石流发生的短临预警指标。各位学者在研究中解决了泥石流预警的诸多问题, 包括预警体系架构模式、各项预警阈值和预警信息发布方式等, 然而随着计

算机技术的发展以及相关学科技术的交叉应用, 对泥石流预警的时效性和精确性提出了更高的要求, 相应的短临预警体系还有待完善。泥石流短临预警的关键是能否及时有效的捕捉泥石流暴发后的相关信息(即泥石流激发条件及运动特征)<sup>[12]</sup>, 并采取相应的技术手段对捕捉到的信息进行处理, 最后结合泥石流预警模型得出泥石流预警信息, 进行泥石流警报。所以构建泥石流短临预警体系的核心关键问题是获取泥石流激发相关数据(物源和水源)、完善信息处理部架构设计、完善泥石流警报信息发布等。

泥石流流域内地形的差别影响着灾害监测预警的效果<sup>[13]</sup>。本文依据降水的区域垂直分异特征, 提出泥石流监测网传感节点布设准则, 并在典型小流域内进行应用验证, 为该地区泥石流灾害的预测预警提供较为精确的参数指导。

## 1 数据与处理

本研究所用数据的获取主要有 2 个方面: ①来源于中国气象数据网提供的年平均降雨量数据;

\* 收稿日期 2017-09-03; 修回日期: 2017-11-07

基金项目: 四川省青年科技基金项目(2017JQ0051); 国家自然科学基金项目(41371185); 教育部人文社会科学研究专项任务项目(工程科技人才培养研究)(15JDC019)。

第一作者简介: 丁明涛(1981-), 男, 山东日照人, 博士, 教授, 主要从事泥石流灾害风险控制与聚落减灾研究。

E-mail: mingtaoding@163.com。

②来源于中国科学院遥感与数字地球研究所提供的 DEM 数据。

在泥石流短临预警报体系的传感节点布设中, 为了更好的采集有效数据及精简成本考虑, 因此需要对研究区降雨量在垂直方向上的分异特征进行探讨, 并根据探讨研究结果, 对传感节点布设方式进行设计。具体数据处理和分析过程如下。

(1) 在 ArcGIS 平台下, 对研究区多年各降雨量点的数据, 通过插值分析生成区域年降雨量数据; 然后利用栅格计算, 将多年的年降雨量数据均值化, 得到研究区的年均降雨量数据。

(2) 为阐明研究区整体海拔与区域降雨量的分异关系, 对研究区海拔按 100 m 为一间隔进行划分, 然后依据划分的海拔范围对降雨量进行统计, 并绘制海拔与降雨量的散点图, 解析两者关系。

(3) 进一步详细分析各区域海拔与区域降雨量的分异关系, 以 500 m 为间隔进行高程分带, 依据划分的海拔范围对降雨量进行统计, 并绘制海拔与降雨量的散点图, 解析两者关系。

(4) 结合降雨垂直分异特征和泥石流流预警器传感节点布设特点, 总结研究区泥石流流预警传感节点在垂直方向上的布设规则。

## 2 案例分析

### 2.1 研究区概况

岷江上游地区涵盖了阿坝藏族羌族自治州的汶川县、茂县、理县、松潘县、黑水县五县以及成都市都江堰市的小部分地区, 属于第一级阶梯(平均海拔 4 500 m 以上)的青藏高原东部边缘, 以及第二级阶梯(平均海拔 1 000 ~ 2 000 m)的四川西北高原向成都平原边缘过渡的高山峡谷区, 处于 30.0°45.0' ~ 33.0°10.0'N, 102.0°35.0' ~ 103.0°57.0'E, 其主要河段长约 330 km, 流域面积约为 2.2 万 km<sup>2</sup>(图 1)。

岷江上游地区是我国最大的羌族聚集地, 被视作巴蜀文化及成都平原繁荣发展的重要生态安全屏障, 是四川省自然、社会、经济与民族团结的形成、演化和发展中的关键之所在, 亦被公认为全球性气候变化的敏感地区<sup>[14]</sup>。从生态环境系统的角度, 岷江上游具脆弱性、不可逆性, 从板块运动角度, 岷江上游受到各大板块的共同作用, 其区域构造的基本格架十分独特<sup>[15]</sup>。

### 2.2 岷江上游降雨量垂直分布规律

经栅格计算后, 分析得到岷江上游多年年均降雨量数据(见图 2)。研究区整体东南部降雨量大于西北部, 且其在西北部干旱河谷部位的降雨量

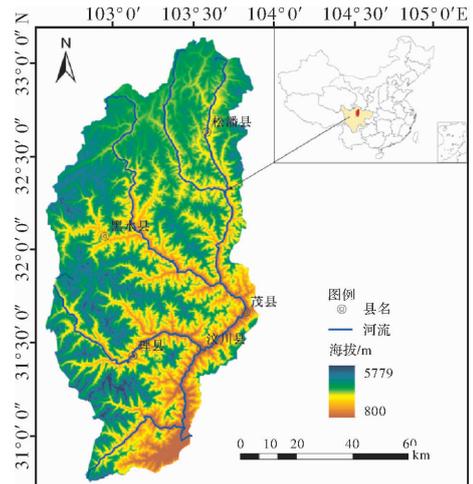


图1 岷江上游地理位置

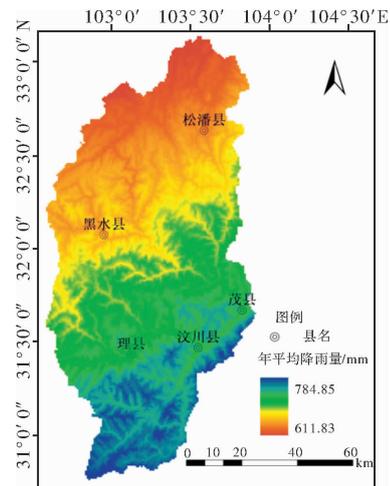


图2 岷江上游多年平均降雨量

小于其它区域; 同理, 在东南部干旱河谷降雨量小于其它区域, 但在此干旱河谷处降雨量仍大于西北部所有区域。在 2000 - 2009 年最大年均降雨发生于 2004 年, 为 922.13 mm; 最小降雨量发生于 2002 年, 为 525.18 mm。该区域最大降雨量无明显的规律性变化趋势, 最小降雨量值总是位于 600 mm 范围左右。

将岷江上游流域海拔以 100 m 为间隔进行分类, 共分为 55 类。在忽略其它影响因素的条件下, 岷江上游降雨量在垂直方向上的变化趋势可以海拔 3 751 m 为界划分为两段: 海拔小于 3 751 m 为降雨递减段, 大于 3 751 m 为降水递增段(图 3)。降雨递减段平均高程变幅为 2 975 m, 降雨量增幅为 -74.2 mm, 降雨量在垂直方向上的递增率为 -2.5 mm/100 m; 降雨递增段平均高程变幅为 2 400 m, 降雨量增幅为 87 mm, 降雨量在垂直方向上的递增率为 3.63 mm/100 m。岷江上游山区最大降雨量发生位置处于海拔 5 400 m; 最小降雨量发生位置处于海拔 3 751 m 处, 且该处为岷江上游降雨量

拐点处。通过岷江上游降雨量与高程分布图的对比分析可知，岷江上游最小降雨量区域皆为干旱河谷区域，河谷区域两侧区域随着海拔的增加，降雨量逐渐增大，直至山脊处。

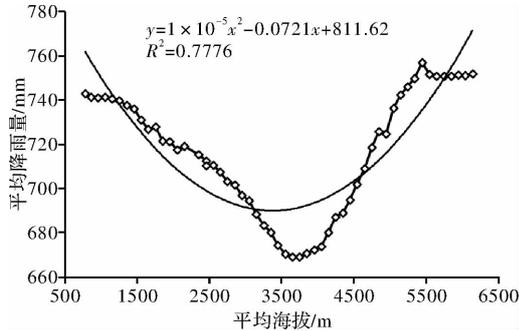


图3 岷江上游不同海拔降雨量散点图

根据岷江上游实际降雨情况分析，为了使岷江上游降雨量垂直分异特征结果更加精确，基于岷江上游降雨量分布情况，将岷江上游分为西北部、中部、东南部三个区域，并以500 m间隔进行高程分带，然后对各区域降雨量的垂直分异特征进行详细研究(见图4)。

(1)西北部降雨量垂直分异特征

研究区北部和西北部为寒冷高原季风气候区，包括镇江关—黑水一线以北的岷江河段，年均温度区间为5~10℃，最低温度约-20℃，最高温度约30℃，常年受到的太阳辐射较强。该区域年平均降雨量约700~800 mm，湿度大，积雪多，积雪期长4个月，分别为12月、1月、2月、3月，高山地区积雪期长达8个月。岷江上游西北部为高原型季风气候区，日温差大而年温差小，多年平均气温5~10℃，多年平均年降水量611~700 mm。

综合上述分析，可知在岷江上游西北区域于2650 m、3650 m两处出现拐点，当海拔小于2650 m时，降雨量随海拔的升高而增加；当海拔位于海拔2650~3650 m之间，降雨量随海拔的增加而逐渐降低；当海拔大于3650 m时，降雨量随海拔的

升高而增加(图5)。

(2)中部降雨量垂直分异特征

岷江上游流域中部为干燥少雨的干旱河谷气候区，包括干流镇江关至汶川绵虎区间。较场至汶川一带为典型的干热风效应区，年雨量少至500 mm，为半干旱半湿润地区，然而，汛期降水量占据全年85%，约150 d降雨日。据多年气象站统计，区内年均气温13.4℃，极高温35.6℃，极低气温-6.5℃，地表蒸发量大，由于雨水少，植被生长条件差，故风化剧烈，水土流失严重。

岷江上游中部区域降雨量随垂直高度变化的总体趋势为，随着垂直高度的上升，降雨量增加；但在局部区域，如垂直高度由1395~2280 m区段内，随着垂直高度的上升，降雨量逐渐减小；在垂直高度2760~4200 m区段范围内，随着垂直高度的增加，降雨量变化趋势不明显，整个区段内降雨量在700 mm左右；在垂直高度大于4200 m区段范围内，由于受到岷江上游整体降雨量分布趋势影响(由西北向东南降雨量逐渐增大，且东南部最高海拔处降雨量仍大于西北部低海拔处降雨量)，随着垂直高度的增加，降雨量逐渐增大，且递增率约为3 mm/100 m(图6)。

(3)东南部降雨量垂直分异特征

汶川县绵虎镇以下的流域东南部气温高，雨水多，湿度大，年均气温15.0℃，最高温30.0℃，最低温-5.0℃，年雨量可高达1600 mm，关门石最大年均降雨量1665.5 mm，虹口乡最大年均降雨量1547.7 mm，地表蒸发量仅为年均降雨量的0.5倍，气候湿润，植被良好，农业发达。从降雨的地区分布来看，由于岷江上游各地的地形差异，造成各地区降雨量差异极大。总的说来，汶川以上雨量较少；汶川~都江堰降雨丰沛，暴雨中心大都在渔子溪~灌县一带，且多强降雨。

岷江上游东南部区域降雨量随垂直高度变化的总体趋势为：随着垂直高度的上升，降雨量增加；但在局部区域，如垂直高度由784~1766 m

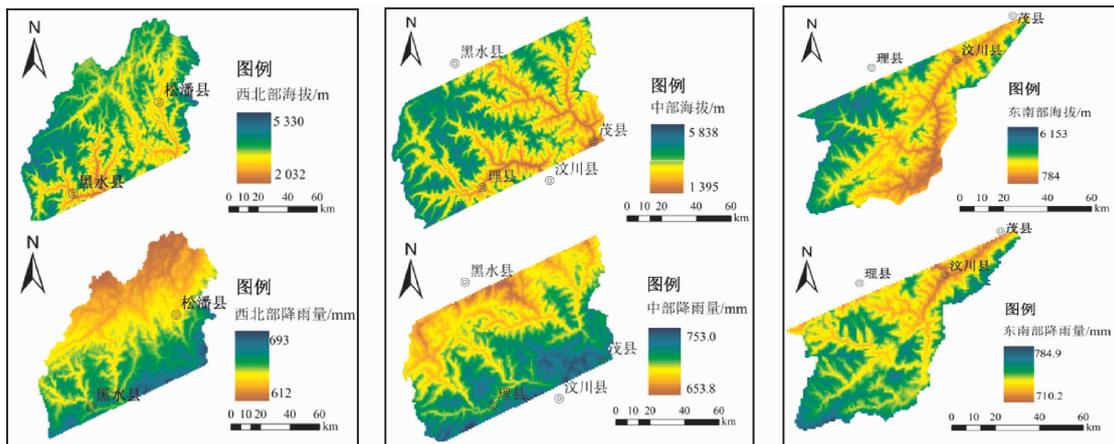


图4 岷江上游不同区域降雨量与海拔分布情况

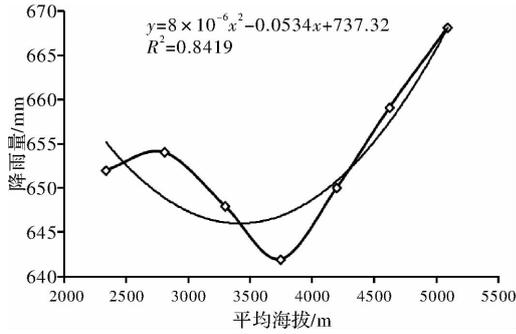


图5 岷江上游西北区域高程带降雨散点图

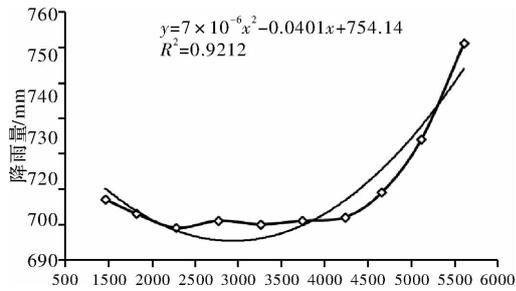


图6 岷江上游中部区域高程带降雨散点图

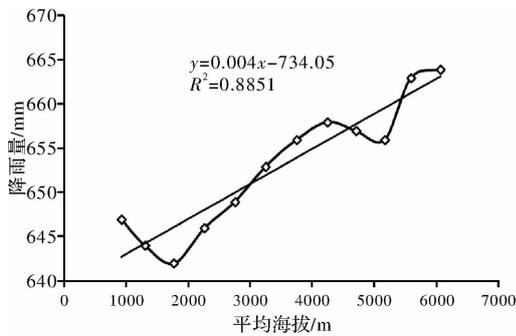


图7 岷江上游东南部区域高程带降雨散点图

区段内,随着垂直高度的上升,降雨量逐渐减小;在垂直高度 1 766~4 238 m 区段范围内,随着垂直高度的增加,降雨量增加,且递增率为 0.65 mm/100 m;在垂直高度 4 238~5 162 m 区段范围内,降雨量随垂直高度的增加而减小;在垂直高度大于 5 162 m 区段范围内,随着垂直高度的增加,降雨量逐渐增大,且于垂直高度 5 588 m 处趋于稳定,降雨量处于 660 mm 左右(图 7)。

### 2.3 典型区试点研究

根据以上分析和讨论,我们可以得到岷江上游传感节点在垂直方向上的布设规则。从西北部、中部、东南部考虑传感节点的布设,西北部在小于 3 650 m 处,传感节点布设于海拔 2 650 m 处,大于 3 650 m 的区域则在同一范围内布设于高海拔处;中部区域传感节点布设于同一区域范围内高海拔处;东南部区域在小于 5 162 m,布设于海拔 4 238 m 处,其余区域布设于高海拔区域处。

由于整个岷江上游流域面积较大,所以,本研究特选择汶川县七盘沟流域进行传感节点布设

及其效果验证。

七盘沟位于汶川县威州镇七盘沟村,岷江左岸,沟口坐标为 103°32'40.49"E、31°26'39.19"N。七盘沟沟口附近交通便利,有都汶高速公路和 G213 线通过。七盘沟流域内属高山峡谷区,整体西北低东南高,沟内斜坡陡峭,沟床下切,沟内基岩裸露,极为破碎。沟内出露地层岩性为千枚岩、结晶灰岩、白云岩、花岗岩、闪长岩。由于靠近茂汶断裂,区域小断层密集排列,沟内地质构造极其复杂。七盘沟内人类工程活动活跃,主要有前期建设开挖回填、开荒、矿山开发等,在人类进行各类工程活动中,由于建设开挖形成新的临空面,开荒所导致的植被破坏以及矿山开发所产生的各种废弃矿渣都为泥石流的形成提供了便利条件。

结合传感节点布设规律可知,七盘沟传感节点布设在海拔小于 5 162 m,选择布设于海拔 4 238 m 处,其余区域布设于高海拔区域处,具体布设情况如图 8 所示。

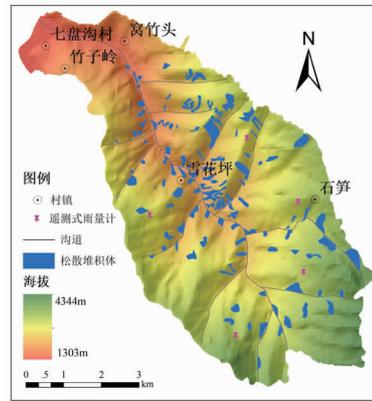


图8 七盘沟传感节点布设图

## 3 结论

岷江上游山区降雨量整体趋势为自西北向东南降雨量逐渐增大。通过对研究区进行区域划分(西北部、中部、东南部)后降雨量垂直分异特征进行研究可知,在岷江上游西北区域、中部地区和东南部区,随着垂直高度的上升,降雨的变化模式不同,但整体降雨量随垂直高度增加而增加,但在局部不同区段范围,随着垂直高度的上升,降雨量逐渐减小或降雨量变化趋势不明显。研究区传感节点的布设,西北部区域和东南部区域分别以 3 650 m、5 162 m 处为界,界线以上在同一范围内布设于高海拔处,界线以下布设于海拔 2 650 m、4 238 m 处,中部区域传感节点布设于同一区域范围内高海拔处。

本文基于降雨量的垂直分异特征进行了详细

的分析,得到区域泥石流传感节点布设规律,可为提高泥石流短临预警报的时效性及精确性有着积极的帮助,同时对于泥石流短临预警报整体体系的设计与构建有着重要的指导意义。

在实际情况中,不同的坡度、坡向等因子对降雨量的垂直分异特征均有影响,而且是不可忽略的。为了使泥石流灾害监测预警尽可能的准确和高效,更加精确的传感节点布设是实现这一点的关键。在今后,我们将开展流域不同地形条件下的降雨空间差异分析,综合确定泥石流灾害传感节点布设位置,从而进一步完善泥石流短临预警报体系。

### 参考文献:

- [1] 康志成,李焯芬,马嵩乃,等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(13): 41-49.
- [3] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2010, 26(3): 280-282.
- [4] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流[J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501-509.
- [5] 游勇, 柳金峰. 汶川 8 级地震对岷江上游泥石流灾害防治的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(Z1): 16-22.
- [6] 郭小花, 李小林, 赵振, 等. 汶川 8.0 级地震对岷江上游泥石流灾害防治的影响[J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 685-696.
- [7] 庙成, 丁明涛, 王骏, 等. 芦山地震灾区次生山地灾害分布特征及其成因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(11): 1572-1579.
- [8] 陈宁生, Javed, IQBAL, 等. “8·3”鲁甸地震小震大灾背景下次生泥石流的易发性分析[J]. 成都理工大学学报(自科版), 2016, 43(1): 102-108.
- [9] 唐小明, 冯杭建, 麻士华, 等. 基于 ArcIMS 技术的浙江省突发性地质灾害预报预警信息发布[J]. 中国地质灾害和防治学报, 2007, 18(2): 117-121.
- [10] 殷坤龙, 张桂荣, 龚日祥, 等. 基于 Web-GIS 的浙江省地质灾害实时预警预报系统设计[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 19-23.
- [11] 吴莉娟, 江智全, 肖天贵, 等. 凉山山地强降雨型泥石流灾害雷达短临预警技术研究[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(1): 86-89.
- [12] 陈龙. 汶川地震区泥石流监测预警方法研究——以四川省三大片区泥石流为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [13] 丁明涛, 周鹏, 程尊兰, 等. 基于传感网的泥石流短临预警体系设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2): 63-68.
- [14] 罗怀良. 岷江上游地区旅游资源开发与旅游业发展[J]. 旅游开发与市场, 2005, 21(4): 364-366.
- [15] 黄润秋, 王士天, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程及其工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001.

## Layout of Sensor Nodes in Debris Flow Monitoring Network Based on Rainfall Vertical Differentiation

DING Mingtao<sup>1,2</sup>, ZHOU Peng<sup>3</sup>, MIAO Cheng<sup>4</sup> and HUANG Tao<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

3. Water Affairs Bureau of the Pengshui Miao and Tujia Autonomous County, Chongqing 409600, China;

4. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The layout of sensor nodes in debris flow monitoring network is an important part of debris flow warning. This paper takes the upper reaches of Min River as the study area to discuss the characteristics of vertical variation of regional rainfall. On this basis, the rules of setting up sensor nodes are summarized and applied in Qipan Gully. The results show that the sensor nodes of the upper reaches of Min River are laid out from the northwest, middle and southeast. In the northwest, sensor nodes deployed in the altitude of 2650 m in the area of less than 3650m, more than 3650m in the same area is located at high altitude. In the middle region, the sensor nodes are located at the high altitude in the same area. In the southeastern region (site: Qipan Gully), sensor nodes laid at an altitude of 4238 m at less than 5162 m area, and the rest of the region is located at a high altitude area. This study will provide more accurate assistance for monitoring and warning system of debris flow disaster.

**Key words:** rainfall; vertical differentiation; debris flow; monitoring network; sensor nodes; the upper reaches of Min River