

山地等价雨量

何险峰 薛勤

(四川省农村经济综合信息中心, 成都 610072)

摘要 提出山地等价雨量概念和计算方法, 以达到滑坡泥石流预警指标借用国家暴雨预警标准的目的。在对国家与中国西部山地的暴雨标准进行对比后得到国家标准刚好是山地标准的 2 倍; 由大多数滑坡泥石流灾害发生在海拔高度 1300 m 地带的事实, 让高斯分布描述二者关系成为可行的选择; 气象与国土部门流行的潜势雨量对滑坡泥石流潜势作用计算式, 促成了山地等价雨量计算式的最终形成。通过对平原、山地、高原等不同环境的模拟评测试验和实况抽样检验, 山地等价雨量公式能够达到预想设计效果。现在山地等价雨量公式已经用于滑坡泥石流预警分析图网站自动化发布, 其运行效果尚需进一步在实践中加以验证。

关键词 滑坡泥石流 山地等价雨量 地质灾害预警 暴雨灾害预警

引言

中国大陆 70% 以上面积是海拔高度大于等于 500 m 的山地。每年 4—10 月暴雨季节, 滑坡泥石流地质灾害发生频繁, 带来重大人员伤亡和财产损失。2008 年汶川大地震造成地质灾害隐患点明显增加, 滑坡泥石流预警与服务所面临的形势愈发严峻。2007 年国家颁布了突发事件应对法, 将自然灾害预警分为 4 个不同的等级^[1]。气象部门积极响应, 发布了国家暴雨预警标准^[2]。许多山地省级气象部门以国家标准为指导, 制定了地方暴雨预警标准^[3-4]。由于国家尚没有明确的滑坡泥石流预警标准, 国家暴雨预警标准和地方暴雨预警标准的不统一, 造成同一红、橙、黄、蓝 4 级预警分析图中语义含混, 为滑坡泥石流预警气象服务带来困难。提出与国家暴雨预警标准相一致, 兼顾国家和地方标准的滑坡泥石流预警计算方法研究, 可以充分发挥自动气象站雨量资料的作用, 从宏观上把握滑坡泥石流的发生发展趋势, 为滑坡泥石流客观分析和自动预警奠定基础。

滑坡泥石流的发生与当前雨量、潜势雨量、山体高度、地质构成密切相关。韦方强等在分析泥石流形成的能量、物质和水源三大条件后得出, 能量和物

质在一定时段内是相对稳定的, 只有水源条件是动态变化的, 因此, 雨量是滑坡泥石流的激发条件和动态因子^[5]。赵济在《中国自然地理》指出中国地势西高东低, 分为 3 个台阶, 第 2 台阶上分布着塔里木盆地、准噶尔盆地、阿拉善高原、内蒙古高原、鄂尔多斯高原、黄土高原、云贵高原和四川盆地, 海拔高度集中在 800~2000 m^[6]。中国科学院/水利部成都山地灾害环境研究所在《中国泥石流》分布与分区的研究表明, 我国泥石流在一级台阶的低山、丘陵和平原发生稀少; 第 1、2 台阶过渡地带和第 2 台阶广大地区是泥石流活动的主要区域^[7]。虽然我们尚无条件获取到中国范围内滑坡泥石流发生点与海拔高度的精确统计分布, 但是, 苏凤环利用航拍遥感和 DEM 数据进行空间分析, 给出了典型泥石流发生带不同海拔高度, 发生泥石流的频数分布, 发现 80% 或以上的滑坡泥石流发生在 500~2000 m, 属于第 1、2 台阶过渡地带或第 2 台阶区域^[8-9]。从气象角度, 泥石流活跃区域也是季风气候区, 持续性降水明显增加了滑坡泥石流的发生次数^[10-11]。余峙丹等进一步从天气动力学诊断分析角度描述了强降雨天气过程对海拔高度敏感带泥石流灾害形成的物理过程。地形抬升作用, 前期连续降水, 造就山地特有的局地强对流是形成 2008 年云南楚雄秋季特大泥石流的

主要因素^[12]。从一个侧面反映出山地降水与平原丘陵降水在天气动力学作用上具有明显的差异,即山地暴雨与平原丘陵暴雨不仅形成的物理过程有明显差异,所带来的灾害也完全不相同。

上述研究从宏观角度描述了滑坡泥石流分布规律和形成原因,为研究固定海拔高度的常规自动气象站降雨量与滑坡泥石流存在的内在关联提供了思路。

1 山地等价雨量的构成

根据系统论的量变质变规律,滑坡泥石流是山地降雨量达到一定程度后所引发的突发事件。分析山地地方暴雨标准与国家标准的关系,分析海拔高度与滑坡泥石流发生的概率分布,分析前期降水对滑坡泥石流的作用等关键因素,可以确保滑坡泥石流的定性结论是以定量分析为前提的。

1.1 平原雨量和山地雨量的关系

暴雨是形成滑坡泥石流的主要原因,不同地点诱发滑坡泥石流的暴雨临界值不同。表 1 给出的 3 种暴雨定义,至少表达出:

- (1)四川、新疆等内陆地区位于我国第 2 台阶山地。
- (2)对国家范围,站点 24 h 降水量大于等于 50 mm 称为暴雨。适用于我国广大平原地区,具有广泛的影响力。
- (3)对四川高原、新疆等内陆地区,站点 24 h 降水量大于等于 25 mm 就称为暴雨。适用于我国西部广大山地,且具有较强的影响力。
- (4)山地地方暴雨标准恰好是国家暴雨标准的一半,为建立平原雨量与山地雨量的关系提供了依据。即从滑坡泥石流预警角度可以假设

$R_{\text{平原雨量}} \equiv 2R_{\text{山地雨量}} \equiv R_{\text{当前雨量}} + R_{\text{山地潜势雨量}}$ (1)

其中:

$R_{\text{平原雨量}}$:海拔高度小于 500 m 站点的连续 24 h 降雨量(mm);

$R_{\text{山地雨量}}$:海拔高度大于等于 500 m,小于 2500 m 站点的连续 24 h 降雨量(mm);

$R_{\text{当前雨量}}$:测站连续 24 h 降雨量(mm);

$R_{\text{山地潜势雨量}}$:海拔高度大于等于 500 m,小于 2500 m 站点的潜势雨量(mm)。

式(1)表示平原雨量可用山地雨量线性表示,当山地雨量大于等于 25 mm 时等价于已经达到国家

表 1 国家与山地地方 24 h 暴雨定义

暴雨标准	定义
国家	站点 24 h 降水量 ≥ 50 mm
四川甘孜、阿坝	站点 24 h 降水量 ≥ 25 mm
新疆气象、水文部门	站点 24 h 降水量 ≥ 24 mm

暴雨 50 mm 标准;为了使山地雨量与平原雨量能够平滑过渡,将平原雨量逻辑上表达为站点当前雨量与山地潜势雨量的合计。

于是山地潜势雨量的计算成为以下讨论的焦点。

1.2 滑坡泥石流与海拔高度的关系

平原与山地的雨量关系是一种定性概念模型,引入地势则可使其具体化。地势是滑坡泥石流发生的势能基础。《中国泥石流》的分布与分区统计表明,滑坡泥石流主要发生于第 1、2 台阶过渡地带和第 2 台阶广大地区,遍及全国 23 个省区。《中国自然地理》将第 2 台阶海拔高度集中在 500~2500 m。设第 2 台阶的典型海拔高度为 1300 m,均方差为 400 m,得到海拔高度与滑坡泥石流发生概率的高斯表达式

$$G(h) = \frac{1}{1 + e^{\frac{1}{2}(\frac{h-1300}{400})^2}}$$
 (2)

其中, h 是站点海拔高度(m)。

苏凤环等利用航拍遥感和 DEM 数据进行空间分析,将高程按照 500 m 的等间隔划分为 6 类,得到图 1(彩页)所示的典型地带海拔高度与滑坡泥石流面积的百分比分布图。将式(2)计算所得曲线与面积百分比柱状分析图叠加,不难验证滑坡泥石流随海拔高度变化的高斯分布规律:

(1)在第二台阶和第 1、2 台阶过渡地带,80%以上滑坡泥石流发生在这一地带。

(2)滑坡泥石流集中在海拔高度为 500~2000 m 地区的 1300 m 附近。

(3)在低海拔或超过 2500 m 的高海拔地区,滑坡泥石流发生的概率很低。低海拔发生滑坡泥石流稀少,已在《中国泥石流》中阐述,不再赘述。高海拔地区发生滑坡泥石流较少,主要原因有:高原草原,人烟稀少,雨量偏少,常年积雪区域(即便发生泥石流也是溶雪性质而非山洪性质)等。

1.3 山地潜势雨量

地势是滑坡泥石流发生的静态空间作用,时间

作用则更具动态特征。受季风气候的影响,山地降水具有连续性,潜势雨量与滑坡泥石流关系密切。矫梅燕在《现代天气业务》中,给出了国土和气象部门经常采用的地质灾害气象统计潜势预报模型:

$$R_{\text{潜势雨量}} = \sum_{d=0}^4 0.84^d R_d \tag{3}$$

其中, $R_{\text{潜势雨量}}$:测站连续降雨带来的滑坡泥石流潜势性雨量(mm); R_d : $d=0.14$ 日的前期日雨量(mm)。

式(3)中缺乏海拔高度对滑坡泥石流的影响,可引入式(2)进行完善,即:

$$R_{\text{山地潜势雨量}} = R_{\text{潜势雨量}} \times 2G(h) \tag{4}$$

式(4)表明:

当 $h \leq 0$ m,或 $h \geq 3000$ m 时,山地潜势雨量均为 0;

当 $h=1300$ m 时,山地潜势雨量取得极大值, $R_{\text{山地潜势雨量}}=R_{\text{潜势雨量}}$;

其余情况下海拔高度(h)以高斯权重方式确定潜势雨量对山地潜势雨量的贡献。

1.4 山地等价雨量表达式

将式(4)代入式(1)右侧得到:

$$R_{\text{山地等价雨量}} \equiv R_{\text{平原雨量}} \equiv R_{\text{当前雨量}} + 2R_{\text{潜势雨量}} G(h) \tag{5}$$

式(5)表明山地等价雨量是以平原雨量为参照,并用当前雨量,潜势雨量,海拔高度为因子,形成一个非线性函数表达式。

由降雨引发的滑坡泥石流灾害可以分为当前大雨型、持续降雨型与前期降雨型。

当前大雨型:当前雨量与地质灾害的关系最为密切。即便潜势雨量不大,持续时间也不长,只要当前有强降水,地质灾害就可能发生。

持续雨量型:前期降水持续时间长,使得下垫面饱和脆弱,即便当前雨量不大,也会发生滑坡泥石流。

潜势雨量型:前期降水持续时间不一定持续,但潜势雨量大,使得下垫面饱和脆弱,即便当前雨量不大,同样会激发滑坡泥石流。

对海拔高度 $h=1000 \sim 1400$ m 的典型高度,即 $G(h)=0.5$ 的情形,如果当前雨量等于 25 mm,则潜势雨量大于等于 25 mm,滑坡泥石流等价雨量大于等于 50 mm。故(5)实现了地方与国家暴雨标准的统一。

对低海拔($h < 300$ m)或高海拔($h > 2500$ m)区域,式(5)退化为: $R_{\text{山地等价雨量}} \equiv R_{\text{当前雨量}}$ 。

式(5)有较明显的滞后效应。即便当前无雨量,山地等价雨量也可能很大。

1.5 山地气象站分布

山地等价雨量监测需要若干山地雨量监测站点作为基础。中国有严格气象观测质量考评,以小时为单位的自动气象站点有 2562 个。从表 2 给出的不同海拔高度自动气象站分布数不难发现,近 1/3 (765 个)气象站点分布在滑坡泥石流易发的海拔高度。近年,伴随加密自动雨量站的业务建设,山地雨量监测能力加强,气象部门已经具备对滑坡泥石流现象进行 24 h 不间断监控并开展滑坡泥石流气象预警和服务的基础。

表 2 中国不同海拔高度自动气象站分布数

	海拔高度/m					合计
	<500	500~800	800~1700	1700~2000	>2000	
站点数	1575	198	502	65	222	2562

1.6 模拟试验分析

为检验式(5)的效果,分别在低海拔(300 m),典型海拔(1300 m),高海拔(2000 m)选取 3 组连续雨量数据(0~300 mm)进行计算,分析实况雨量与等价雨量的差异(图 2,彩页)。

对滑坡泥石流易发地(如:海拔高度 $h=1300$ m, $2G(h)=1.0$):山地等价雨量 $\approx$ 当前雨量 + 山地潜势雨量。

对海拔较高的地域(如:海拔高度 $h=2000$ m, $2G(h)=0.36$),式(5)对潜势雨量有明显抑制:山地等价雨量 $\approx$ 当前雨量 + 1/3(山地潜势雨量)。

对海拔较低的地域(如:海拔高度 $h=300$ m, $2G(h)=0.08$),式(5)对潜势雨量有显著抑制:即山地等价雨量 $\approx$ 当前雨量。

1.7 实况检验与应用

1.7.1 站点个例计算

表 3 给出了 2011 年几次滑坡泥石流个例与县测站雨量资料关系的实际检验结果。不难发现汶川、茂县等滑坡泥石流易发地带虽然当日雨量都未超过 20 mm,但等价雨量均达到或接近国家暴雨标准;对肃南、贵南高海拔地域,潜势雨量对等价雨量贡献略小,但都将原始雨量提升大到暴雨标准;对西安、巴中海拔较低的站点潜势雨量对等价雨量的贡献较小。

表 3 2011 年站点雨量与滑坡泥石流个例

序号	测站名	海拔 m	$2G(h)$	日期	当日雨量 mm	山地潜势雨量 mm	山地等价雨量 mm	灾害报道
1	四川,汶川	1326.6	0.999	2011-07-04	15.5	39.2	54.7	泥石流
2	四川,茂县	1591.6	0.868	2011-07-04	15.4	37.2	47.6	泥石流
3	甘肃,肃南	2311.5	0.079	2011-07-23	24.5	25.4	26.5	泥石流
4	青海,贵德	2238.1	0.120	2011-08-16	24.6	39.4	29.3	泥石流
5	四川,汶川	1326.6	0.999	2011-08-21	20.0	20.8	40.7	泥石流
6	陕西,西安	398.6	0.146	2011-09-18	46.4	110.2	62.5	山洪
7	四川,巴中	416.3	0.160	2011-09-18	169.8	270.9	213.2	山洪

1.7.2 第 1、2 台阶过渡带个例

图 3a、b(彩页)分别给出了 2011 年 7 月 4 日 08:00 四川省 24 h 实际雨量和等价雨量,分析比较不难发现,在发生滑坡泥石流灾害的阿坝州东南部汶川、茂县附近降水量在 10~30 mm 之间变化,没有达到国家暴雨标准,甚至未达到四川省暴雨标准;经过等价雨量计算处理之后,汶川、茂县附近降水量在 30~60 mm 之间变化,达到国家暴雨标准,而低海拔高度的降水中心——成都—雅安一带的雨量并没有明显的变化。表明等价雨量引入后不仅在地可以较好吻合国家标准,也不会对低海拔的降雨量产生明显畸变。

1.7.3 第 1 台阶个例

2012 年 3 月 7 日 18:00 福建省出现了一次 24 h 雨量达到暴雨标准的过程(图 4a、b,彩页)。由于福建省总体属于第一台阶地带,虽然前期累计降水明显,但是,由于海拔高度较低,等价雨量分析图与实际雨量相差不明显,暴雨等级色斑图一致。表明式(5)仅对具有一定海拔高度的山地作用明显,而对低海拔地域无明显影响,但不会对国家暴雨标准产生负面影响。

由于山地与平原同时存在的客观事实,式(5)应用于山地时其价值主要体现在滑坡泥石流预警方面,应用于平原时其价值则体现在暴雨预警方面,这样国家暴雨预警指标不仅适用于平原,也适用于山地的滑坡泥石流预警。

1.7.4 滑坡泥石流分析图应用

从 2011 年起,我们将等价雨量概念应用于中

国、区域、省级滑坡泥石流自动预警测试并发布到网站^[12-16],直接将山地等价雨量套用国家暴雨标准和暴雨预警标准,并作为滑坡泥石流的等级划分标准,取得积极效果。

2 小结

国家暴雨标准与西部山地暴雨标准不一致和滑坡泥石流标准缺失是提出山地等价雨量概念的原因。山地等价雨量不仅建立起西部山地暴雨标准与国家标准的联系,而且是当前雨量,潜势雨量和海拔高度的非线性函数。山地等价雨量计算式的主要依据有 3 点:①国家暴雨是和山地地方标准的 2 倍;②绝大多数滑坡泥石流事件发生在中国第 2 级地形台阶地带,并可以用高斯分布建立海拔高度与滑坡泥石流事件的联系;③潜势雨量对滑坡泥石流的发生具有定量的潜势作用。

用国家自动气象站资料计算山地等价雨量,不会增加额外的监测负担,占总站数量 1/3 的山地国家自动气象站和加密自动气象站资料已经为滑坡泥石流的宏观监测奠定起物理基础。山地等价雨量计算简明,容易在气象部门内推广。

由于没有引入相对高度、坡度、地质构成、植被覆盖等因子,而且各地滑坡泥石流的降雨临界值也会不一样,山地等价雨量计算式存在一定局限。与国土部门依据相对高度、坡度、地质条件、降雨量、降雨临界值等因子进行滑坡泥石流预警不同,用地等价雨量的预警是一种气象意义上的逻辑推理预警。

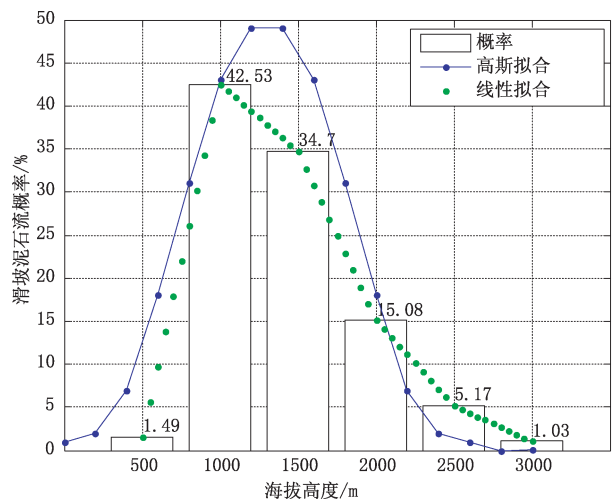


图 1 滑坡泥石流与海拔高度的概率关系

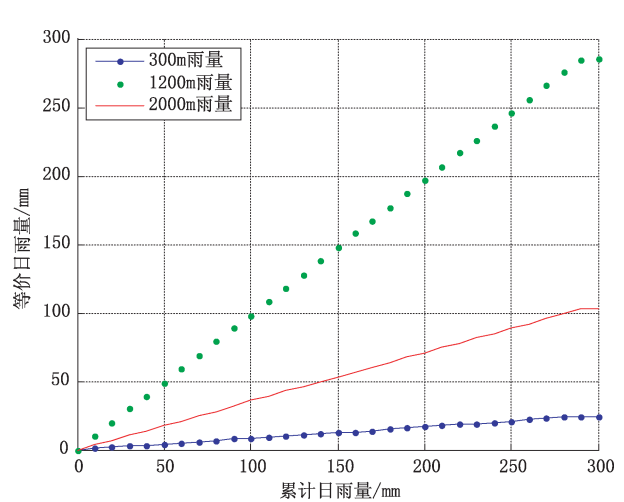


图 2 当前雨量为 0 时等价雨量模拟

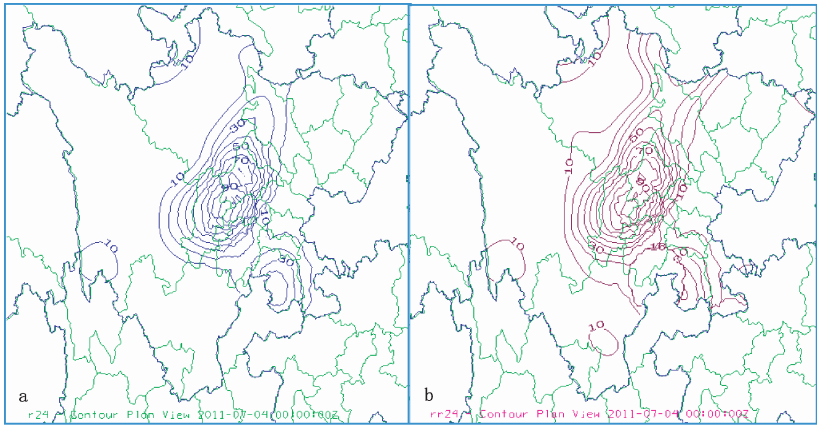


图 3 2011 年 7 月 4 日 08:00 实际雨量(a)和等价雨量(b)

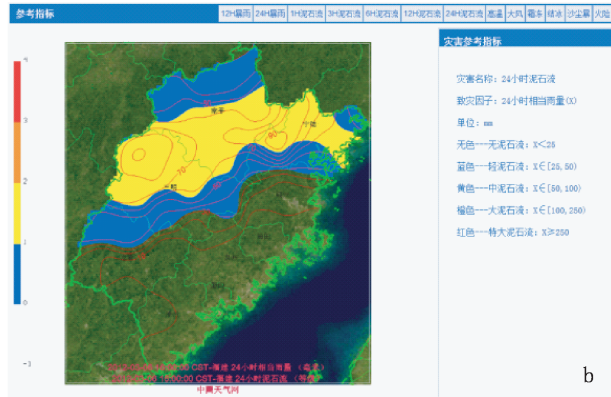
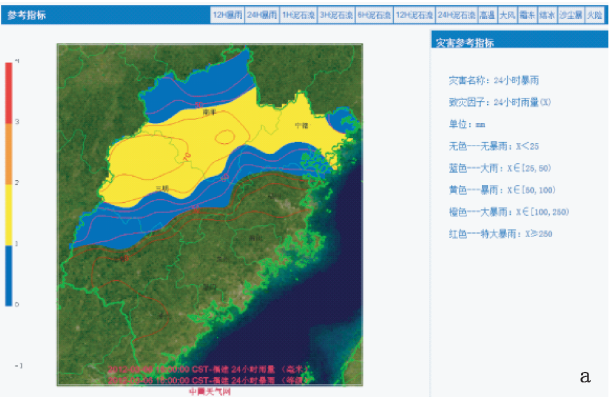


图 4 2012 年 3 月 7 日 18:00 实际雨量与暴雨预警(a)和等价雨量与滑坡泥石流预警(b)

参考文献

[1] 中央政府门户网站. 突发事件应对法[EB/OL]. (2007-08-30) [2012-03-13]. http://www.gov.cn/flfg/2007-08/30/content_732593.htm.

[2] 突发气象灾害预警信号及防御指南[EB/OL]. (2004-08-16) [2012-03-13]. 中国气象局. http://www.cma.gov.cn/2011zwxx/2011zflfg/2011zgfwj/201110/t20111027_134927.html.

[3] 罗永康. 四川省气象信息员培训教材[M]. 北京:气象出版社, 2010:58-59.

[4] 杨涛. 新疆强对流暴雨的气候特征和概念分布模式研究[J]. 灾害学,2003,18(1):47-50.

[5] 韦方强,徐晶,江玉红,等. 不同时空尺度的泥石流预报技术体系[J]. 山地学报,2007,25(5):616-621.

[6] 赵济. 中国自然地理[M],3 版. 北京:高等教育出版社,2010:4-5.

[7] 中国科学院—水利部成都山地灾害环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000:57-75.

[8] 苏凤环,刘洪江,韩用顺. 汶川地震山地灾害遥感快速提取及其分布特点分析[J]. 遥感学报,2008,12(6):956-963.

[9] 苏凤环,崔鹏,韩用顺,等. 基于遥感技术的都汶公路地震次生山地灾害分布规律分析[J]. 地质科技情报,2009,28(2):29-32.

[10] 矫梅燕. 现代天气预报业务(下)[M]. 北京:气象出版社,2010:411-438.

[11] 唐余学,廖向花,李晶,等. 基于 GIS 的重庆市山洪灾害区划[J]. 气象科技,2011,39(4):423-428.

[12] 余峙丹,张辉,郭荣芬. 云南楚雄特大滑坡泥石流气象成因[J]. 气象科技,2010,38(1):136-140.

[13] 成都公共气象服务网. 自然灾害指标分析栏目[EB/OL]. [2012-03-13]. <http://www.cdws.info/ckzb>.

[14] 何险峰,张祥峰,郑丽娟,等. 气象灾害本体设计. 气象科技,2012,40(6):1007-1012.

[15] 何险峰,马力,罗永康,等. 近实时公共气象服务分析图网站发布[J]. 气象科技,2012,40(4):578-584.

[16] 何险峰,蒋丽娟,雷升楷,等. 公共气象服务网站数据的及时发布[J]. 气象科技,2011,39(4):483-488.

Mountain Equivalent Rainfall

He Xianfeng Xue Qin

(Sichuan Provincial Rural Economic Information Center, Chengdu 610072)

Abstract: The mountain equivalent rainfall concepts and calculation methods are proposed, borrowing from the national rainstorm warning standards for the debris flow early warning, so that they can be used as a uniform standard for both rainstorms and debris flow warning. The functions of the mountain equivalent rainfall ultimately are based on three facts: (1) the national standard is two times as much as the western mountain standard for the same storm warning; (2) most of the debris flow disasters occur around the altitude of 1300 m; and (3) the relationships between altitude and disaster can be described with Gaussian distribution, which is used widely as the formula by meteorological and land planning departments to determine the potential effect of pre-precipitation accumulated rainfall on debris flow. The mountain equivalent rainfall formula can achieve the desired effect in the sampling simulation and evaluation tests and various environments, such as plains, mountains, and the plateau at different altitudes. The mountain equivalent rainfall formula has been used in the automatic releasing on a web site for debris flow early warning and analysis. Its application results need to be further verified in practice.

Key words: debris flow, mountain equivalent rainfall, geological disaster warning, rainstorm warning