四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系

刘海知[1]，马振峰[2]，范广洲[1]

(1. 成都信息工程大学 大气科学学院，四川 成都 610225 2. 四川省气候中心，四川 成都 610072)

摘 要：[目的] 对四川典型区域滑坡泥石流与降水的关系进行研究，为进一步分析四川地区气候变化与地质灾害分布规律之间的关系提供基础。[方法] 四川滑坡、泥石流灾害多由降水引发，在收集整理近 15 a 滑坡泥石流灾害事件后，确定出四川滑坡、泥石流的典型区域，进而分析典型区域滑坡、泥石流与降水气候特征的关系。[结果] 四川省滑坡典型区域在川东地区，泥石流典型区域在阿坝州地区。近年典型区域滑坡、泥石流近年频次明显增加，典型区域滑坡属于较长日数降水诱发型，与 15 d 有效降水密切相关，前期降水中，强降水所占比例较大；典型区域泥石流属于较短日数降水诱发型，与 3 d 有效降水密切相关，前期降水中，中小型降水所占比例较大。[结论] 研究区 15 d 有效降水量和 3 d 有效降水与降水气候特征间的关系密切，可分别作为典型区域滑坡、泥石流预报因子。

关键词：滑坡；泥石流；降水；气候特征

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)06-0073-05 **中图分类号**：X43，P64

文献参数：刘海知，马振峰，范广洲，等. 四川省典型区域滑坡泥石流与降水的关系[J]. 水土保持通报，2016，36(6)：073-077. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2016. 06. 013

Relationship Between Landslide/Debris Flow and Rainfall in Typical Region of Sichuan Province

LIU Haizhi[1], MA Zhenfeng[2], FAN Guangzhou[1]

(1. *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan* 610225, *China*; 2. *Sichuan Climat Center, Chengdu, Sichuan* 610072, *China*)

Abstract: [Objective] We studied the relationship between climatic characteristics of rainfalls and geological disasters in typical regions of Sichuan Province to provide basis for analyzing the relation between climatic variation and geological disasters distribution in Sichuan Province. [Methods] Disaster cases were collected in recent 15 years and the typical regions of landslide and debris flow in Sichuan Province were marked out to analyze the relationship between geological disasters and the climatic characteristics of rainfalls. [Results] Landslides mainly occurred in the east of Sichuan Province, while debris flows mainly occurred in the west of Sichuan Province. The frequencies of the two kinds of disasters increased in recent years. Landslides in typical regions were caused by days precipitation, and specifically 15 days effective precipitation was responsible for it. Beside that, heavy rains were ordinarily found in early stage of the collected landslide cases. Debris flows in typical regions were caused by few-day rainfall, and was closely related to 3 days effective precipitation. Moderate rain and light rain were frequently observed in 3 days effective precipitation before debris flow outbreaks. [Conclusion] 15 days effective precipitation and 3 days effective precipitation were both associated closely to climate characteristics of rainfalls: the former can be the factor for landslide forecast, and the latter can be the factor for debris flow forecast.

Keywords: **landslide; debris flow; rainfall; climatic characteristics**

地处我国西南的四川地区，位于地貌第一阶梯向第二阶梯的过度带上，南北大断裂带的鲜水河断裂（龙门山断裂）—安宁河断裂—小江断裂—红河断裂纵观其间，巨大的地形起伏，复杂的地质构造，加上西

收稿日期：2016-05-05 **修回日期**：2016-05-25

资助项目：国家自然科学基金项目“华西秋雨年际变化规律及其形成机理研究”(41275097)；四川省科技支撑计划项目(15C0098)

第一作者：刘海知(1991—)，男(汉族)，四川省荣县人，硕士研究生，研究方向为短期气候诊断。E-mail：lhz1012@aliyun. com。

通讯作者：马振峰(1961—)，男(汉族)，内蒙古自治区四子王旗人，硕士，研究员，硕士生导师，主要从事气候预测，气候变化及生态环境研究。E-mail：mzf616@aliyun. com。

南季风影响形成的独特气候，导致四川地区历来是我国滑坡、泥石流的高发区。灾害威胁着山区的交通干线、农田水利等基础设施安全，成(都)昆(明)铁路沿线就分布着 3005 条泥石流沟，占全国铁路沿线的 30%，为全国之最。如 1997 年 6 月 5 日，四川省美姑县则租滑坡转化为特大泥石流，造成四个村庄 1527 人受伤，151 人死亡。许多学者展开了短期和短临地质灾害预报系统研究，相关科研机构和业务单位也发展了业务化运行系统。谭炳炎[1-3]根据成昆铁路暴雨泥石流历史数据，大致给出了泥石流爆发的雨量等级。李军、周成虎[4]在分析香港地区滑坡大小与降水关系时，进行了多种周期的前期降水的定量化研究，发现不同类型的滑坡出现与前期降水有不同的关联。国外研究中，Berruti 在通过研究布雷西亚 6—18 世纪滑坡与洪水的关系时，建立了该省地质灾害的历史分布图。Keefer 等[5]依据土体渗透能力、含水量变化，采用静力学理论推导降雨强度及延时与泥石流发生的关系。而目前针对 7 d 以上的较长时间地质灾害预报研究比较缺乏，因而制约了地质灾害中期以上预报研究和业务发展，难以满足防灾减灾业务需求。因此，收集四川地区历史上发生的地质灾害案例记录，统计四川地区滑坡、泥石流灾害的年际分布规律和年内分布规律，为进一步分析四川地区气候变化与地质灾害分布规律间的关系提供基础，对四川地区减灾体系建设，谋求社会经济的持续发展具有现实意义。

1 资料与方法

1.1 资料处理

(1) 灾情资料。1999—2013 年四川省滑坡、泥石流灾害历史资料，考虑到灾情资料的完整性和客观性，把 1999 年作为起始年份，15 a 灾情资料主要来自于中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、四川省国土厅，少部分由四川省民政厅和四川省救灾年鉴补充。统计时，以“县”和“天”为单位，即：同一天某县多地发生滑坡、泥石流灾害记为该县当天发生灾情一次[6]。最终得到四川省 1999—2013 年时间精确到日，地点精确到县的滑坡灾害个例 2746 个，泥石流灾害个例 960 个。

(2) 降水资料。四川省 156 个观测站的逐日降水资料；来自于四川省气候中心，剔除峨眉、新都、郫县 3 个在 1999—2013 年间无滑坡、泥石流发生的县的测站，最终得到 153 个站点的降水资料。灾害点密度远远大于气象站个数，确定灾害点最近的气象站，其降水作为该灾害点的雨量。

1.2 研究方法

主要采用相关分析、线性回归的方法[7]，确定四川滑坡泥石流典型区域，研究典型地区地质灾害发生与降水气候特征的关系，探求时空分布规律，分析典型区域灾害—气候要素耦合关系。

2 典型区域滑坡、泥石流灾害分析

2.1 滑坡、泥石流典型区域

图 1 分别为四川滑坡、泥石流多年平均分布图，空心点表示气象站位置。由图 1 可以看出，滑坡灾害多出现在四川东部，高频区在巴山地区，巴中、达州部分地区年均滑坡发生频次在 4 次以上；泥石流灾害主要发生于四川西部，高频区在川西以北的阿坝地区，阿坝州部分县年均泥石流爆发频次达到 3 次以上。因此将滑坡年均发生频次在 3 次及其以上的广元(市区)、南江县、万源县、仪陇县、宣汉县、达州(市区)、南充(市区)7 个区县作为四川滑坡典型区域，将泥石流年均发生频次在 2 次及其以上的壤塘县、金川县、马尔康县、汶川县、理县、黑水县 6 个县作为四川泥石流典型区域。

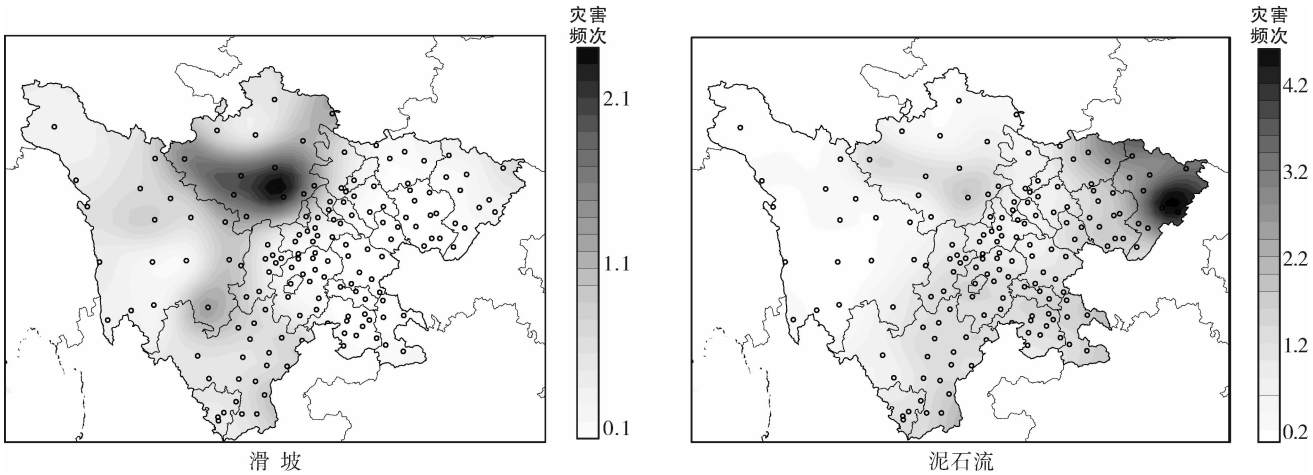


图 1 四川省地区滑坡、泥石流多年平均分布图

2.2　滑坡、泥石流灾害时空变化

图 2 为典型区域滑坡、泥石流灾害时空分布,滑坡频次在 2003 年出现极大值,泥石流频次在 2010 年出现极大值。两类灾害数量近年都明显增加,一是因为该地区人类活动的增强,二是由于地质灾害统计工作的更加客观全面。两类灾害在月际分布上大致呈现正态分布,都主要集中在夏季爆发,夏季发生的次数明显多于其他季节,最高值月份出现在 7 月,与降雨在月际分布上吻合。在空间分布上,滑坡灾害频次在前三的区县依次是达州(市区)、宣汉县、南江县,其中达州(市区)滑坡爆发频次远远多于其他代表区县。泥石流发生频次在前三的区县依次为理县、汶川县和金川县,各个区县的灾害频次相差不大。

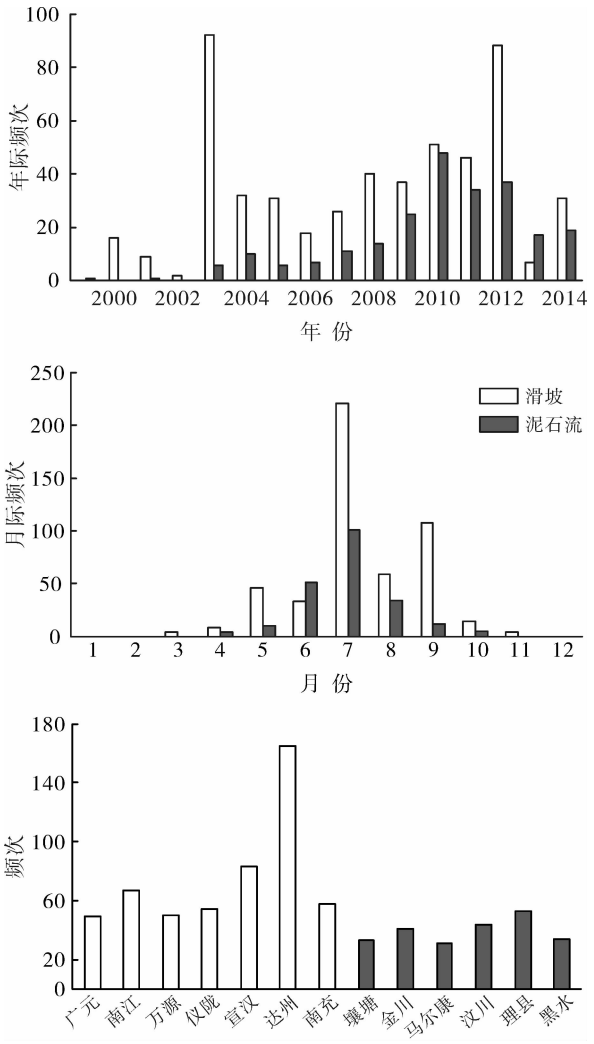


图 2　典型区域滑坡泥石流灾害时空分布

3　降水诱发滑坡、泥石流灾害分析

3.1　滑坡、泥石流灾害与前期降水的关系

为探究前期累计雨量与滑坡、泥石流发生的关系,以典型区域近 6 年中(2008—2013 年)发生滑坡、泥石流灾害次数与其前期降雨量因子做相关性分析,结合灾害滞后于降雨的时间,选定前期累计雨量有效时段为 15 d。各站点所在区域气候条件不同;地表径流的产生、水分的蒸发等过程,使得进入岩土体的雨量小于实际记录雨量;且一次降雨不一定会导致地质灾害发生,每次降雨中也只有部分降雨量对灾害的发生起作用,因此用有效降雨量来表示前期累计雨[8-9],前期有效降雨量是指灾害发生前的降雨过程中对岩土体稳定性产生作用的雨量[9],地形陡峭,土壤吸水能力较好,有效雨量则较大,反之则较小。以灾害典型区域各区县的逐日降水量计算其各次灾害前期的有效降水量〔公式(1)〕,计算得出滑坡、泥石流灾害与不同累计降雨量的相关系数(表 1)。因为滑坡、泥石流灾害典型区域地形地貌条件复杂,前期有效降水量对各区县地质灾害的影响程度不完全一致[11],需要分别确定各区县的最佳有效降水系数〔如公式(2)〕。

$$R_c = R_0 + R_1 + R_2 + \sum_{i=3}^{n} \alpha^{i-2} R_n \qquad (1)$$

式中:α——有效降水系数($0<\alpha<1$),表示岩土体对雨水滞留能力的大小,它由区域内岩土体总体性质决定[10];R_c——有效降雨量(mm);R_0——灾害发生当天的降雨量(mm);R_n——灾害发生前 n 天的降水量(mm);α——典型区县的最佳有效降水系数。

$$\alpha = \min\left[\frac{\sigma}{\max(R_c)}\right] \qquad (2)$$

式中:σ——该处有效降雨量标准差。

由表 1 可知,典型区域滑坡与前 15 d 有效降雨量相关系数最大,后续依次是前 10 d 有效雨量和前 1 d 有效雨量;可见诱发滑坡的动态因子多为长时间降水;典型区域泥石流与前 3 d 有效降雨量相关系数最大,后续依次是前 2 d 有效雨量和前 1 d 有效雨量,可以看出泥石流由相对较短时间降水激发。

3.2　不同级别降水与滑坡、泥石流的关系

分别选取与滑坡相关性最高的前 15 d 有效雨量和与泥石流相关性最高的前 3 d 有效雨量作为分析对象,按照每 25 mm 一个量级对有滑坡前 15 d 的进行分组,每 5 mm 一个量级对有泥石流前 3 d 的进行分组,得到两类灾害频次在各个量级有效雨量的分布(图 3)。

由图 3 可以看出,在两类灾害在各个有效降雨量级的分布上都比较离散,没有明显规律性;即在很高雨量和很低雨量的情况下均有滑坡、泥石流灾害发生;这符合实际,因为降雨量很少的条件下,若地表水沿优势通道渗入地下,也能诱发滑坡、泥石流[12]。

表1 典型区域滑坡、泥石流发生前15 d内降雨量因子与灾害次数的相关性分析

滑坡次数			泥石流次数	
时间/d	相关系数	排序	相关系数	排序
0	0.748	16	0.849	4
1	0.782	3	0.853	3
2	0.751	15	0.854	2
3	0.756	14	0.889	1
4	0.763	13	0.840	5
5	0.768	11	0.837	6
6	0.768	11	0.830	7
7	0.772	10	0.827	8
8	0.773	9	0.824	11
9	0.775	8	0.821	16
10	0.783	2	0.823	15
11	0.778	7	0.822	14
12	0.779	6	0.826	9
13	0.781	4	0.825	10
14	0.780	5	0.824	11
15	0.788	1	0.823	13

为避免造成有效雨量越大,灾害爆发率越低的直观误解,图3分别给出了滑坡、泥石流频次以及频次累计百分比与前期有效降降雨的关系;典型区域滑坡频次累计百分比25%,50%,75%对应的前15 d有效降雨量级分别是[25 mm,50 mm),[100 mm,125 mm),[150 mm,175 mm),即前15 d有效降雨达到[25 mm,50 mm)时已有25%的滑坡发生;达到[100 mm,125 mm)时已有50%的滑坡发生;达到[150 mm,175 mm)时已有75%的滑坡发生。典型区域泥石流频次累计百分比25%,50%,75%对应的前3 d有效降雨量级分别是[10 mm,15 mm),[20 mm,25 mm),[30 mm,35 mm),即前3 d有效雨量达到[10 mm,15 mm)时已有25%的泥石流发生;达到[20 mm,25 mm)时已有50%的泥石流发生;达到[30 mm,35 mm)时已有75%的泥石流发生。

将滑坡、泥石流前期降雨中有1 d及其以上日降水量≥50 mm(暴雨),25 mm<日降水量≤50 mm(大雨)和日降水量<25 mm(中、小雨)的灾情个例分为3组,[25 mm,50 mm)个例组中不包含≥50 mm的情况,<25 mm个例组中不包含≥50 mm和[25 mm,50 mm)的情况。从典型区域滑坡前15 d降水情况来看(表2),日降水量≥50 mm条件下发生灾害的次数远远多于其他雨量下的灾害次数,前15 d平均有效降水为226.7 mm;典型区域泥石流前3 d降水中日降水量<25 mm条件下诱发灾害的次数明显大于其他雨量下的灾害次数,日降水量≥50 mm条件下诱发泥石流个例数为0,前3 d平均有效降水为26.7 mm。这与实况相符,阿坝州大部分地区极少出现日降雨量≥50 mm的强降水天气,滑坡典型区川东多低山丘陵,水汽条件好,地形抬升作用对强降水天气系统(如西南涡)有加强作用,易造成强降水。

表2 滑坡泥石流发生前期降水情况

灾害种类	≥50 mm频次	[25 mm,50 mm)频次	<25 mm频次	平均15 d有效雨量	平均3 d有效雨量
滑 坡	188	53	28	266.7 mm	26.6 mm
泥石流	0	20	155		

4 滑坡、泥石流与降水气候特征的关系

滑坡、泥石流灾害多由异常降水引发,为探究异常降水与多年平均降水的关系,利用典型区域269个滑坡个例和175个泥石流个例的降水特征数据,分析滑坡发生前15 d有效降水量、泥石流发生前3 d有效降水量与多年平均降水量、雨季降水量间的关系。分析结果显示,滑坡前15 d有效降雨量与年降雨量、雨季降雨量线性相关;泥石流发生前3 d有效雨量与年降雨量无明显相关性,与雨季降水量线性相关,相关性用函数关系式描述详见表3—4。在对滑坡的前15 d有效降水和泥石流的前3 d有效降水分别与年暴雨雨量、年大雨雨量间关系进行分析后得出,15 d有效雨量与年暴雨雨量线性相关,与大雨以及以下的雨量不存在相关性;诱发泥石流前3 d雨量与大雨雨量存在一定线性关系,与其他雨量不具有明显关系,相关性用函数关系式描述详见表3—4。根据以上分析结果可见,滑坡前15 d降水与区域降水气候背景间表现出较强规律性,可作为典型区域滑坡预报因子,泥石流前3 d降水同区域降水气候背景间有较强相关,可作为典型区域泥石流预报因子。

表3 滑坡前15 d雨量拟合结果

降 水	函数类型	R^2	常数项	一次项
年降水量	线性	0.288	−64.14	0.152
雨季降水量	线性	0.327	78.02	0.180
暴雨雨量	线性	0.419	50.60	0.188

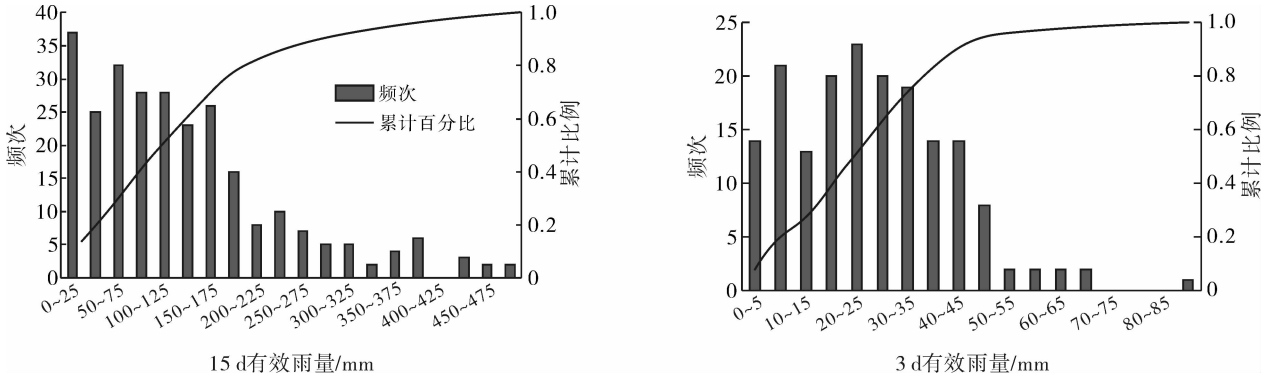


图 3　典型区域滑坡泥石流与前期降水关系

表 4　泥石流前 3 d 雨量拟合结果

降 水	函数类型	R^2	常数项	一次项
雨季降水量	线性	0.310	3.357	0.035
大雨雨量	线性	0.340	19.425	0.126

5　结 论

(1) 四川滑坡典型区域在川东地区;广元(市区)、南江县、万源县、仪陇县、宣汉县、达州(市区)、南充(市区)7 个区县年均滑坡爆发频次在 3 次及其以上;四川泥石流典型区域在阿坝州地区,壤塘县、金川县、马尔康县、汶川县、理县、黑水县年均泥石流爆发频次达到 2 次及其以上。

(2) 典型区域滑坡、泥石流近年频次明显增加,主要在夏季爆发。

(3) 典型区域滑坡与前 15 d 有效雨量相关性最大,属于长时间降水诱发型,典型区域滑坡发生的前期降水中强降水所占比例较大;典型区域泥石流与前 3 d 有效雨量相关性最大,属于较短时间降水诱发型,典型区域泥石流发生的前期降水当中中小型降水所占比例较大。

(4) 与滑坡发生密切相关的 15 d 降水量与年降水量、雨季降水量、暴雨雨量线性相关,与小于 50 mm 雨量线性无关,与泥石流发生密切相关的 3 d 降水量与雨季降水量、大雨雨量线性相关,与年降水量和暴雨雨量线性无关。

[参 考 文 献]

[1] 谭炳炎,杨大文,石胜国. 暴雨泥石流预报的研究[J]. 铁道学报,1992(3):92-101.

[2] 谭炳炎,段爱英. 山区铁路沿线暴雨泥石流预报的研究[J]. 中国铁道科学,1994(4):67-78.

[3] 谭炳炎. 二十世纪中国铁路沿线泥石流防治理论与实践[J]. 铁道工程学报,2005(S1):369-372.

[4] 李军,周成虎. 香港地区滑坡体积与前期降水关系分析[J]. 自然灾害学报,2002,11(2):37-45.

[5] Keefer K D, Wilson C R, Mark K R, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall [J]. Science, 1987,238(4829):921-924.

[6] 唐川,朱静. 云南滑坡泥石流研究[M]. 北京:商务印书馆,2003.

[7] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社,2000.

[8] 谢剑明,刘礼领,殷坤龙,等. 浙江省滑坡灾害预警预报的降雨阀值研究[J]. 地质科技情报,2003,22(4):101-105.

[9] 张国平. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象,2014,40(7),886-890.

[10] 丛威青,潘懋,李铁锋,等. 降雨型泥石流临界雨量定量分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):2808-2812.

[11] 胡娟,闵颖,李华宏,等. 云南省山洪地质灾害气象预报预警方法研究[J]. 灾害学,2014,29(1):62-66.

[12] 惠鑫. 陕北黄土高原地质灾害与降雨关系研究[D]. 陕西 西安:长安大学,2010.