DOI: 10.5846/stxb201312223000
冯骏, 张继辉, 疏义林, 姚龙, 唐鑫生, 吴海龙.皖南凹耳臭蛙地理分布格局与生境选择.生态学报,2015,35(17): - .
Feng J, Zhang J H, Shu Y L, Yao L, Tang X S, Wu H L.The geographic distribution pattern and habitat selection of the Chinese concave-eared torrent frog in southern Anhui Province.Acta Ecologica Sinica,2015,35(17): - .

皖南凹耳臭蛙地理分布格局与生境选择

冯　骏[1], 张继辉[1], 疏义林[1], 姚　龙[1], 唐鑫生[2], 吴海龙[1,*]
1 安徽师范大学生命科学学院, 安徽省重要生物资源保护与利用重点实验室, 芜湖　241000
2 黄山学院生命与环境科学学院, 黄山　245041

摘要:凹耳臭蛙(*Odorrana tormota*)是一种小型山溪蛙类,由于叫声独特,种内具有超声通讯功能而引起国内外相关专家的广泛关注。本研究首次针对皖南凹耳臭蛙地理分布、生境选择以及人为干扰强度对种群密度的影响进行了研究。共调查了 9 县 1 区 32 条不同的山溪,发现其中的 16 个有凹耳臭蛙分布,除黄山区的香溪和浮溪具文献记录外,其余 14 个分布点均为首次报道。基于现存凹耳臭蛙分布点的水系关系,推测该物种在皖南的分布呈现出以青弋江、新安江和水阳江三大水系为纽带、间断分布的格局。对其中 10 个分布点 222 只凹耳臭蛙生境选择的统计结果表明,在夜晚活动周期内,该物种对乔木、灌木丛、草本植物、岩石、沙滩和倒伏朽木等不同生境的选择具有显著差异($F_{5,54}=25.75$, $P<0.001$),栖息在草本植物和灌丛中蛙的数量明显多于栖息在其它几种生境类型中的蛙类。暗示溪流沿岸的草本植物和灌丛对该物种的生存和繁衍具有重要意义,乔木对其非活动周期的隐蔽可能具有不可替代的作用。根据人类活动对其栖息地破坏程度,将人为干扰程度划分为强、中和弱三种不同强度,对不同干扰强度下种群相对密度进行单因素方差分析。结果表明,中等干扰强度下的种群密度显著高于其它两种强度下的种群密度($F_{2,13}=8.155$, $P=0.005$)。推测适度的人为干扰可能增加了栖息地内昆虫的种类和数量,对蛙类的生存和繁衍更为有利。但随着人为干扰强度的增强,对溪流沿岸植被的破坏更为剧烈,种群密度显著下降。

关键词:凹耳臭蛙; 地理分布; 生境选择; 种群密度; 人为干扰强度

The geographic distribution pattern and habitat selection of the Chinese concave-eared torrent frog in southern Anhui Province

FENG Jun[1], ZHANG Jihui[1], SHU Yilin[1], YAO Long[1], TANG Xinsheng[2], WU Hailong[1,*]
1 *College of Life Sciences, Anhui Normal University, Key Laboratory for the Conservation and Utilization of Important Biological Resources of Anhui Province, Wuhu* 241000, *China*
2 *College of Life and Environment Science, Huangshan University, Huangshan* 245041, *China*

Abstract: The concave-eared frog, *Odorrana tormota*, is a rare species native to eastern China and the first non-mammalian vertebrate demonstrated to both produce and perceive ultrasonic frequencies. In the current study, for the first time, we reported the geographic distribution, habitat selection, and relationship between different disturbance intensity and relative population density of the species in southern Anhui Province. A total of 32 different mountain streams were investigated from April 2012 to August 2013. Among these investigated streams, the species was detected in 16 streams. Except for Xiangxi and Fuxi in Huangshan District, this is the first record of the species in the remaining14 streams. The distribution range of the species within the stream varied among different streams from the shortest range less than 1 km to the longest range of more than 20 km. The 16 mountain streams are the tributaries of Qinyi, Xin'an, or Shuiyang river, and the species was not found in any tributary of other rivers (such as Qiupu and Qimen river, etc.) in the region. These results suggested that at

基金项目:国家自然科学基金项目(31370537); 高等学校博士学科点专项科研基金(20133424110006)
收稿日期:2013-12-22;　　**网络出版日期**:2014-11-03
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: whlong@ mail.ahnu.edu.cn

present, the concave-eared frog of southern Anhui Province have survived in some isolated mountain streams linked by Qinyi, Xin'an, or Shuiyang rivers. In order to reveal the strategies of habitat selection of the species, we tested the differences in frog numbers among six different habitat types including trees, shrubs, or herbaceous plants along river banks, benchland and rocks or other objects above the water. In total, 222 individuals from 10 different mountain streams were analyzed and significant difference in number of frogs was detected ($F_{5,54}=25.75$, $P<0.001$) in herbaceous vegetation and shrubland, which harbored significantly more individuals than other habitat type, suggesting that the two habitat types along mountain streams play an important role in species' proper survival and reproduction during the nighttime. It should be noted that, although the recorded frog number in arbors was significantly less than in herbaceous vegetation and shrubland during the surveyed period, arbors might provide indispensable hideout place for the species during the daytime. Additionally, we evaluated the impact of human disturbance on relative population density of the species. Initially, we obtained the relative population density for each of the 16 streams through a calling-based method. The number of male frogs' calls in the 100-m range along each stream was recorded and used as the value of relative population density. We classified human disturbance on a three-point scale: strong, medium, and weak according to the degree of destruction as a result of human activity on the habitat of the species. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to test the effects of human disturbance on relative population density. The results showed that human disturbances significantly affected population density ($F_{2,13}=8.155$, $P=0.005$). The least significant difference (LSD) tests revealed that relative population density under medium disturbance intensity was the highest. Our findings suggested that moderate anthropogenic interference might increase the species number and quantity of insects and then attract more frogs. However, with the increase of disturbance intensity, the damage to vegetation along the stream is more intense causing dramatic decrease in population density.

Key Words: *Odorrana tormota*; geographic distribution; habitat selection; population density; human disturbance

凹耳臭蛙是中国特有的一种小型山溪蛙,其雄性个体鸣声独特,似金属摩擦音。上世纪七十年代吴贯夫等人[1]在黄山温泉发现并命名,将其归属于蛙科(Ranidae)蛙属(*Rana*)。此后,众多学者针对其分类地位开展了一系列的研究[2-7],综合形态学、发育生物学以及分子系统学等多方面的证据,目前已取得了较为一致的意见:将该蛙归属于臭蛙属 *Odorrana*,学名 *Odorrana tormota*[8]。

自上世纪八十年代开始,凹耳臭蛙独特的鸣声引起国内外学者的广泛关注。中外科学家联合对凹耳臭蛙声通讯及其机制进行了深入的研究,并在声通讯行为、中耳机制和听觉生理等方面获得了一系列重要成果[9]。凹耳臭蛙是第一个被证实以超声信号通讯的非哺乳脊椎动物,这种通讯方式是该物种在长期进化过程中对强环境噪声适应的结果[10-11];该物种雌雄性别对高频声的响应上存在显著的差异,雄性能对雌性的高频声发出快速响应,并能准确定位,而雌性能对雄性正常范围的求偶鸣声做出反应,但对高频声没有相应的反应,这是迄今发现听觉性别差异如此巨大的脊椎动物[12-13]。与其声通讯领域所取得的成就相比,有关该物种种群生物学、种群生态学以及种群遗传学等方面的很多问题亟待调查和研究[14-18],如该物种种群数量和分布、生境选择、种群扩散机制、种群遗传变异及其空间分布格局等,这些问题直接涉及到该物种的生存与繁衍。

早期调查结果认为,该物种呈点状分布于安徽黄山以及浙江建德和安吉等地[19]。最近发现浙江天台也有该物种的分布,该物种的分布范围因此向东推移 2 个经度[8]。本研究小组在过去的野外考察过程中,曾在距黄山 100 多公里的泾县桃岭采集到该物种(未发表资料)。这些信息暗示,凹耳臭蛙的种群地理分布可能远非早期的情形。地理分布是认识物种分布现状、起源、进化、迁移及保护的重要方面。本研究针对皖南地区凹耳臭蛙的种群分布范围、生境特征和种群生存状况进行调查和研究,旨在阐明皖南地区该物种的地理分布格局、生境选择以及人为干扰与种群密度之间的关系,为进一步探讨该物种种群历史、扩散机制以及景观遗传学的相关问题奠定基础。

1　调查区域自然概况

调查涉及皖南 9 县 1 区,即黄山区、歙县、绩溪、泾县、旌德、宁国、休宁、黟县、祁门和石台(北纬 29°35′34″—30°31′43″,东经 117°24′42″—118°49′46″)。该区地处中亚热带北缘、常绿阔叶林、红黄壤地带,属亚热带季风湿润气候区。地形以山地丘陵为主,境内峰奇岭峻,以黄山莲花峰海拔最高 1864 m。主要气候特点是四季分明,春秋短,夏冬长,热量丰富,雨水充沛,年平均气温 15—16 ℃,降水量在 1390—1710 mm。主要河流有青弋江、水阳江和新安江等,其中,青弋江和水阳江属于长江水系,新安江属于钱塘江水系。青弋江由发源于黟县的美溪河、石台县的舒溪河、黄山北麓的麻溪河以及绩溪的徽水汇集而成,跨石台、祁门、黄山区、黟县、歙县、旌德、泾县等 11 个县(市、区)。黄山桃花溪源于桃花峰(1460 m)北侧,经汤泉溪(温泉)、逍遥溪(汤口)、香溪向北转至谭家桥,经麻川河,注入青弋江,因此,桃花溪也是青弋江的源头之一。新安江位于皖南的最南端,属钱塘江水系的上游,自源头起,流经休宁、祁门、屯溪、歙县,至皖、浙省界街口,注入新安江水库,沿岸支流众多。黄山浮溪源于浮丘峰(1683 m),经桃花峰南坡脚下,沿东南方向经丰乐河注入新安江。水阳江发源于天目山西麓,由西津河、中津河和东津河汇集而成,自源头起,流经皖南的绩溪、旌德、宁国等 10 个县(市)。

2　研究方法

2.1　调查地点及路线设置

2010 年 4 月至 2013 年 8 月,根据凹耳臭蛙的生境特点,结合卫星图片信息,在上述地区布设调查地点(表 1)。对预设的调查地点在白天进行实地考察,观察记录地形地貌,溪水落差,设计调查路线,记录植被类型、人为干扰强度、气温、水温、pH 值等生态因子。根据凹耳臭蛙的活动习性,路线调查从 18:00 开始至22:00 结束,部分地点调查时间延迟至次日凌晨。首先,根据凹耳臭蛙特殊的鸣声预判是否有该物种,然后根据鸣声进行定位,拍照并采集标本,获得标本或照片即视为该区域有该物种分布。对采集到标本的溪流,调查该物种分布的海拔范围。

2.2　调查工具

高亮度矿灯(雅格野外照明灯)、GPS 手持定位仪(GARMZN—Vista)、照相机(Nikon D80)、温度计和 pH 计(Smarttester CP—401)等。

2.3　种群相对密度和人为干扰强度

据文献记录[14],凹耳臭蛙能够栖息在多种小生境中,包括:溪流中突出水面的石头、低矮的草本、灌木叶片以及沿岸乔木的枝叶等。由于该物种呈立体分布,而且,山溪地形地势变化无常,难以利用传统的样方法对其种群密度进行统计。本研究采用统计调查路线单侧每 100 m 长度范围内记录到的鸣声数量作为其种群的相对密度,即:调查者沿一个方向匀速行走,记录路线单侧(溪流沿岸植被更为连续的一侧)所有凹耳臭蛙的鸣声,以三位不同调查者所记录鸣声数量的平均值代表该路线单侧凹耳臭蛙的种群密度。需要指出的是,在实际调查过程中,所记录的鸣声均为雄性发出,因此,该密度实际上是雄性的密度,不包括雌性个体。

调查区间:由于不同溪流凹耳臭蛙的分布范围差别很大,有些溪流仅局限在不足 1 km 的范围内,而另外一些溪流其分布范围超过 20 km,而且,同一溪流不同区段的种群密度也有差别。本研究在调查种群相对密度时,首先通过预调查,确定该溪流鸣声最为集中的区域,并以此为中心分别向上(海拔较高的方向)和向下(海拔较低的方向)各行走 400 m。因此,每条溪流的实际调查路线长度为 800 m。

调查时间:由于鸣声是雄性个体的求偶广告,繁殖结束后,鸣叫也就结束了,因此,本研究针对凹耳臭蛙种群相对密度的调查主要集中在该物种的繁殖盛期开展,即每年的 4 月中下旬至 5 月中下旬。此外,凹耳臭蛙雄性个体的鸣叫行为受天气、温度等因素影响,不同时间段的鸣叫频度也不一样,因此,针对种群相对密度的鸣声统计,均选择在晴天日落之后 19 点至 20 点的时间段内进行,以最大限度地减小由于上述因素导致对不同分布点凹耳臭蛙种群相对密度的统计误差。

为了检测人为干扰强度对种群密度的影响,本文根据人为活动对凹耳臭蛙栖息地植被的影响程度,将干扰强度分为强、中和弱三个不同的等级。强干扰是指人为活动直接破坏溪流沿岸的植被类型(乔木、灌木和草丛),导致某些植被类型完全消失;中度干扰是指人为活动对溪流沿岸植被有影响,但未导致植被类型消失;弱干扰是指人为活动较少,基本没有对溪流沿岸植被产生影响。

2.4 凹耳臭蛙的生境选择

为了进一步明确凹耳臭蛙对不同生境的利用频率,根据野外调查的结果,将该物种的小生境细分为乔木、灌木、草本植物、岩石、沙滩以及突出水面的其它物体(如倒伏的树干)等。随机选择不同的溪流,统计各溪流密度相对较高的区间(通常是海拔分布范围的中间段)不同小生境中凹耳臭蛙的数量。

2.5 数据分析

利用 SPSS11.5 对不同人为干扰强度下的各分布点凹耳臭蛙种群密度数据类型进行检验,结果表明数据符合正态分布;对种群密度进行了单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA),并使用最小显著差数法(least significant difference, LSD)进行均数间的多重比较。

对不同小生境中蛙的数量数据类型进行分析,结果表明该数据不符合正态分布;在 R2.13.0 软件中使用广义线性模型(generalized linear model, GLM)对各小生境中蛙的数量进行了分析;使用泊松分布模型建立模型,根据模型的 *HF*(残差/*df*)值判定该数据组与泊松分布的拟合程度,结果显示 $HF<1$,表明该数据组与二项分布吻合;利用 *F* 检验对所获得的模型进行分析[20];使用 LSD 法对不同小生境的凹耳臭蛙数量均数间进行多重比较。

3 结果

3.1 皖南凹耳臭蛙种群地理分布

本研究共调查皖南 32 条不同的山溪,其中 16 条溪流中发现并采集了凹耳臭蛙样本。除黄山区的香溪和浮溪具文献记录外,其它 14 个分布点均为首次报道。各调查点位置信息见表 1,16 个分布点从行政区划上来看,涉及皖南 7 县 1 区(图 1),即泾县(桃岭和西坑)、旌德(程坑河)、绩溪(大漳河)、宁国(王家岭)、歙县(大溪源)、休宁(六股尖)、黟县(莲花坑、章岭脚、林家)和黄山区(汤口镇的桃花溪和浮溪、焦村镇的九龙峰和十里山保护区、谭家桥镇的留杯荡等)。从图 1 可以看出,凹耳臭蛙在皖南分布的最北端位于泾县境内青弋江的一个支流——汀溪上游的桃岭坑(30°31′43″, 118°38′33″);最南端位于休宁县的六股尖(29°35′34″, 117°45′02″)。从表 1 可以看出,该物种的海拔分布范围为 80—800 m,但在不同山溪中的海拔分布范围差别明显。而且在同一溪流中的分布往往因植被的变化而不连续,只在特定的溪段中才有发现。

表 1 本研究调查地点数据信息

Table 1 Information of sites surveyed in this study

地区 Region	调查地点 Locations	分布状况 Distribution or not	中心点位置经纬度 Latitude and longitude of the center sites	水系 Rivers	海拔范围/m Range of altitudes	调查期间温度/℃ Temperature during the investigations
泾县	1. 桃岭坑	+	30°31′43″, 118°38′33″	青弋江	80—650	18—28
	2. 西坑	+	30°28′53″, 118°33′57″	青弋江	350—500	19—26
旌德	3. 山坝河	-	30°25′25″, 118°35′58″	水阳江	200—400	22—27
	4. 程坑	+	30°23′19″, 118°44′29″	水阳江	120—420	23—30
	5. 凫阳河	-	30°22′44″, 118°37′54″	水阳江	200—350	23—28
	6. 仕川河	-	30°19′50″, 118°39′59″	水阳江	200—350	22—27
宁国	7. 王家岭	+	30°20′40″, 118°42′27″	水阳江	210—270	13—30
绩溪	8. 大漳河	+	30°06′58″, 118°47′20″	新安江	440—800	25—34
歙县	9. 大溪源	+	30°05′22″, 118°49′46″	新安江	390—600	16—33

续表

地区 Region	调查地点 Locations	分布状况 Distribution or not	中心点位置经纬度 Latitude and longitude of the center sites	水系 Rivers	海拔范围/m Range of altitudes	调查期间温度/℃ Temperature during the investigations
黄山区	10. 湖深潭	+	30°19′55″, 118°05′39″	青弋江	150—350	20—26
	11. 富沿坑	+	30°19′35″, 118°06′13″	青弋江	200—400	20—26
	12. 留杯荡	+	30°08′16″, 118°19′27″	青弋江	330—430	17—24
	13. 九龙峰	+	30°05′48″, 118°01′46″	青弋江	350—500	16—24
	14. 浮溪	+	30°04′46″, 118°08′55″	新安江	390—650	18—28
	15. 香溪	+	30°04′26″, 118°11′16″	青弋江	380—500	16—30
休宁	16. 六股尖	+	29°35′34″, 117°45′02″	新安江	400—540	19—30
黟县	17. 莲花坑	+	30°04′15″, 117°55′22″	青弋江	300—400	20—33
	18. 章岭脚	+	30°01′42″, 117°49′50″	青弋江	350—500	20—34
	19. 林家	+	30°01′37″, 117°49′57″	青弋江	300—430	20—34
	20. 方坑	-	29°59′15″, 117°51′30″	新安江	300—500	20—34
	21. 宏村	-	29°58′36″, 117°59′44″	新安江	200—350	21—31
石台	22. 利源	-	30°08′20″, 117°24′42″	秋浦河	200—450	25—35
	23. 奇峰	-	30°04′06″, 117°25′15″	秋浦河	300—400	25—35
	24. 双河口	-	30°03′46″, 117°28′49″	秋浦河	350—500	25—35
祁门	25. 鸦坑	-	30°01′44″, 117°41′11″	秋浦河	250—500	25—36
	26. 观音堂	-	30°01′30″, 117°31′20″	祁门河	200—600	24—35
	27. 赤岭	-	30°01′29″, 117°32′47″	秋浦河	250—430	25—36
	28. 历溪	-	30°00′38″, 117°28′20″	祁门河	300—530	24—30
	29. 光华	-	30°00′35″, 117°43′16″	青弋江	250—400	25—35
	30. 大沅头	-	29°59′22″, 117°45′23″	祁门河	300—420	25—35
	31. 吴思源	-	29°47′24″, 117°47′10″	新安江	300—450	24—36
	32. 大坑源	-	29°44′42″, 117°47′46″	新安江	200—400	24—36

+表示该调查点有凹耳臭蛙分布,-表示调查过程中未发现该物种分布

值得注意的是,本次调查发现的凹耳臭蛙分布点均位于青弋江、新安江或水阳江水系支流的源头(图 1)。16 个分布点中有 6 个位于黄山区,即黄山风景区及其周边地区,这个区域内的凹耳臭蛙分别位于青弋江(香溪、九龙峰、留杯荡、富沿坑、湖深潭)和新安江(浮溪)的支流源头;此外,黟县的章岭脚、莲花坑和林家,泾县的桃岭坑和西坑也位于青弋江中上游支流的源头;旌德的程坑和宁国的王家岭位于水阳江的支流源头;绩溪的大漳河、歙县的大溪源和休宁的六股尖均位于新安江的支流源头。相比之下,与上述三个水系不相连的所有调查点均没有发现该物种。

3.2　凹耳臭蛙的生境选择

对 10 个分布点 222 只凹耳臭蛙生境选择的统计结果显示,在夜晚活动周期内,不同生境中蛙的数量存在极显著差异($F_{5,54}=25.75$, $P<0.001$)。LSD 检测结果显示,草本植物上数量为最高(9.60±3.27),灌木上次之(5.60±2.22),且显著的高于其他生境类型中蛙的数量,而其他生境类型中蛙的数量均无显著差异(表 2)。

3.3　不同干扰强度对凹耳臭蛙种群密度的影响

凹耳臭蛙不同分布地区的种群相对密度以及人为干扰强度见表 3。从表 3 可以看出,泾县桃岭坑和歙县大溪源种群密度最高,均为 17 只·100 米$^{-1}$;而黄山区的留杯荡密度最低,仅 3 只·100 米$^{-1}$。利用 SPSS11.5 对不同干扰强度下的种群密度进行方差分析,使用 LSD 法进行均数间的多重比较。结果显示,不同强度干扰下凹耳臭蛙种群密度存在显著差异($F_{2,13}=8.155$, $P=0.005$)(图 2),中度干扰下种群密度最高(13.13±3.14 只·100 米$^{-1}$),但强干扰与弱干扰条件下的种群密度并无显著差异,可能与强干扰分布点的数量较少有关。

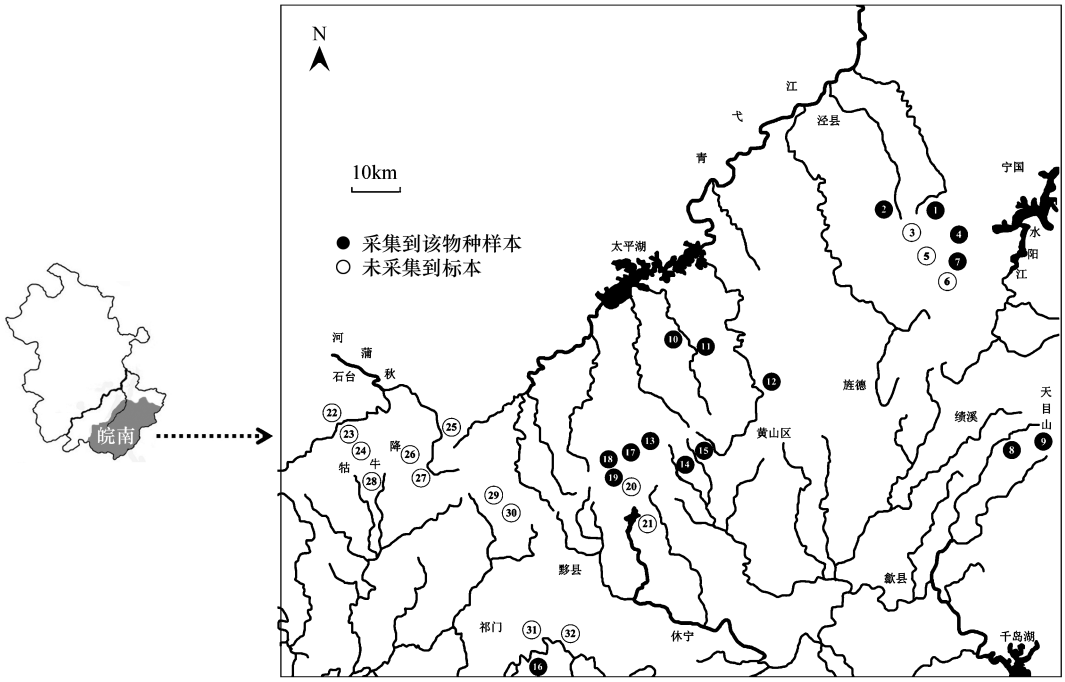

图 1 皖南凹耳臭蛙种群地理分布及主要水系示意图

Fig.1 Geographical distribution of concaved-eared frog and the main water systems in southern Anhui province

黑色圆圈表示采集到该物种样本,白色圆圈代表未采集到标本; 图中数字代表各调查地点,序号与表 1 中的名称顺序一致

表 2 10 个分布点 222 只凹耳臭蛙对不同生境的选择

Table 2 Statistics of habitat selection of 222 individuals from 10 different distribution areas of the concaved-ear frog

溪流 Streams	生境类型 Habitat type					
	乔木 Arbor	灌木 Shrub	草本 Herb	石块 Ruck	沙滩 Sandy beach	其他 Other objects above water
香溪	2	1	16	6	3	3
浮溪	1	9	10	3	2	2
桃岭坑	2	8	15	2	1	1
西坑	1	5	9	1	2	1
王家岭	3	6	8	1	2	0
大溪源	2	6	9	3	1	2
九龙峰	2	4	7	1	0	1
程坑	1	5	8	3	2	2
大漳河	2	5	7	3	0	1
六股尖	0	7	7	2	2	1
合计 Total	16	56	96	25	15	14
平均数±标准差 Average±standard deviation	1.6±0.84[c]	5.6±2.22[b]	9.6±3.27[a]	2.5±1.51[c]	1.5 ±0.97[c]	1.4±0.84[c]

a, b, c 表示不同生境中蛙的数量差异达到 0.05 的显著性水平

4 讨论

凹耳臭蛙是一种小型山溪蛙类,由于叫声独特,种内具有超声通讯功能而引起国内外相关专家的广泛关注[9,16]。自该物种被命名以来,更多的研究集中在对该物种分类地位以及种内通讯机制等方面,而鲜有针对该物种种群生态学的研究。本研究首次针对皖南凹耳臭蛙地理分布、生境选择以及人为干扰强度对种群密度的影响进行了初步的分析和研究。

表 3　凹耳臭蛙 16 个分布点种群密度、植被类型及人为干扰强度

Table 3　Population density, vegetation type and intensity of human disturbance of the sixteen distribution areas surveyed in this study

溪流 Streams	种群密度/(只·100 米$^{-1}$) Population density	人为干扰强度 Intensity of human disturbance	植被类型 vegetation type		
			草本植物 Herbs	灌木丛 Shrubs	乔木 Arbors
香溪	7	强 strong	羊蹄 *Rumex japonicus*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、粗齿冷水花 *Pilea sinofasciata*、灯芯草 *Juncus effusus* 等	水马桑 *Weigcla japonica*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata*、腊莲绣球 *Hydrangea strigosa* 等	盐肤木 *Rhus chinensis*、刺槐 *Robinia psedoacacia* 等
浮溪	9	中 medium	千里光 *Senecio scandens*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、垂盆草 *Sedum sarmentosum*、一年蓬 *Erigeron annuus* 等	野蔷薇 *Rosa multiflora*、油茶 *Camellia oleifera*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	盐肤木 *Rhus chinensis*、木蜡树 *Rhus sylvestris* 等
九龙峰	7	弱 weak	粗齿冷水花 *Pilea sinofasciata*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、鹅观草 *Roegneria kamoji*、灯芯草 *Juncus effusus* 等	油茶 *Camellia oleifera*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata*、腊莲绣球 *Hydrangea strigosa* 等	香榧 *Torreya grandis*、华东野胡桃 *Juglans cathayensis* 等
留杯荡	3	强 strong	千里光 *Senecio scandens*、垂盆草 *Sedum sarmentosum*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、马兰 *Kalimeris indica* 等	尖连蕊茶 *Camellia caspidata*、油茶 *Camellia oleifera*、野蔷薇 *Rosa multiflora* 等	野漆树 *Toxicodendron sylvestre*、华东楠 *Machilus leptophylla* 等
富沿坑	16	中 medium	鹅观草 *Roegneria kamoji*、灯芯草 *Juncus effusus*、五节芒 *Miscanthus floridulu* 等	水马桑 *Weigcla japonica*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata*、野蔷薇 *Rosa multiflora* 等	盐肤木 *Rhus chinensis*、华东野胡桃 *Juglans cathayensis* 等
湖深潭	15	中 medium	垂盆草 *Sedum sarmentosum*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、一年蓬 *Erigeron annuus* 等	油茶 *Camellia oleifera*、水马桑 *Weigcla japonica* 等	野漆树 *Toxicodendron sylvestre*、枫香 *Liquidambar formosana* 等
桃岭坑	17	弱 weak	苦竹 *Pleioblastus amarus*、阔叶箬竹 *Indocalamus latifolius*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、悬铃叶苎麻 *Boehmeria tricuspis* 等	油茶 *Camellia oleifera*、阔叶十大功劳 *Mahonia bealei*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	臭椿 *Ailanthus altissima*、枫杨 *Pterocarya stenoptera*、青檀 *Pteroceltis tatarinowii* 等
西坑	12	中 medium	苦竹 *Pleioblastus amarus*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、博落迴 *Macleaya cordata*、中华蓼 *Polygonum sinicum* 等	油茶 *Camellia oleifera*、乌药 *Lindera strychnifolia*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	青檀 *Pteroceltis tatarinowii*、盐肤木 *Rhus chinensis* 等
程坑	13	弱 weak	五节芒 *Miscanthus floridulu*、多花黄精 *Polygonatum cyrtonema*、荞麦叶大百合 *Cardiocrinum cathayanum* 等	木半夏 *Elaeagnus multiflora*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata*、油茶 *Camellia oleifera* 等	油桐 *Aleurites fordii*、香榧 *Torreya grandis*、山核桃 *Carya cathayensis* 等
王家岭	10	中 medium	五节芒 *Miscanthus floridulu*、悬铃叶苎麻 *Boehmeria tricuspis*、野芝麻 *Lamium bartatum* 等	水马桑 *Weigcla japonica*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	山核桃 *Carya cathayensis*、银杏 *Ginkgo biloba*、臭椿 *Ailanthus altissima* 等
大漳河	8	弱 weak	苦竹 *Pleioblastus amarus*、马唐 *Digitaria sanguinalis*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、鹅观草 *Roegneria kamoji* 等	崖花海桐 *Pittosporum illicioides*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	木蜡树 *Rhus sylvestris*、油桐 *Aleurites fordii*、化香 *Platycarya strobilacea* 等

续表

溪流 Streams	种群密度/（只·100 米$^{-1}$）Population density	人为干扰强度 Intensity of human disturbance	植被类型 vegetation type		
			草本植物 Herbs	灌木丛 Shrubs	乔木 Arbors
莲花坑	7	弱 weak	五节芒 *Miscanthus floridulu*、苦竹 *Pleioblastus amarus*、垂盆草 *Sedum sarmentosum*、中华蓼 *Polygonum sinicum* 等	野蔷薇 *Rosa multiflora*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	臭椿 *Ailanthus altissima*、刺槐 *Robinia psedoacacia* 等
章岭脚	12	中 medium	五节芒 *Miscanthus floridulu*、苦竹 *Pleioblastus amarus*、鸡矢藤 *Paederia scandens*、灯芯草 *Juncus effusus* 等	青灰叶下珠 *Phyllanthus glaucus*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	枫香 *Liquidambar formosana*、香榧 *Torreya grandis* 等
林家	10	弱 weak	五节芒 *Miscanthus floridulu*、苦竹 *Pleioblastus amarus*、鸡矢藤 *Paederia scandens*、悬铃叶苎麻 *Boehmeria tricuspis* 等	野蔷薇 *Rosa multiflora*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	香榧 *Torreya grandis*、银杏 *Ginkgo biloba* 等
六股尖	9	弱 weak	五节芒 *Miscanthus floridulu*、苦竹 *Pleioblastus amarus*、鸡矢藤 *Paederia scandens*、垂盆草 *Sedum sarmentosum* 等	青灰叶下珠 *Phyllanthus glaucus*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata*、腊莲绣球 *Hydrangea strigosa* 等	银杏 *Ginkgo biloba*、盐肤木 *Rhus chinensis*、刺槐 *Robinia psedoacacia* 等
大溪源	17	中 medium	苦竹 *Pleioblastus amarus*、五节芒 *Miscanthus floridulu*、鹅观草 *Roegneria kamoji*、鸡矢藤 *Paederia scandens* 等	阔叶十大功劳 *Mahonia bealei*、尖连蕊茶 *Camellia caspidata* 等	木蜡树 *Rhus sylvestris*、油桐 *Aleurites fordii*、盐肤木 *Rhus chinensis* 等

4.1　皖南凹耳臭蛙种群地理分布格局

根据凹耳臭蛙的生活习性结合遥感资料和卫星图片,本次调查区域覆盖皖南 9 县 1 区 32 个不同的调查点(山溪),发现其中的 16 个点有凹耳臭蛙分布,涉及 7 县 1 区(表 1)。除黄山区的香溪和浮溪为文献记录的分布点之外,其余 14 个分布点均为首次报道。进一步分析各分布点的水系关系,发现这些分布点均位于青弋江、新安江或水阳江的支流源头。相比之下,与这些水系没有联系的 9 个调查点均未发现该物种的分布(表 1,图 1)。不难看出,皖南凹耳臭蛙的分布与青弋江、新安江和水阳江三大水系关系密切,但并非这三大水系的所有支流都有该物种的分布,相反,该物种只是间断的分布在部分支流的中上游。因此,皖南现存凹耳臭蛙呈现出以青弋江、新安江和水阳江三大水系为纽带的间断分布格局。

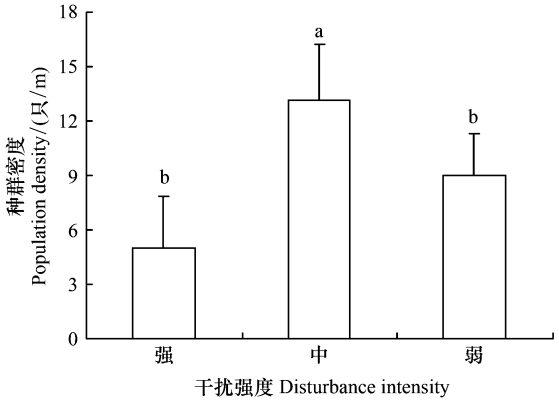

图 2　3 种不同人为干扰程度下凹耳蛙种群密度均数间的多重比较

Fig.2 Multiple comparisons of the means of population densities under three different human disturbances

a, b 表示种群密度均数差异达到 0.05 的显著性水平

4.2　凹耳臭蛙的生境选择

了解动物的栖息地特征及其生境选择策略能够为制定科学的保护策略提供重要的理论依据,避免人为活动干扰对动物的生存和繁衍产生灾难性的影响。此前的研究曾对黄山香溪和浮溪的凹耳臭蛙生境选择进行过初步的统计分析,发现该物种对不同小生境的选择策略因溪流地形地面和溪水落差的变化而变化,在地势平缓溪水落差较小的区域,凹耳臭蛙主要栖息在灌丛上;当地势陡峭溪水落差较大时,主要选择临溪乔木上[14]。由于该研究仅针对两条溪流、不同年份的数据进行统计,具有一定的局限性。本研究根据 2012 年 4—7 月份 10 个不同分布点 222 只凹耳臭蛙的调查数据,采用非参数法对不同生境中凹耳臭蛙数量差异的显著性进行分析。结果表明,该物种对不同生境的选择具有显著的差异,草本植物和灌丛是该物种夜晚活动周期内最主要的栖息生境(表 2)。暗示草本植物和灌丛对凹耳臭蛙的生存(捕食)和繁衍(求偶)具有重要意义。不幸的是溪流沿岸的草本植物和灌丛极其容易被破坏,人们通常更重视对木本植物的保护。需要指出的是,由于技术因素,调查过程中对栖息在乔木枝叶上的蛙类数量统计可能偏低。实际上,该物种现存所有分布点都保存了发育良好的森林生态系统,乔木对该物种非活动期的隐蔽可能具有不可替代的作用。

4.3　人为干扰强度与凹耳臭蛙种群密度之间的关系

早期针对凹耳臭蛙的研究地点多集中在黄山风景区的温泉(即桃花溪)和浮溪。温泉位于香溪的上游,也是该物种模式标本产地。随着旅游业的快速发展,人为干扰对该物种的影响日益明显,种群数量明显下降。人为干扰对凹耳臭蛙的影响分为两个层面,一是直接干扰,即由于教学和科研的需要对该物种的采集;另一种是间接干扰,即由于道路拓宽或者修建建筑物等人类活动导致其栖息地的破坏和丧失。但凹耳臭蛙的食用价值不大,普通居民对这种蛙并不感兴趣。教学和科研单位通常都具备较好的保护意识和责任。因此,直接捕获对该物种的影响并不大,人为活动导致其栖息地的破坏和丧失是该物种生存和繁衍的真正威胁。本研究根据人类活动对其栖息地(溪流沿岸的植被类型)的破坏程度将干扰强度分为强、中和弱三个不同等级,以分布点溪流单侧每百米长度范围内蛙的数量作为种群的相对密度,对不同干扰强度下的种群密度进行单因素方差分析。结果表明中等干扰强度下的种群密度显著的高于其它两种干扰强度下的种群密度,而强干扰和弱干扰条件下蛙的种群密度差异不显著(表 3,图 2)。中等干扰条件下种群密度高可能与适度的人类活动增加了栖息地内昆虫的种类和数量有关,如各分布点有少量居民点的区域凹耳臭蛙的数量通常更高;当居民点密集,人类活动频繁导致溪流沿岸植被类型严重破坏时,蛙的数量明显下降甚至消失。强干扰和弱干扰条件下蛙的种群密度没有表现出显著的差异,可能与本研究强干扰型的分布点数量过少有关(仅黄山区的香溪和留杯荡)。

实际上,同一溪流不同区段的种群密度也因人为干扰强度的变化而发生变化。溪流中上游居民较少,表现为中度的人为干扰,种群密度最大;由此往海拔较高的上游,人为干扰变弱,沿岸植被类型虽然更完整,但蛙的密度也逐渐降低;同样,向海拔较低的下游,由于人为活动的增强,沿岸植被类型破坏程度更高,蛙的密度明显降低直至消失。汤口镇的浮溪和泾县的汀溪凹耳臭蛙的分布非常明显的体现了上述特征。

4.4 保护建议

根据本研究针对凹耳臭蛙生境选择的研究结果,草丛和灌丛是凹耳臭蛙临溪栖息的最重要的生境类型,因此,保护该物种分布区溪流沿岸植被类型的完整性,在保护乔本植物的同时,注意保护溪流沿岸的草灌丛对该物种的生存和繁衍具有重要意义。汤口镇香溪段直至九十年代,凹耳臭蛙的种群数量还相当丰富,但随着铜黄高速以及新城镇的建设,部分区域沿溪植被破坏殆尽,凹耳臭蛙种群数量明显减少。

不同干扰强度对凹耳臭蛙种群密度的影响分析结果显示,中等干扰实际上有利于种群密度的增加。这暗示人类活动对动物的生存和繁衍不一定都是负面的影响,关键是如何控制干扰强度。人类活动对凹耳臭蛙的负面干扰主要是破坏其栖息地植被,只要沿溪植被能够不被破坏,对凹耳臭蛙的负面影响就不会太大。泾县的汀溪是目前发现的凹耳臭蛙分布范围最广的溪流,海拔区间在 80—650 m,长度超过 20 km,跨越多个行政村,除局部植被类型为农田之外,都有该物种分布。

综上所述,对凹耳臭蛙的保护,关键是保护其栖息地及其植被类型的完整性。

致谢:黄山区林业局曹清平和林辉;绩溪县林业局洪国斌、歙县林业局周道锋、休宁县森林公安局谷常武、旌德县林业局向南海、鲍东琴和吕美昌;清凉峰歙县国家自然保护区王山青和九龙峰省级自然保护区曹新华等同志对野外调查提供了诸多帮助。安徽师范大学邵剑文教授对栖息地植被类型的物种进行了鉴定,胡好远教授对数据分析提供了建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

[1] 四川省生物研究所两栖爬行动物研究室. 蛙属一新种—凹耳臭蛙. 动物学报, 1977, 23(1): 113-115.
[2] 费梁, 叶昌媛, 黄永昭. 中国两栖动物检索. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1990: 124-126.
[3] Zhao E M, Chang H W, Zhao X L. Taxonimic Bibliography of Chinese Amphibia and Reptilian: Including Karyological Literature, Herpetological Series. Taiwan, China: Kaohsiung Fu-Wen Publishing Co. Ltd., 2000: 215-238.
[4] 李丕鹏, 陆宇燕, 吕顺清. 凹耳蛙的分类地位及蛙亚科一新属. 四川动物, 2006, 25(2): 206-209.
[5] 唐鑫生, 陈启龙, 黄松. 基于 12S rRNA 基因序列探讨凹耳蛙(无尾目, 蛙科)的分类地位. 动物分类学报, 2007, 32(3): 738-742.
[6] Su X, Wu X B, Yan P, Cao S Y, Hu Y L. Rearrangement of a mitochondrial tRNA gene of the concave-eared torrent frog, *Amolops tormotus*. Gene, 2007, 394(1/2): 25-34.
[7] Cai H X, Che J, Pang J F, Zhao E M, Zhang Y P. Paraphyly of Chinese Amolops (Anura, Ranidae) and phylogenetic position of the rare Chinese frog, *Amolops tormotus*. Zootaxa, 2007, 1531: 49-55.
[8] 费梁, 胡淑琴, 叶昌媛, 黄永昭. 中国动物志 两栖纲(中卷: 无尾目). 北京: 科学出版社, 2009: 1214-1219.
[9] 沈钧贤. 凹耳蛙声通讯研究重要进展与启示. 中国科学基金, 2006, 20(6): 321-322.
[10] Feng A, Narins P M, Xu C H. Vocal acrobatics in a Chinese frog, *Amolops tormotus*. Naturwissenschaften, 2002, 89(8): 352-356.
[11] Feng A S, Narins P M, Xu C H, Lin W Y, Yu Z L, Qiu Q, Xu Z M, Shen J X. Ultrasonic communication in frogs. Nature, 2006, 440(7082): 333-336.
[12] Shen J X, Feng A S, Xu Z M, Yu Z L, Arch V S, Yu X J, Narins P M. Ultrasonic frogs show hyperacute phonotaxis to female courtship calls. Nature, 2008, 453(7197): 914-916.
[13] Shen J X, Xu Z M, Yu Z L, Wang S, Zheng D Z, Fan S C. Ultrasonic frogs show extraordinary sex differences in auditory frequency sensitivity. Nature Communications, 2011, 2(6): 342-342.
[14] 吴海龙, 吴孝兵. 凹耳蛙的生境选择及其食性分析. 两栖爬行动物学研究, 2002, 9: 123-126.
[15] Li P P, Lu Y Y, Li A, Yu L N. The tadpole of a little-known frog, *Rana tormotus* Wu, 1977. Asiatic Herpetological Research, 2008, 11: 71-75.
[16] 李丕鹏. 凹耳蛙及无尾两栖动物发声系统形态学研究进展. 四川动物, 2010, 29(1): 151-155.
[17] Yan J C, Luo T L, Wu H L. Development and characterization of twelve polymorphic microsatellite loci for the Chinese concave-eared frog (*Odorrana tormota*). Conservation Genetics Resources, 2011, 3(2): 225-227.
[18] 李方, 疏义林, 吴海龙. 凹耳蛙 MHCⅡ类 B 基因第二外显子多态性分析. 生物多样性, 2012, 20(2): 184-192.
[19] 陈壁辉. 安徽两栖爬行动物志. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1991: 133-135.