

文章编号: 1000-0550(2008) 04-0670-06

石灰华扇 (Tu fa Fan) 沉积物中的微型生物多样性¹

王智慧^{1 3} 张朝晖^{2 3} 李建华¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院 长江水环境教育部重点实验室 上海 200092

2 复旦大学生物多样性科学研究所 生物多样性与生态工程教育部重点实验室 上海 200433

3. 贵州师范大学地理与生物科学学院 贵州省山地环境重点实验室 贵阳 550001)

摘 要 为了探索石灰华扇沉积物中微型生物多样性特征, 作者 2006 年 7~ 9 月对贵州中部马脚冲瀑布石灰华扇进行了野外生态学调查, 采集样品和标本 50 份。经室内初步分析和鉴定, 该瀑布石灰华扇中含有 4 大微型生物多样性类群共 25 个物种, 它们是蓝细菌 (Cyanobacteria) 1 个种, 原生动物 (Protozoan) 16 个种, 绿藻 (Green algae) 1 个种, 硅藻 (Diatoms) 7 个种。此外, 石灰华扇中还发现了苔藓植物 (Bryophytes) 6 个种。石灰华扇沉积物的形成, 是微型生物多样性—石灰华扇沉积相互作用的地质生态学结果。

关键词 微型生物多样性 蓝藻 原生动物 绿藻 硅藻 苔藓 石灰华扇

第一作者简介 王智慧 女 1969 年出生 在读博士 副教授 环境生态学 E-mail wangzhui222@126.com

通讯作者 李建华 E-mail lejianhua@mail.tongji.edu.cn

中图分类号 Q948.15 **文献标识码** A

微型生物 (Microorganism) 是指一类个体细微、体型微小、需要借助光学显微镜或电子显微镜才能方便鉴定的复杂微型生物类群^[1-2]。全球碳酸盐地区分布的岩溶沉积物中拥有十分丰富的微型生物多样性资源^[3-7], 广泛分布于地球表面热带、亚热带和温带区域环境之中, 主要包括了原生动物、硅藻、细菌、绿藻和真菌等, 是地球微型生物多样性在不同地质背景下的反映和表现。研究岩溶地区沉积物微型生物多样性资源, 对我们认识岩溶地区生物多样性资源的独特性和自然保护具有重要理论意义, 有助于我们分析岩溶生态系统的结构与功能, 并监测各类岩溶环境变迁与污染^[3-7]。

石灰华扇 (Tu fa fan) 是一类岩溶地区特有的多孔、扇状、淡黄色淡水碳酸钙沉积物, 一般在世界亚热带地区和温带岩溶山涧溪流型瀑布沉积环境中最为常见和典型^[8-13]。中国曾在西南岩溶山区有石灰华扇的记录^[14-15], 沉积规模可从几平方米到几百平方米。有关石灰华扇中的微型生物多样性研究, 国外曾有许多报道^[3-9], 但国内鲜见记载。本文以中国贵州中部马脚冲岩溶瀑布石灰华扇为典型代表, 初步探索石灰华扇微型生物多样性组成特征, 以期抛砖引玉, 为未来相关研究, 积累基础的科研资料和数据。

1 石灰华扇概况及研究方法

1.1 石灰华扇概况

石灰华扇位于贵州省贵阳市马脚冲瀑布, 该瀑布以石灰华扇沉积厚似马蹄而名。瀑布东经 106°54'102", 北纬 26°47'238", 海拔 1174 m。瀑布发育在白云岩上, 据实测, 瀑布高 42.6 m, 宽 14.4 m。水源为一山涧小溪流, 瀑布水流速约 1.4~1.8 m/s。不同季节水流量有显著变化。在马脚冲瀑布面上堆集了极为显著的扇状石灰华沉积物。扇状石灰华沉积物高 41.2 m, 宽 13.8 m, 厚度约 13 m, 弧长 21 m (图 1)。

石灰华扇附近岩溶地貌发育, 白云岩分布十分广泛, 在山涧溪流的强烈溶蚀和切割下, 形成了一系列岩溶峰丛—峡谷和峰丛—洼地组合景观。瀑布附近岩溶植被保存良好, 除水沟边多分布喜湿竹类植物外, 植物种类主要亚热带乔木树种组成。据资料^[16-17], 该地属亚热带高原性湿润季风气候, 年均气温 15°C, 1 月平均气温 4.9°C, 7 月平均气温 24°C, 年均降水量 1200 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 野外工作

野外工作以瀑布石灰华扇为中心, 在石灰华扇顶

¹ 国家自然科学基金 (批准号: 30460014), 国家人事部留学人员择优资助项目 [国人部发 (2003) 50 号] 及贵州省优秀科技教育人才省长专项基金 [黔科教 (2003) 04] 资助。

收稿日期: 2007-09-05 收修改稿日期: 2007-10-19

部、中央、底部和两侧边缘不同位置,各取样品和生物标本 5 份,总共采集样品和标本数 50 份。野外用小刀剥取生物标本和沉积物,用 500 ml 广口瓶收取水样,用 30 cm × 20 cm 封闭式聚乙烯塑料袋装水生生物标本。野外采集沉积物样品时,主要集中在沉积物表层 1~5 cm 深层进行取样。野外观察并记载沉积物和生物环境特征。野外工作时间:2006 年 6~9 月。

1.2.2 室内工作

原生动物鉴定^[17,18]:利用相差显微镜、倒置显微镜等,采用活体镜检的方法和技术鉴定水样中的原生动物。利用测微尺测定原生动物虫体大小。

蓝藻、硅藻、绿藻鉴定^[19]:制作临时装片,利用光学显微镜,借助中国现代藻类分类工具书,分析并鉴定藻类植物标本。

苔藓植物鉴定^[13~15]:采用形态观测和解剖方法,利用光学显微镜,实体解剖镜,借助中国现代苔藓植物分类工具书,分析并鉴定苔藓植物标本。

2 微型生物多样性组成

经作者初步鉴定和分析,石灰华扇沉积物中微型生物多样性组成十分丰富,包含了 4 大微型生物类群,即蓝细菌 (Cyanobacteria),原生动物 (Protozoan),绿藻 (Green algae),硅藻 (Diatoms)。此外,也有几种苔藓

(Bryophytes)被记录,涉及物种总数共有 31 种(见表 1、图 2)。现分述如下:

2.1 蓝细菌 Cyanobacteria

石灰华扇沉积物中最原始、最古老的原核生物类群,无细胞核仁和核膜结构,其祖先可追溯到至今 33~35 亿年以前,以细胞直接分离的方式繁衍后代。在马脚冲瀑布石灰华扇中有席藻 *Phormidium incrustatum* 1 种,主要分布于石灰华扇边缘钙华生境之中。

2.2 原生动物 Protozoan

石灰华扇沉积物中最常见、分布较广的真核、单细胞动物类群,其生活方式有异养、腐生、寄生和自养等不同方式。在作者调查的石灰华扇,发现种类十分丰富,共有 16 种,主要分布于激流生境之中的藓类植物群落丛中。这些原生动物是放射太阳虫 *Actinophrys sol*, 奇观盖氏虫 *Glaeseria mira*, 平足蒲变虫 *Vannella platypodia*, 坛状曲颈虫 *Cyphoderia ampulla*, 泥碳刺胞虫 *Acanthocystis tnfacea*, 似月形刺胞虫 *A. erinaceoides*, 卵形波豆虫 *Bodo ovatus*, 天鹅漫游虫 *Litonotus cygnus*, 薄漫游虫 *L. kmella*, 龙骨漫游虫 *L. carinatus*, 针棘匣壳虫 *Centropyxis aculeataaculeata*, 闪烁目虫 *Glucomascintillans*, 尾草履虫 *Paramecium caudatum*, 瓜形膜袋虫 *Cyclidium citrullus*, 钟形钟虫 *Vorticella campanula* 和纺锤全列虫 *Holosticha kessleri* 等。

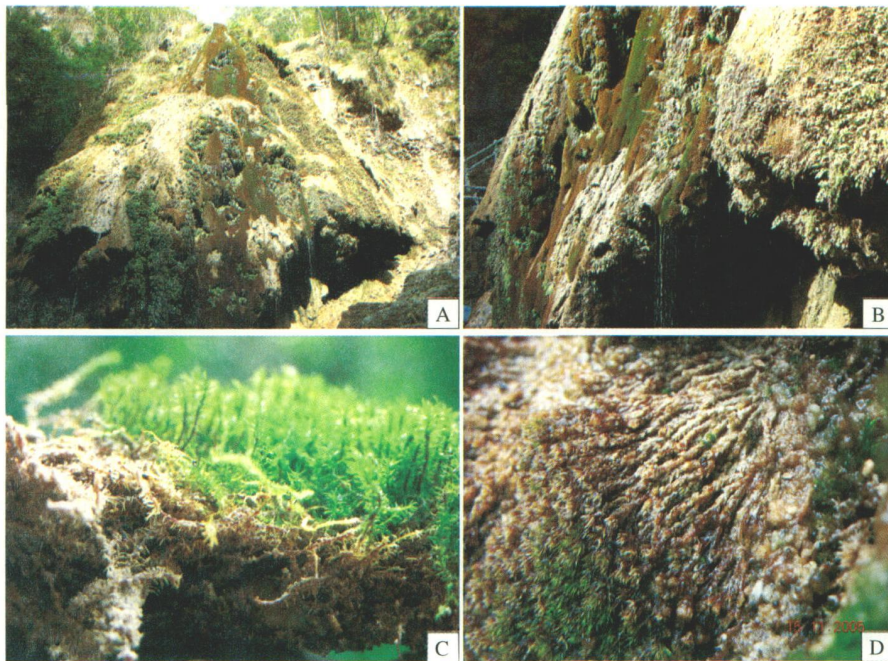


图 1 贵州马脚冲瀑布石灰华扇沉积环境及苔藓植被特征

A 石灰华扇外貌; B 石灰华扇前缘; C 钩喙净口藓; D 大叶石灰藓

Fig 1 Characteristics of deposition environment and bryophyte vegetation from a tufa fan at Horseshoof Waterfall, Guizhou

A Landscape of the tufa fan; B Front of the tufa fan; C *Gymnostomum recurvirostre*; D *Hydrogohium majusculum*

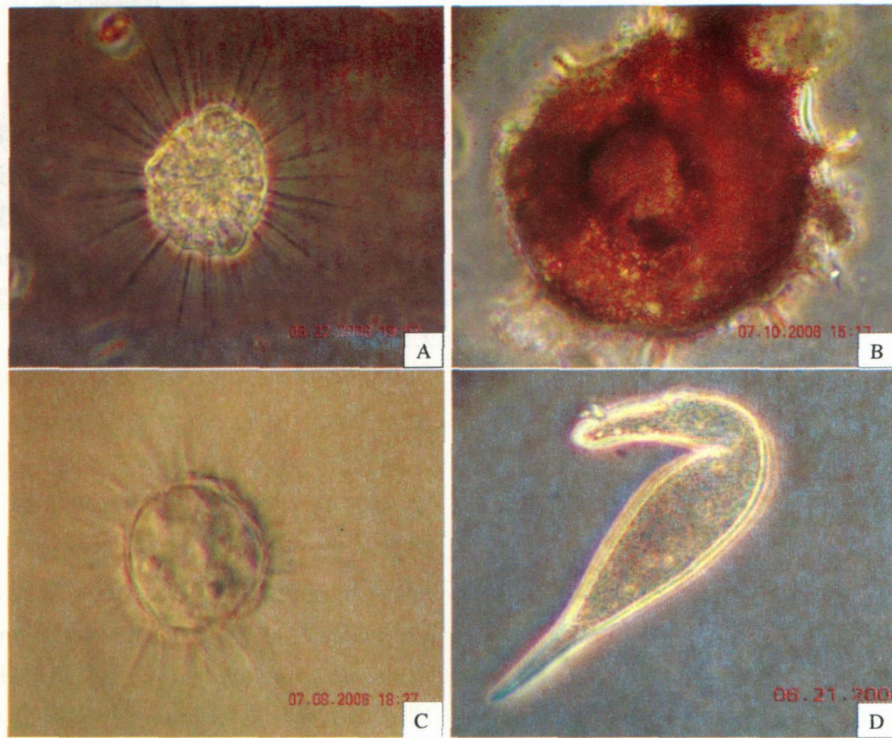


图 2 显微镜下石灰华扇中的部分微生物(放大 10×40倍)

A. 放射太阳虫; B. 针棘匣壳虫; C. 似月形刺胞虫; D. 天鹅漫游虫

Fig 2 Some microorganisms from a tufa fan under microscope (10×40)

A. *Actinophrys sol*; B. *Centropyxis aculeataaculeata*; C. *Acanthocystis erinaceoides*; D. *Litonotus cygnus*

表 1 贵州马脚冲瀑布石灰华扇微型生物多样性

Table 1 Biodiversity of microorganisms from a tufa fan at Horse's-hoof Waterfall, Guizhou

种名 Species	生长基质 Substrate	瀑布内生态分布 Distribution in waterfall
蓝细菌 Cyanobacteria		
席藻 <i>Phormidium incrustatum</i>	钙华	瀑布边缘生长
硅藻 Diatoms		
狭异极藻 <i>Gomphonema angustum</i>	钙华	瀑布激流下生长
尖布纹藻 <i>Gyrosigma acuminatum</i>	藓附生	瀑布激流下生长
舟形藻 <i>Navicula cryptotenella</i>	钙华	瀑布激流下生长
虱卵形藻 <i>Cocconeis pediculus</i>	钙华	瀑布边缘生长
微细桥弯藻 <i>Cymbella minuta</i>	钙华	瀑布激流下生长
优美细齿藻 <i>Denticula elegans</i>	藓附生	瀑布激流下生长
短缝藻 <i>Eunotia arca</i>	藓附生	瀑布激流下生长
原生动 Protozoan		
奇观盖氏虫 <i>Glaeseria mira</i>	钙华	瀑布边缘生长
平足蒲变虫 <i>Vannella platypodia</i>	钙华、藓附生	瀑布边缘及激流下生长
卵形波豆虫 <i>Bodo ovatus</i>	藓附生	瀑布激流下生长
针棘匣壳虫 <i>Centropyxis aculeataaculeata</i>	藓附生	瀑布生长
矛状鳞壳虫 <i>Euglypha laevis</i>	钙华	瀑布边缘生长
坛状曲颈虫 <i>Cyphalergia ampulla</i>	钙华	瀑布边缘生长
泥碳刺胞虫 <i>Acanthocystis tufaeca</i>	钙华	瀑布边缘生长
似月形刺胞虫 <i>Acanthocystis erinaceoides</i>	藓附生	瀑布激流下生长
弯斜头虫 <i>Loxocphalus plagius</i>	藓附生	瀑布激流下生长
放射太阳虫 <i>Actinophrys sol</i>	藓附生	瀑布激流下生长
天鹅漫游虫 <i>Litonotus cygnus</i>	藓附生	瀑布激流下生长

薄漫游虫 <i>Litonotus km ella</i>	藓附生	瀑布激流下生长
龙骨漫游虫 <i>Litonotus carinatus</i>	藓附生	瀑布激流下生长
闪烁目虫 <i>Glaucana scintillans</i>	藓附生	瀑布激流下生长
似后毛虫 <i>Opishotrida similis</i>	钙华	瀑布边缘生长
锐利楯纤虫 <i>Apilisca lynceus</i>	钙华	瀑布边缘生长
绿藻 Green algae		
新月藻 <i>Closterium striolatum</i>	藓附生	瀑布激流下生长
苔藓植物 Bryophytes		
蛇苔 <i>Conocephalum conicum</i>	湿白云岩	瀑布边缘生长
大叶石灰藓 <i>Hydrogohium majusculum</i>	边缘钙华	瀑布边缘生长
平叶石灰藓 <i>H. laevifolium</i>	钙华	瀑布激流下生长
钩喙净口藓 <i>Gymnostomum recurvirostre</i>	钙华	瀑布激流下生长
尖叶扭口藓原变种 <i>Barbula constricta</i>	湿白云岩	瀑布边缘生长
水生长喙藓 <i>Rhynchostegium riparioides</i>	钙华	瀑布激流下生长

2 3 绿藻 Green algae

石灰华扇中常见的真核低等植物类群,植物体形态多样,载色体 (Chromatophore) 主要色素有叶绿素 a 和叶绿素 b。在马脚冲瀑布石灰华扇中,仅有新月藻 *Closterium striolatum* 1种分布,主要附生于激流下的藓丛生境之中。

2 4 硅藻 Diatoms

石灰华扇岩溶沉积物中最常见、分布较广的真核低等植物类群,植物体为单细胞,具硅质的上壳 (Epicthea) 和下壳 (Hypotheca) 结构,可以连接成片状或其它形状的群体。在马脚冲瀑布石灰华扇中,作者发现该类群种类极为丰富,共有 7 种,即虱卵形藻 *Cocconeis pediculus* (新拟名)、微细桥弯藻 *Cymbella minuta* (新拟名)、优美细齿藻 *Denticula elegans* (新拟名)、短缝藻 *Eunotia araux*、狭异极藻 *Gamphonema angustum* (新拟名)、尖布纹藻 *Gyrosigma acuminatum*、舟形藻 *Navicula cryptotenella* 等,主要分布于激流或边缘地带的钙华和藓丛生境之中。

2 5 苔藓植物 Bryophytes

石灰华扇岩溶沉积物中最显著、生态功能最明显的真核高等植物类群,其植物体构造简单,生活史中配子体世代发达,孢子体世代退化且寄生在配子体上。该类群围绕瀑布水湿生境分布,共有 6 种,如蛇苔 *Conocephalum conicum* (L.) Dum、钩喙净口藓 *Gymnostomum recurvirostre*、尖叶扭口藓 *Barbula constricta* Mitt 等,而大叶石灰藓 *Hydrogohium majusculum* (C. Muell) Chen、平叶石灰藓 *H. laevifolium* (Broth et Yas) P. C. Chen、水生长喙藓 *Rhynchostegium riparioides*、钩喙净口藓和水生长喙藓等几种钙华沉积苔藓植物,主要分布于激流生境之中 (图

在上述 4 大类微型生物类群之中,原生动物数量最多,有 16 个种,但个体微小。硅藻数量较大,共 7 个种,但个体极小。苔藓植物是唯一出现的高等植物类群,共有 6 种。其中,大叶石灰藓和钩喙净口藓分布于激流之中,是该石灰华扇沉积生境的关键性物种和建群种。

3 微型生物多样性在石灰华扇沉积中的作用

通过对石灰华扇微型生物多样性成分的分离和生物学鉴定分析,我们不难看出瀑布沉积环境为多样性的微型生物类群提供了适宜的生存小生境和进化空间。笔者拟从微型生物多样性—岩溶沉积相互作用的角度,简述生物多样性对石灰华扇沉积的贡献。

马脚冲瀑布石灰华扇淡水碳酸钙沉积物的形成,是一种微型生物多样性和岩溶环境相互作用产生的综合的、复杂的地质生态学现象。一方面石灰华扇沉积的发生,离不开该地可溶性的白云岩、过饱和的岩溶水、瀑布地貌构造和亚热带气候背景条件等;另一方面石灰华扇淡水岩溶沉积物的内部,经分析已表明含有大量的微型生物多样性成分,如蓝细菌 (Cyanobacteria),原生动物 (Protozoan),绿藻 (Green algae),硅藻 (Diatoms) 和苔藓植物 (Bryophytes) 等不同的生命多样性类群。这些丰富多彩和多样性的小型、微型生物及其生命活动自然历史过程,在石灰华扇的形成、形态和结构中,无不留下深刻的烙印。

对马脚冲瀑布石灰华扇的野外观察和室内分析揭示,该石灰华扇参与岩溶沉积的微型生物多样性成分,主要包括了水生的微型生物类群,如蓝细菌、硅藻和绿藻等,苔藓植物也有重要作用。根据野外生态学观察,结合前人的工作^[3-11],作者认为微型生物在石

灰华扇沉积形成中的地质生态学贡献,主要包括四点:(1)晶体附着基础:马脚冲瀑布石灰华扇微生物群落植物体表面多样性的微观构造可为碳酸钙晶体的附着、结核、形成和发育提供稳定的和较大面积的生长基础;(2)光合作用转移:石灰华扇绿色多样的微生物类群如蓝细菌、具光合作用的原生动物、硅藻、绿藻和苔藓光合作用转移了岩溶水中的 CO_2 ,而岩溶沉积过程是岩溶水体中 CO_2 逃逸而淡水碳酸钙沉积的化学过程,光合作用结果大大加速了淡水碳酸钙沉积和发育;(3)群落沉积骨架:石灰华扇沉积点多样性的微型蓝细菌群落、硅藻群落、绿藻群落和苔藓群落形成的基本沉积骨架席,大大加速和保护稳定了岩溶沉积物的沉积成长;(4)群落形态控制:石灰华扇多样性的宏观和微观形态构造,许多情况下是由微生物群落形态控制的。

综上所述,我们不难看出石灰华扇中微生物多样性有着十分丰富的内涵和研究价值,同时对灰华扇的发生和形成具有重要的不可忽略的地质生态学作用。因此,在中国西南石灰华扇分布的地区,特别应加强对灰华扇微生物多样性保护及沉积生态景观的研究工作。

致谢 贵州师范大学本科生和研究生吴启美、杨再超、江洪和李冰参加部分野外调查和室内工作,作者在此一并致谢。

参考文献 (References)

- 1 沈韞芬,顾曼如,冯伟松.用微型生物群落评价常德市水系的研究[J].应用生态学报,1991,2(2):168-173[Shen Yunfen, Gu Manru, Feng Weisong. Assessment of water system in Changde City based on microbial communities[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1991, 2(2): 168-173]
- 2 沈韞芬,章宗涉,龚循矩,等.微生物监测新技术[M].北京:中国建筑工业出版社,1990[Shen Yunfen, Zhang Zongshe, Gong Xunju, et al. Modern monitoring techniques using freshwater microbiota[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990]
- 3 Freytag P, Verrecchia E P. Calcic radial palisade fabric in freshwater stream atolites: diagenetic and recrystallized feature or physicochemical sinter crust[J]? Sedimentary Geology, 1999, 126: 97-102
- 4 Janssen A, Swennen R, Podoor N, et al. Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposits from Belgium [J]. Sedimentary Geology, 1999, 126: 75-95
- 5 Mez-Prei M, Riding R. Cyanobacterial tufa calcification in two freshwater streams: ambient environment, chemical thresholds and biological processes[J]. Sedimentary Geology, 1999, 126: 103-124
- 6 Pavlovic G, Zupani J, Esad Prohac E, et al. Impressions of the biota

associated with waterfalls and cascades from a Holocene tufa in the Zrmanja River Canyon, Croatia [J]. Geologia Croatica, 2002, 55(1): 25-37

- 7 Davis J S, Rands D G, Heim M K. Biota of the tufa deposit of Falling Springs, Illinois, USA [J]. Transactions of the American Microscopical Society, 1989, 108(4): 403-409
- 8 Ford T D, Pedley H M. A review of tufa and travertine deposits in the world [J]. Earth Sciences Reviews, 1996, 41: 117-175
- 9 Pentecost A. The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor [J]. Quaternary Science Reviews, 1995, 14: 1005-1028
- 10 Pentecost A, Zhang Z H. The travertine flora of Juizhaigou and Muni-gou, China and its relationship with calcium carbonate deposition [J]. Cave & Karst Science, 2000, 27(2): 71-78
- 11 Pentecost A, Zhang Z H. A review of Chinese travertines [J]. Cave & Karst Science, 2001, 28: 15-28
- 12 Sweeting M M. Karst in China [M]. Berlin, Springer, 1995
- 13 张朝晖,陈家宽,艾伦·培特客斯.法国阿尔卑斯山(Mt Alps, France)溪流型喀斯特瀑布水生苔藓植物群落生态研究[J].中国岩溶,2007,26(1):24-30[Zhang Zhaohui, Chen Jiakuan, Pentecost Allan. Ecologic study on aquatic bryophyte community at stream karst waterfall in Alps, France] [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(1): 24-30]
- 14 张朝晖,陈家宽.桂西南喀斯特瀑布水生苔藓植物生物多样性与生态沉积类型研究[J].沉积学报,2007,25(4):21-29[Zhang Zhaohui, Chen Jiakuan. Biodiversity and ecological depositing types of aquatic bryophytes at karst waterfalls in Southwest Guangxi] [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 21-29]
- 15 张朝晖,陈家宽.黔中瀑布水生苔藓植物区系及其生物喀斯特沉积生态类型研究[J].中国岩溶,2007,26(2):170-177[Zhang Zhaohui, Chen Jiakuan. The floristic characteristics of aquatic bryophytes and their biokarst deposition types at waterfalls in central Guizhou, P. R. China] [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(2): 170-177]
- 16 王朝文,张玉环.乌当区综合农业区划[M].贵阳:贵州人民出版社,1989[Wang Chaowen, Zhang Yuhuan. Wudang District Synthetic Agricultural Regional Planning[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 1989]
- 17 王智慧,张朝晖,李建华.琵琶潭瀑布岩溶沉积物生物多样性研究[J].中国岩溶,2007,26(2):178-182[Wang Zhihui, Zhang Zhaohui, Li Jianhua. Biodiversity associated with karst deposits of Pipa waterfall] [J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(2): 178-182]
- 18 沈韞芬主编.原生动物学[M].北京:科学出版社,1999[Shen Yunfen (Editor-in-Chief). Protozoology [M]. Beijing: Science Press, 1999]
- 19 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类—系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006[Hu Hongjun, Wei Yinxin. The Freshwater Algae of China System, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006]

Biodiversity of Microorganisms from a Tufa Fan in Guizhou Province, China

WANG Zhi-hui^{1, 2} ZHANG Zhao-hui^{2, 3} LI Jian-hua¹

(1 Key Laboratory of Yangtze River Water Environment of Ministry of Education School of Environmental Science & Engineering Tongji University Shanghai 200092

2 Guizhou Provincial Laboratory for Mountainous Environment School of Geography and Biology Guizhou Normal University Guiyang 550006

3 Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering Institute of Biodiversity Science Fudan University Shanghai 200433)

Abstract For the research of characteristics of biodiversity of microorganisms from a tufa fan deposition of karst waterfall the authors conducted out a field work at Horse's-hoof Waterfall in Guizhou from July to September in 2006. After identification and analysis in laboratory, 25 microorganisms taxa belonging to four groups have been found from this tufa fan deposit at Horse's-hoof Waterfall. Among them, there are one species for cyanobacteria while sixteen for protozoan, one for green algae and seven for diatoms. And six taxa for bryophytes also were found from same tufa fan. The relationship between biodiversity of microorganisms and tufa deposition at active waterfall have been discussed in this paper.

Key words microorganism biodiversity cyanobacteria protozoan green algae diatoms bryophytes Horse's-hoof Waterfall tufa fan, Guizhou