

泌尿系结石药物溶石临床应用中国专家共识

中华医学会泌尿外科学分会结石学组 中国泌尿系结石联盟

通信作者:吴文起,Email:wwqwml@163.com;叶章群,Email:Zhangqunye@163.com

DOI:10.3760/cma.j.cn112330-20241223-00564

泌尿系结石是全球范围内最常见的泌尿系疾病之一,我国成人患病率为 6.5%,10 年复发率可高达 90%,是一种终生性疾病^[1-2]。结石复发和反复手术所带来的肾功能损害、感染、尿路狭窄等问题,给患者健康和国民经济造成了沉重负担。

药物溶石指利用特定药物改变尿液性质或化学成分溶解结石,特别是对于尿酸结石的治疗取得了良好效果^[3]。近年来研究结果显示枸橼酸钾等药物可通过改变尿液 pH 值、抑制晶体形成、减少晶体聚集等作用,有效延缓结石的形成与生长^[4-5]。因此,广义角度的药物溶石不局限于直接溶解已形成的结石,还可涵盖抑制结石生长和预防复发。药物溶石作为一种非手术治疗方法,对于适合病例能有效减少手术干预,因此国内外泌尿外科指南^[6-9]均推荐药物溶石作为结石治疗方法之一。

然而,目前在临床实践中,药物溶石仍存在适应证把握不准确、溶石前评估不充分、溶石过程中随访不系统等问题,尚未形成系统化、标准化的药物溶石方案,导致药物溶石未在临床工作中广泛开展。为进一步规范药物溶石方案,促进其临床应用,专家组经过充分讨论,结合相关循证医学证据和临床经验,编写此项专家共识。

一、适应证与禁忌证

药物溶石包括口服药物溶石和通过肾造瘘通道灌注的经皮化学溶石两种方式。需根据结石的成分、负荷及位置,并结合患者结石病因、一般情况进行选择。

1. 适应证:①药物溶石主要用于治疗尿酸结石^[5-9],临床较少用于胱氨酸结石和感染性结石的治疗;②对于含钙结石的药物溶石尚缺乏循证医学证据支持,主要作用为抑制结石生长^[4-5];③根据结石成分,可作为各种尿路结石手术后残石或无法手术治疗的尿路结石的辅助治疗方法之一^[10-11]。

目前适用于药物溶石的结石负荷尚无统一标准,研究结果表明负荷较大的尿酸结石^[12-13]也有完

全溶解的可能,需综合考虑患者身体状况、疗程长短、依从性等因素。

2. 禁忌证^[3-6,11-12]:妊娠哺乳期;结石梗阻时间长;中、重度肾积水;结石远端合并梗阻;未控制的尿路感染;溶石药物过敏;严重电解质紊乱;严重肝肾功能不全;活动性消化道溃疡;无法配合治疗。

二、溶石前准备

(一)患者评估

首先应评估患者的具体结石成分,结石成分分析是确定结石类型的金标准^[7-9]。

影像学检查:泌尿系超声、腹部 X 线平片、泌尿系 CT 等检查有助于明确结石性质、大小、位置及尿路梗阻等情况。依据 X 线透光性、CT 值等影像学特征可预测结石成分。双能 CT 可提供更精确的结石成分预测效能^[14]。必要时完善肾动态显像检查评估肾功能。

实验室检查:血常规、尿常规、肝肾功能、血电解质、膀胱中段尿液细菌培养等检查可评估患者一般情况。24 h 尿液成石危险因素分析能够评估多种代谢异常,包含尿量、尿液 pH 值异常,以及高草酸尿、高钙尿、高尿酸尿、低枸橼酸尿、胱氨酸尿等^[15]。

(二)支架预置

药物溶石前无需常规留置双 J 管,但在结石造成尿路梗阻、合并肾积水时留置双 J 管保护肾功能。

(三)患者沟通

溶石前需征得患者或其监护人的知情同意,并充分说明治疗流程、预期疗效、可能并发症、预防措施等相关事项。

三、不同成分结石的药物溶石

(一)口服药物溶石

1. 尿酸结石:尿酸结石约占尿路结石的 10%,其形成与尿量少、低尿液 pH 值和高尿酸尿密切相关^[16],口服药物溶石可以取得显著效果。药物溶石原则是碱化尿液,增加尿酸溶解度,降低尿液中尿酸含量。其结石完全溶解率可达 61.7%,部分溶解率

达 19.8%, 复发率仅 0.7%^[12]。当尿 pH 值从 5.0 升至 7.0 时, 尿酸溶解度增加约 20 倍^[17], 需注意尿酸铵、尿酸钠等尿酸盐结晶属于有机盐类, 药物溶石无效^[8-9]。

无法明确结石成分者可结合以下因素判断是否为尿酸结石^[8-9, 12-14]: ①高尿酸血症或尿尿酸排泄 > 4 mmol/d; ②尿液 pH 值 < 5.5; ③透 X 线结晶, CT 值 200 ~ 600 HU, 或双能 CT 的 Ratio 值 ≤ 1.15。此外, 还可利用 AI 辅助与影像组学等技术预测结石成分, 准确性可达 90% 以上^[18]。

常用药物: 枸橼酸盐、碳酸氢钠、降尿酸药物等。枸橼酸盐和碳酸氢钠的主要作用是提高尿液 pH 值, 从而增加尿酸溶解度^[8-9]; 降尿酸药物中, 别嘌醇的主要作用是抑制黄嘌呤氧化酶, 减少尿酸生成。非布司他可作为别嘌醇替代药物, 而苯溴马隆增加尿酸排泄, 不建议使用^[19]。

推荐方案^[6-9, 12-13, 19]: ①均衡饮水, 保证每日尿量至少 2 000 ml。②饮食控制, 限制动物蛋白和高嘌呤饮食摄入。③碱化尿液, 枸橼酸盐 9 ~ 12 g/d, 或碳酸氢钠 1.5 g/次, 每日 3 次。由于钠盐可增加尿钙排泄, 因此不推荐使用枸橼酸钠。常用枸橼酸盐包括枸橼酸钾、枸橼酸钾镁、枸橼酸氢钾钠。具体药物用量应根据尿液 pH 值调整, 为防止尿液过度碱化导致磷酸钙结晶形成, 建议 pH 值控制在 6.5 ~ 7.2。④降低尿液中尿酸含量。如合并高尿酸血症或尿尿酸 > 4 mmol/d, 可使用别嘌醇 100 ~ 300 mg/d, 儿童 1 ~ 3 mg/(kg · d), 孤立肾患者限制在 100 mg/d; 非布司他 20 ~ 80 mg/d。

2. 胱氨酸结石: 胱氨酸结石约占成人结石的 1%, 儿童结石的 6% ~ 10%, 其与胱氨酸尿、低尿液 pH 值、尿量少等因素密切相关^[20]。口服药物溶石的完全溶解率为 19% ~ 47%, 部分溶解率为 14% ~ 31%, 然而治疗时间长达 22 ~ 51 个月^[21]。因此, 对于胱氨酸结石主要是抑制结石生长、预防复发, 而非直接溶解结石, 关键在于提高胱氨酸溶解度, 降低尿胱氨酸含量。对于较大的胱氨酸结石, 仍推荐以取石手术为主要治疗方式。

常用药物: 枸橼酸盐、碳酸氢钠、胱氨酸结合硫醇药物 (cystine-binding thiol drugs, CBTDs)。枸橼酸盐和碳酸氢钠的主要作用是碱化尿液, 增加胱氨酸的溶解度; CBTDs 含有巯基, 可还原胱氨酸的二硫键, 将胱氨酸分解为半胱氨酸后与其结合形成可溶性复合物, 从而降低尿胱氨酸含量^[20-22]。

推荐方案^[8-9, 20-22]: ①均衡饮水, 保证每日尿量

至少 3 000 ml。②限制高蛋氨酸食物和钠盐 (< 2 g/d) 摄入; ③碱化尿液, 枸橼酸盐 9 ~ 12 g/d, 或碳酸氢钠 1.5 g/次, 每日 3 次, 将尿液 pH 值维持在 7.5 ~ 8.0, 根据尿液 pH 值调整药物用量。因钠盐可增加尿胱氨酸排泄, 因此不推荐使用枸橼酸钠。④CBTDs, 尿胱氨酸 > 3 mmol/d 时建议加用。常用 α-巯基丙酰甘氨酸 (硫普罗宁), 初始剂量为 250 mg/d, 最大量可达 2 000 mg/d。儿童仅适用于体重 ≥ 20 kg 者, 初始剂量为 15 mg/(kg · d)。此外, 卡托普利 [0.3 ~ 1.5 mg/(kg · d)] 可作为胱氨酸尿合并高血压的辅助用药。由于贫血、血小板减少等不良反应, D-青霉胺已不作为一线药物选择。

3. 草酸钙等含钙结石: 含钙结石约占尿路结石的 80%, 与尿量少及高钙尿、高草酸尿、高尿酸尿、低枸橼酸尿等密切相关^[16]。目前尚缺乏口服药物溶解含钙结石的高级别临床研究, 枸橼酸钾等药物对含钙结石的主要作用在于改善尿液代谢异常, 抑制炎症与氧化应激, 减少结晶的形成和聚集, 从而抑制结石生长、预防复发^[4, 8-9]。

常用药物^[4, 8-9, 23]: 噻嗪类利尿剂、枸橼酸盐、降尿酸药物、镁剂、钙剂、维生素 B₆ 等。噻嗪类利尿剂主要作用是降低尿钙和草酸盐浓度, 抑制肠道对钙的吸收; 枸橼酸盐可增加尿枸橼酸浓度, 降低尿草酸钙、磷酸钙和尿酸盐的过饱和度, 抑制结晶聚集和生长; 降尿酸药物可减少尿酸生成; 镁剂可在增加尿镁排泄的同时, 增加尿枸橼酸的过饱和度、提高尿液 pH 值, 镁通过与草酸盐结合而降低尿液中草酸盐的过饱和度; 钙剂可通过与肠道内草酸盐结合减少尿草酸排泄, 而维生素 B₆ 作为丙氨酸乙醛酸氨基转移酶, 可以减少 I 型原发性高草酸尿患者的尿草酸排泄。

推荐方案^[8-9]: ①均衡饮水, 保证每日尿量至少 2 000 ml。②钙摄入量 1 ~ 1.2 g/d, 动物蛋白摄入量 0.8 ~ 1.0 g/(kg · d), 限制草酸、钠盐和过量动物蛋白摄入。③高钙尿症, 尿钙 5 ~ 8 mmol/d 时, 口服枸橼酸盐 9 ~ 12 g/d 或碳酸氢钠 1.5 g/次, 每日 3 次; 尿钙 > 8 mmol/d 时口服氢氯噻嗪 25 ~ 50 mg/d, 氯噻酮 25 mg/d 或吲达帕胺 2.5 mg/d。④低枸橼酸尿症, 口服枸橼酸盐 9 ~ 12 g/d。⑤高草酸尿症, 如为肠源性高草酸尿, 口服钙剂 > 1 000 mg/d, 并联合镁剂 200 ~ 400 mg/d; 如为 I 型原发性高草酸尿, 口服维生素 B₆ 5 ~ 20 mg/(kg · d)。⑥高尿酸尿症, 口服枸橼酸盐 9 ~ 12 g/d 和降尿酸药物。⑦低镁尿症, 口服镁剂 200 ~ 400 mg/d。需要注意的是, 若尿液 pH 值

<5.5 可能导致草酸钙和尿酸共结晶的形成。同时,口服枸橼酸盐时需监测尿液 pH 值,将尿液 pH 值控制在 7.2 以下,避免过度碱化形成磷酸钙结石。

(二) 经皮化学溶石

20 世纪 70 年代国外曾报道应用氨基丁三醇-E 等药物对尿酸、胱氨酸结石进行经皮化学溶石^[24-25],近年国内也有应用乙二醇四乙酸溶解草酸钙结石的体外研究报告^[26],但因组织损伤、肾功能损害等不良反应,均未在临床上广泛应用。目前经皮化学溶石主要作为结石不能完全清除、难以耐受再次手术、同时留置肾造瘘通道的感染性结石患者的辅助治疗手段^[8-9,11],研究报告其结石溶解率为 55%~88%,随访 2~5 年结石复发率为 11%~20%^[11]。但其操作较复杂,住院时间长,护理任务重,要求配备专用器械,需谨慎选择。

1. 常用药物:欧洲泌尿外科协会及中华医学会泌尿外科学分会指南均推荐 Suby's G 溶液,其 pH 值为 3.5~4.0^[8]。通常在肾造瘘通道引流正常后,先予生理盐水冲洗,如患者耐受再更换 Suby's G 溶液,期间同时需抗菌治疗^[11]。值得注意的是目前国内尚无相关应用报道^[27]。

2. 感染性结石经皮化学溶石推荐方案^[8-9,11,27]:

① 经皮肾镜取石手术后留置输尿管支架管及两根肾造瘘管,灌注过程严格控制肾盂内压 < 25 mmHg。② 溶石前、中、后均需进行抗菌药物治疗。溶石前抗菌药物治疗目的是减少尿液细菌负荷,降低感染风险,菌尿者建议应用敏感性抗菌药物治疗 1 周。溶石期间和溶石后仍需维持抗菌药物治疗,以消除病原菌、减少复发,然而尚无统一抗菌药物治疗方案。③ 酸化尿液:口服氯化铵 1 g/次,2~3 次/日,或 L-甲硫氨酸 20~500 mg/次,1~3 次/日,维持尿液 pH 值在 5.8~6.2。④ 脲酶抑制剂:感染严重时使用乙酰羟肟酸 15 mg/(kg·d),治疗 3~4 周,并根据患者耐受情况调整用量。

四、随访及注意事项

目前对于药物溶石的治疗周期与随访频率尚无明确推荐,建议根据患者的结石负荷、溶石效果、药物耐受等情况决定。

初始用药建议患者每次用药前检测尿液 pH 值,根据 pH 值调整药物剂量。尿 pH 值稳定后,每周复查 1~2 次。溶石期间每隔 2~4 周复查 B 超、CT 等影像学检查观察溶石效果。定期进行血常规、血生化等检测及尿液 pH 值、尿液成石危险因素的检测,据此调整药物剂量或联合使用其他溶石药物。

同时需评估溶石药物的不良反应,药物溶石过程中如出现腰痛、感染、高钾血症、血小板下降、肝肾功能恶化等情况,应停止溶石治疗,积极对症处理。治疗 1~3 个月,如结石无明显缩小,建议手术干预。

同时,还需积极诊断并治疗导致结石的原发性疾病,如甲状旁腺功能亢进、肾小管酸中毒、原发性高草酸尿等。对于复杂病例,必要时采取多学科团队(MDT)模式进行综合管理,全面评估并制订个性化治疗方案。

五、联合治疗方法

1. 联合排石治疗^[8-9,28]:可联合 α 受体阻滞剂、中草药方剂等辅助排石,必要时配合物理振动排石,提高结石清除率。

2. 药物溶石联合体外冲击波碎石(ESWL)^[29]:可通过 ESWL 击碎结石,增加药物与结石的接触面积以提高溶石效果,缩短溶石时间。

六、并发症处理和预防

枸橼酸盐及碳酸氢钠常见胃肠道不适、酸碱失衡、电解质紊乱等,CBTDs 可能导致皮疹、血液系统异常、肝肾功能损害等不良反应,而乙酰羟肟酸不良反应包括胃肠道反应、震颤、皮疹、贫血、静脉炎等^[11-12,20-21]。此外,口服药物溶石可能导致肾绞痛、尿路感染、肾功能损害等情况^[12]。经皮化学溶石可能导致腰痛、肾盂肾炎、尿源性脓毒血症、肾周血肿等并发症,主要与药物外渗、肾盂高压相关^[11]。因此,溶石过程中需密切观察患者情况变化,如出现异常需及时减药或停药,积极对症处理,保证患者安全。

七、结语

药物溶石是治疗泌尿系结石的有效辅助手段之一。对于尿酸结石和部分感染性结石,其可取得较好的结石溶解效果,而对于胱氨酸结石、草酸钙等含钙结石,其主要目的在于抑制结石生长、预防复发。值得注意的是,大部分结石成分为混合性结石,而混合性结石的药物溶石仍缺乏循证医学证据,其溶石方案还需要进一步探讨。此外,临床实践中还会遇到一些本文未能覆盖的情形,需具体分析,实施个体化的诊疗。泌尿系结石作为一种终生性疾病,需要长期、系统的管理策略。除了手术干预外,药物治疗、生活方式调整、定期随访与监测以及健康教育均是重要措施。未来,期待开发更多新型溶石药物,以提高非手术治疗及术后残石辅助治疗的成功率,为泌尿系结石患者提供更加全面、有效和个性化的治疗方案。

执笔专家:吴文起,张世科,王博涵,曾国华,余斌,许长宝

参与讨论和审定专家(按单位汉语拼音排序):安徽医科大学第一附属医院(郝宗耀),重庆医科大学附属第一医院(唐伟),广州医科大学第二附属医院(吴文起、张世科),广州医科大学附属第一医院(曾国华),华中科技大学同济医学院附属同济医院(叶章群、何玮、余斌),暨南大学(欧阳健明),江苏省中医院(顾晓箭、徐彦),解放军总医院(麦海星),清华大学附属北京清华长庚医院(李建国),上海长海医院(高小峰),深圳市人民医院(肖克峰),四川大学华西医院(王坤杰),苏州大学附属第一医院(席启林),天津医科大学第二医院(齐士勇),天津医科大学总医院(王宝龙),厦门大学附属第一医院(陈斌),浙江大学附属第二医院(王博涵),浙江省人民医院(俞蔚文),郑州大学第二附属医院(许长宝),中南大学湘雅二医院(蒋宏毅),中山大学孙逸仙纪念医院(许可慰)

利益冲突 所有作者均声明无利益冲突

参 考 文 献

[1] 曾国华, 麦赞林, 夏术阶, 等. 中国成年人群尿石症患病率横断面调查[J]. 中华泌尿外科杂志, 2015, 36: 528-532. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1000-6702. 2015. 07. 014.

[2] 中华医学会泌尿外科学分会结石学组, 中国泌尿系结石联盟. 泌尿系结石代谢评估与复发预防中国专家共识[J]. 中华泌尿外科杂志, 2023, 44: 321-324. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112330-20230124-00030.

[3] 叶章群, 邓耀良, 高小峰, 等. 泌尿系结石诊断治疗指南[M]. //黄健, 王建业, 孔垂泽, 等. 中国泌尿外科疾病诊断治疗指南(2019 版) 北京:人民卫生出版社, 2020:241-267.

[4] Lai Y, Zheng H, Sun X, et al. The advances of calcium oxalate calculi associated drugs and targets[J]. Eur J Pharmacol, 2022; 935:175324. DOI: 10. 1016/j. ejphar. 2022. 175324.

[5] Tzelves L, Mourmouris P, Skolarikos A. Outcomes of dissolution therapy and monitoring for stone disease: should we do better? [J]. Curr Opin Urol, 2021, 31: 102-108. DOI: 10. 1097/MOU. 0000000000000844.

[6] Taguchi K, Cho SY, Ng AC, et al. The Urological Association of Asia clinical guideline for urinary stone disease[J]. Int J Urol, 2019, 26:688-709. DOI: 10. 1111/iju. 13957.

[7] Pearle MS, Goldfarb DS, Assimos DG, et al. Medical management of kidney stones: AUA guideline[J]. J Urol, 2014, 192:316-324. DOI: 10. 1016/J. juro. 2014. 05. 006.

[8] Skolarikos A, Jung H, Neisius A, et al. EAU guidelines on urolithiasis [EB/OL]. [2024-12-10]. https://uroweb. org/guideline/urolithiasis/.

[9] 叶章群, 曾国华, 高小峰, 等. 泌尿系结石诊断治疗指南[M]//黄健, 张旭, 魏强, 等. 中国泌尿外科和男科疾病诊断治疗指南(2022 版). 北京:科学出版社, 2022:389-432.

[10] Spradling K, Ganesan C, Conti S. Medical treatment and prevention of urinary stone disease[J]. Urol Clin North Am, 2022, 49:335-344. DOI: 10. 1016/J. UCL. 2021. 12. 007.

[11] Kachrilas S, Papatouris A, Bach C, et al. The current role of percutaneous chemolysis in the management of urolithiasis: review and results[J]. Urolithiasis, 2013, 41:323-326. DOI: 10. 1007/s00240-013-0575-6.

[12] Ong A, Brown G, Tokas T, et al. Selection and outcomes for dissolution therapy in uric acid stones: a systematic review of literature[J]. Curr Urol Rep, 2023, 24:355-363. DOI: 10. 1007/s11934-023-01164-7.

[13] Gridley CM, Sourial MW, Lehman A, et al. Medical dissolution therapy for the treatment of uric acid nephrolithiasis[J]. World J

Urol, 2019, 37:2509-2515. DOI: 10. 1007/s00345-019-02688-9.

[14] Nourian A, Ghiraldi E, Friedlander JI. Dual-energy CT for urinary stone evaluation [J]. Curr Urol Rep, 2020, 22: 1. DOI: 10. 1007/s11934-020-01019-5.

[15] Wu W, Yang D, Tiselius HG, et al. The characteristics of the stone and urine composition in Chinese stone formers: primary report of a single-center results [J] Urology, 2014, 83: 732-737. DOI: 10. 1016/j. urology. 2013. 11. 012.

[16] 吴伟宙, 黄健, 梁雄发, 等. 单中心 15 269 例泌尿系结石患者的结石成分分析[J]. 中华泌尿外科杂志, 2018, 39: 651-655. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1000-6702. 2018. 09. 004.

[17] 冯波. 泌尿系结石溶石疗法的研究进展[J]. 国际泌尿系统杂志, 2006, 26: 511-514. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1673-4416. 2006. 04. 024.

[18] Le BD, Nguyen TA, Baek BH, et al. Accurate prediction of pure uric acid urinary stones in clinical context via a combination of radiomics and machine learning [J]. World J Urol, 2024, 42: 150. DOI: 10. 1007/S00345-024-04818-4.

[19] 中国医疗保健国际交流促进会高血压分会共识专家组. 高血压伴无症状高尿酸血症管理中国专家共识[J]. 中华高血压杂志, 2022, 30: 1014-1019. DOI: 10. 16439/j. issn. 1673-7245. 2022. 11. 004.

[20] Eisner BH, Goldfarb DS, Baum MA, et al. Evaluation and medical management of patients with cystine nephrolithiasis: a consensus statement [J]. J Endourol, 2020, 34: 1103-1110. DOI: 10. 1089/end. 2019. 0703.

[21] Bernardo NO, Smith AD. Chemolysis of urinary calculi [J]. Urol Clin North Am, 2000, 27: 355-365. DOI: 10. 1016/S0094-0143 (05) 70264-0.

[22] Servais A, Thomas K, Dello Strologo L, et al. Cystinuria: clinical practice recommendation [J]. Kidney Int, 2021, 99: 48-58. DOI: 10. 1016/j. kint. 2020. 06. 035.

[23] Hoppe B, Martin-Higuera C. Improving treatment options for primary hyperoxaluria [J]. Drugs, 2022, 82: 1077-1094. DOI: 10. 1007/s40265-022-01735-x.

[24] Gordon MR, Carrion HM, Politano VA. Dissolution of uric acid calculi with THAM irrigation [J]. Urology, 1978, 12: 393-397. DOI: 10. 1016/0090-4295 (78) 90287-x.

[25] Smith AD, Lange PH, Miller RP, et al. Dissolution of cystine calculi by irrigation with acetylcysteine through percutaneous nephrostomy [J]. Urology, 1979, 13: 422-423. DOI: 10. 1016/0090-4295 (79) 90349-2.

[26] 宋东奎, 钱书虹, 吴波, 等. 胰蛋白酶加乙二胺四乙酸钠溶解草酸钙结石实验研究[J]. 郑州大学学报(医学版), 2002, 37: 483-485. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6825. 2002. 04. 032.

[27] 上尿路感染性结石诊断与治疗中国专家共识编写组. 上尿路感染性结石诊断与治疗中国专家共识(2024 版) [J]. 微创泌尿外科杂志, 2024, 13: 217-223. DOI: 10. 19558/j. ckki. 10-1020/r. 2024. 04. 001.

[28] 王树声, 李源, 邹乾明, 等. 上尿路结石中西医结合排石治疗中国专家共识[J]. 中国中西医结合外科杂志, 2022, 28: 158-161.

[29] Elbaset MA, Hashem A, Eraky A, et al. Optimal non-invasive treatment of 1-2. 5 cm radiolucent renal stones: oral dissolution therapy, shock wave lithotripsy or combined treatment-a randomized controlled trial [J]. World J Urol, 2020, 38: 207-212. DOI: 10. 1007/s00345-019-02746-2.

(收稿日期:2024-12-25)

(本文编辑:霍红梅)