

REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用

吴倩云 (重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

摘要 近年来,随着示踪技术在土壤侵蚀研究中的广泛应用,稀土元素示踪技术(REEs Tracer Method)已被公认为理想的土壤侵蚀示踪方法。与传统的研究方法相比较,REEs 示踪技术能够定量监测坡面侵蚀形态的时空演变过程,分析坡面侵蚀分布规律。同时,REEs 示踪技术也为确定泥沙来源、评估土壤侵蚀与泥沙治理措施提供了帮助。分析了 REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的可行性以及取得的效果,并对其在土壤侵蚀研究中的不足进行分析。

关键词 稀土元素示踪技术;土壤侵蚀;坡面侵蚀形态;泥沙来源

中图分类号 S157 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)32-0124-03

Applications of REEs Tracer Method Used in Soil Erosion Study

WU Qian-yun (College of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331)

Abstract Recently, with the applications of tracer methods used in soil erosion, Rare Tracer Method (REETM) have been largely regarded as ideal tracers method for soil erosion. Compared to traditional means, it can be used to quantitatively monitor the temporal and spatial variation of slope erosion forms and analyze the law of the slope erosion distributions. Moreover, it was also able to determine the sediments source to evaluate the measures about governing soil erosion and sediments. Both the feasibility of REETM and achievements in soil erosion, were reviewed. Some limitations were also summarized.

Key words REEs Tracer Method; Soil erosion; Hillslope erosion pattern; Sediments source

土壤侵蚀具有影响范围大、危害持续时间长等特点^[1],已被公认为全球最严重的环境问题之一。研究土壤侵蚀速率、沉积速率及其侵蚀强度的空间分布,了解土壤侵蚀机理和运移路径,是分析侵蚀泥沙来源及侵蚀区土地整治、水土保持措施合理布设的主要依据^[2]。

目前,国内外常用的土壤侵蚀测定方法主要有径流小区法、野外调查法、立体摄影法和模型法等,这些方法在研究土壤侵蚀强度、土壤侵蚀结果和影响因子等方面具有重要作用,但对土壤侵蚀过程、坡面侵蚀泥沙来源及时空变化规律等研究难点束手无策。随着研究手段的改进,示踪法成为土壤侵蚀研究最常用的方法,尤其是核素示踪法,与传统方法相比较,不仅量化程度高,还可对土壤侵蚀过程实施动态监测,使土壤侵蚀研究趋于准确、简单、快速^[3]。目前,应用于土壤侵蚀研究的示踪法主要包括放射性核素示踪法、磁性示踪法、稳定性稀土元素示踪法。与前2种土壤侵蚀研究方法相比,稀土元素示踪法在示踪坡面侵蚀演变形态、侵蚀分布规律、泥沙来源等方面更具优势,成为当前土壤侵蚀研究最常用的方法。笔者在介绍稀土元素示踪法在土壤侵蚀研究中优势的基础上,重点阐述其在土壤侵蚀研究中的难点,最后对该法应用局限性进行评述。

1 REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用基础

稳定性稀土元素 (immobile rare earth elements, 简称 REEs) 常以氧化物的形式大量存在于地壳中,具备土壤中背景值低、动植物吸附率低、对生态环境无害、不溶或微溶于水、迁移能力弱、能被土壤吸附等特点^[4],即使外力剥蚀作用形成的 REEs 粉粒仍有极强的吸附与团聚能力。REEs 示踪剂可在不改变土壤理化性质的基础上,随侵蚀土壤同步运

移^[5-9],这为 REEs 示踪技术运用于泥沙来源和土壤侵蚀研究提供基础。REEs 包括元素周期表中的镧系 15 种元素,以及与其相关的 21 号元素铊、39 号元素钇,种类丰富多样,化学性质和地球化学行为极相似,研究人员可根据试验需要,调整人工施放示踪元素的种类,避免试验中因元素化学性质差异带来的误差^[10]。美国学者 Knaus 等^[5]首次将该法用于沼泽地演变研究中,成功测定沼泽地的沉积速率。20 世纪 90 年代,国内学者将该法引入我国黄土高原地区土壤侵蚀的垂直分布研究中,解决我国棘手的黄土高原地区土壤侵蚀量研究难题^[11-12],确定元素的施放方法(点穴法、条带法)和施放浓度的计算方法及精度计算方法^[13]。此外,REEs 示踪技术还被成功运用于黑土、紫色土区域的土壤侵蚀量化研究,为该类型土壤区的土壤侵蚀量化研究提供新手段和方法^[14-16]。

$$C_j = 10^{-3} KB_j / R_j (\text{mg/kg}) \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: j 为小区划分的总区段(或条带数); C_j 为施放第 j 种元素的浓度; B_j 为第 j 种元素的土壤背景值; R_j 为第 j 种元素施放部位相对侵蚀量的最小期望值; K 为考虑到其他因素的综合保证系数。

REEs 示踪技术操作简单,其基本原理是根据试验需要把不同的 REEs 化合物与土壤均匀混合,布设于不同地形部位,再利用天然降水或人工降水、放水冲刷等使之随径流、泥沙同步运移,然后采集泥沙样品,经过处理后通过中子活化分析技术测定泥沙样品中 REEs 的种类和含量,由此判定泥沙来源及不同地形部位的侵蚀差异性。由于该法采用的是化学吸附方法,在土壤上标记示踪元素,因此,客观上并不改变泥沙的粒径和比重,可真实地描述侵蚀和沉积过程^[17]。REEs 示踪技术精度较高,试验误差一般小于 15%^[18-19]。因此,REEs 示踪技术不仅具备良好示踪剂的特性,还具有操作简单、精度高的特征,为土壤侵蚀量化研究提供了可行性。

REEs 示踪方法的布设是监测泥沙来源、坡面侵蚀空间演变过程的关键,因此人工施放 REEs 的方法是否合理,直接

基金项目 国家自然科学基金项目(41202135);重庆市自然科学基金项目(cstc2012jja80008)。

作者简介 吴倩云(1991—),女,安徽祁门人,硕士研究生,研究方向:景观生态学。

收稿日期 2017-08-30

影响试验目的可达性与结果精确性。关于 REEs 布设方法主要有 3 种,即段面法、条带法和点穴法^[20-22],在初期利用 REEs 示踪技术对土壤侵蚀研究发挥重要作用。随着研究手段的进步,REEs 人工布设方法不断改善。宋炜等^[23]在前 3 种方法的基础上进行创新,提出沿坡面垂直分层布设法。薛亚洲等^[24]在以往布设方法的基础上,提出沿坡面水平分段和垂直分层结合研究法,施放不同的 REEs,解决传统方法和垂直布设法的单向性,实现了坡面水平与纵深 2 个侵蚀方向的结合。姚春梅^[25]、张晴雯等^[26]提出了限定性细沟与分段布设方法,将背景值低的稀土元素布设于土壤侵蚀量小的地方,解决了利用径流小区实验法造成的细沟随机性变化问题。

2 REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用

2.1 REEs 示踪技术在坡面侵蚀形态演变过程中的应用

流水侵蚀是易侵蚀性土壤物质的分离和搬运过程^[27],这种过程会加速土壤与耕地退化,因此理解不同景观尺度的土壤侵蚀机制,是进行流域内土壤流失治理的关键。坡面是土壤侵蚀的最基本单元,也是研究不同景观尺度土壤侵蚀过程的基础,但实现坡面侵蚀的量化研究却是一个复杂问题。REEs 示踪技术能够满足这一过程的研究。

坡面侵蚀类型的转变是一个缓慢过程,REEs 示踪技术将这种过程划分为:面蚀、细沟发育与细沟稳定 3 个阶段^[24,28],片蚀与细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要类型,随降水过程两者各占据不同优势。Zhu 等^[29]认为降水初期片蚀是主要的坡面侵蚀方式,也是土壤流失的来源,但李勉等^[30]认为细沟侵蚀是坡面侵蚀的主导形态,存在起始、发展和稳定 3 个阶段。薛亚洲等^[24]将两者关系归为降雨初期片蚀与细沟侵蚀基本相当,后期以细沟侵蚀为主,二者可分为均衡与分化阶段,使得坡面侵蚀形态演变更加明确。

细沟侵蚀是加速坡面侵蚀的关键因子,REEs 示踪技术在进一步研究细沟侵蚀中发挥了重要作用。吴普特等^[21]利用 REEs 示踪技术首次提出了细沟侵蚀形态和强度的 3 个参数,即细沟侵蚀密度、强度、平均深度,并指出细沟侵蚀强度与坡长具有线性递增关系。雷廷武等^[31]利用 REEs 示踪法示踪坡面水蚀动态过程,发现细沟侵蚀产沙量受细沟长度的影响。姚春梅^[25]在径流小区实验法的基础上,结合 REEs 示踪技术进行不同水动力条件下细沟侵蚀动态研究,发现细沟单体形态的发育处于动态演变中,坡度是关键因素。

2.2 REEs 示踪技术在坡面侵蚀分布规律中的应用

研究坡面侵蚀分布规律是确定侵蚀泥沙来源、理解土壤侵蚀机制的关键,也是合理布设水土保持措施的依据,但坡面侵蚀分布规律很复杂,关于坡面侵蚀最严重部位的判定更是存在争议。REEs 示踪技术为研究坡面侵蚀分布规律、确定坡面侵蚀最严重处提供了定量研究方法。

田均良等^[11]、琚彤军等^[17]、李雅琦等^[32]利用 REEs 示踪技术研究坡面侵蚀分布规律,发现坡面各部位侵蚀量的分布趋势与试验小区细沟侵蚀形态分布相似,且各部位侵蚀量分布的总趋势是上部 > 中部 > 下部。这与其他学者观点相同,即坡面侵蚀与细沟侵蚀分布一致,坡面中下部为侵蚀活跃带

也是侵蚀最严重部位^[33-37],也有学者认为坡面侵蚀最严重处位于距坡面顶端 2 ~ 6 m 处^[38-39]。虽然关于坡面侵蚀最严重处的观点存在争议,但这些研究结果均表明坡面侵蚀分布存在时空变化。研究人员利用 REEs 示踪技术开展进一步研究时,发现造成坡面侵蚀差异性的原因很多。李雅琦等^[32]、唐泽军等^[39]均认为坡面不同段位的侵蚀强度与雨强存在密切关系,王宁等^[14]、薛亚洲等^[35]认为坡面不同段位的土壤侵蚀速率受降雨时间的影响,而李勉等^[30]在放水冲刷试验中发现流量是影响坡面不同段位侵蚀强度的关键因子。周佩华等^[12]、石辉等^[40]认为坡长是影响土壤侵蚀的关键因素,坡面侵蚀随坡长呈 Weibull 分布且存在增长、增长后递减和波动 3 种变化模式。同时,坡面土壤抗蚀性也是造成坡面差异侵蚀的关键因素,因试验中设计的土壤紧实度、坡长等组合因素都可能造成坡面差异性侵蚀,在今后仍需深入研究。

2.3 REEs 示踪技术在侵蚀泥沙来源中的应用

泥沙是最普遍的非点源污染物,具有来源多样、易沉降的特点,显著影响水质与环境,同时流域内泥沙量化研究十分困难^[41]。分析泥沙搬运能力、确定泥沙来源,对构建土壤侵蚀模型必不可少^[42]。REEs 已被公认为有效的泥沙来源指示器^[43],具有指示泥沙环境和来源信息的作用。

泥沙包含丰富的环境信息,产沙量的大小及其影响因素是反映土壤侵蚀过程的良好依据。在研究坡面侵蚀产沙量变化机制上,石辉等^[44-45]首次将 REEs 示踪技术引入到小流域侵蚀产沙的时间分布研究中,发现小流域产沙量随时间变化而趋于复杂。这种复杂化趋势与流水侵蚀力及土壤抗蚀度密切相关^[46],REEs 示踪技术研究产沙量影响因素,结果表明,侵蚀产沙量易受降水时间、降水强度的影响,尤其是短历时、高雨强更易导致坡面产沙^[35,47]。同时,坡度、坡长、流量等也会影响坡面产沙量,且在一定条件下产沙强度会随坡长变化而存在增长、增长递减、波动 3 种演变形式^[26,38,48-49]。

利用 REEs 示踪技术进行坡面侵蚀泥沙来源研究,结果表明侵蚀泥沙来源也存在波动变化,坡面上部和中下部均可能是泥沙来源处,且随侵蚀过程的发展,侵蚀泥沙来源趋向坡面上部发展^[28]。泥沙来源波动变化以及变化趋势与坡面抗蚀性以及坡面侵蚀形态的演变有关。在同一降水强度下,由于坡面不同部位的抗蚀性不同,雨滴击打坡面时,坡面各部位会发生差异性侵蚀,随降水时间的持续,坡面各部位开始出现不同程度的侵蚀,降水初期坡面侵蚀以片蚀为主,坡面各部位的侵蚀强度差异不大,但随着侵蚀过程的深入,细沟侵蚀开始出现并逐渐占据主导,坡面各部位的侵蚀强度差异变大且随细沟发育而不断变化,导致坡面不同部位泥沙侵蚀贡献率变化^[50],最终造成坡面泥沙来源的变动。

3 REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的局限性

REEs 示踪技术在土壤侵蚀物理过程描述、土壤侵蚀预报模型参数确定与建立方面发挥了重要作用,但利用 REEs 示踪技术研究土壤侵蚀尚存在一些不足之处。

(1) REEs 示踪技术试验成本高、工作量大,土壤侵蚀研究需要采取径流小区法,人工布设 REEs,进行人工降水或放

水冲刷以达到研究目的,但所得结果千差万别,造成意见分歧较大。同时,该法虽可控性较强,却无法模拟真正的自然状况,所得的结果也缺少客观性,不能完全代表自然规律。

(2) REEs 示踪技术的精确性易受土壤粒径、土壤类型、土壤有机质、气候变化等因素的影响^[51-54]。

(3) REEs 示踪技术只适用于小尺度区域范围的土壤侵蚀研究,难以在大流域范围内使用,且多被用于黄绵土、黑土与紫色土地地区的土壤侵蚀研究中,而关于石灰质壤土区的侵蚀研究尚未见报道。

(4) 虽有试验证实外源性 REEs 示踪元素在土壤中性质稳定,不易被植物吸收,淋溶迁移能力弱,但已有的毒理研究已经暗示稀土元素可能给生物带来不利影响^[55-56]。尤其近 10 年来 REEs 在高科技、生物制药与农业上的高度利用^[57],增加了土壤中 REEs 的富集量,并最终通过食物链扩大生物作用。然而,人们对 REEs 生物作用的认识还处于初步阶段^[58]。尽管试验中研究人员给出了 REEs 施放浓度的计算公式,但对土壤内部可承受浓度与施放浓度之间的差值仍没有精确界定,试验中被污染的土壤如何处理也没有详细的措施。同时,REEs 在土壤和水体中的分布模式,尤其是在土壤水以及地下水中的分布,在环境研究中也很少被考虑在内。

参考文献

- [1] 徐世晓,赵新全. 土壤流失状况及其生态学效应[J]. 资源生态环境网络研究动态,2000,11(4):30-35.
- [2] 李立青,杨明义,刘普灵. ⁷Be 在坡面土壤侵蚀中应用的研究进展[J]. 水土保持通报,2003,23(2):69-72.
- [3] 杨明义,田均良,石辉,等. 核分析技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持研究,1997,4(2):100-112.
- [4] MENZEL R G. Transport of strontium-90 in runoff[J]. Science,1960,131(3399):499-500.
- [5] KNAUS R M,GENT D L V. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland;III. A new soil horizon marker method for measuring recent accretion[J]. Estuaries,1989,12(4):269-283.
- [6] YAMASAKI S,TSUMURA A. Adsorption and desorption of exogenous rare earth elements in soils:I. Rate and forms of rare earth elements sorbed[J]. Pedosphere,1993(4):299-308.
- [7] ZHANG X C,NEARING M A,POLYAKOV V O, et al. Using rare-earth oxide tracers for studying soil erosion dynamics[J]. Soil science society of america journal,2003,67(1):279-288.
- [8] KIMOTO A,NEARING M A,ZHANG X C, et al. Applicability of rare earth element oxides as a sediment tracer for coarse-textured soils[J]. Catena,2006,65(3):214-221.
- [9] STEVENS C J,QUINTON J N. Investigating source areas of eroded sediments transported in concentrated overland flow using rare earth element tracers[J]. Catena,2008,74(1):31-36.
- [10] MA L,JIN L X,BRANTLEY S L. How mineralogy and slope aspect affect REE release and fractionation during shale weathering in the Susquehanna/Shale Hills Critical Zone Observatory[J]. Chemical geology,2011,290(1):31-49.
- [11] 田均良,周佩华,刘普灵,等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报[J]. 水土保持学报,1992(4):23-27.
- [12] 周佩华,田均良,刘普灵,等. 黄土高原土壤侵蚀与稀土元素示踪研究[J]. 水土保持研究,1997,4(2):2-9.
- [13] 刘普灵,张梅花. 外源 REE 对生态环境影响研究[J]. 水土保持研究,1997,4(2):92-95.
- [14] 王宁,杨春雨,张刚,等. 黑土区土壤侵蚀的 REE 示踪法研究[J]. 地理科学,2008,28(4):565-570.
- [15] 肖海,刘刚,许文年,等. 土壤颗粒组成对 REE 吸附量及侵蚀示踪精度的影响[J]. 中国稀土学报,2013,31(5):627-635.
- [16] 杨春雨. 用稀土元素示踪法研究黑土侵蚀[J]. 商情,2009(12):51.
- [17] 琚彤军,刘普灵. 中子活化 REE 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[C]//中国原子能农学会第七次代表大会暨学术研讨会. 杭州:中国核学会,2004.
- [18] SONG W,LIU P I,YANG M Y, et al. Using REE tracers to measure sheet

- erosion changing to rill erosion[J]. Journal of rare earths,2003,21(5):587-590.
- [19] XUE Y Z,LIU P L,YANG M Y, et al. Study of spatial and temporal processes of soil erosion on sloping land using rare earth elements as tracers[J]. Journal of rare earths,2004,22(5):707-713.
- [20] 刘普灵,田均良,周佩华,等. 土壤侵蚀稀土元素示踪法实验研究[J]. 稀土,2001,22(2):37-40.
- [21] 吴普特,周佩华,武春龙,等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究,1997,4(2):47-56.
- [22] 琚彤军,田均良,刘普灵,等. REE 示踪条带施放法研究坡面土壤侵蚀垂直分布规律[J]. 核农学报,1999,13(6):347-352.
- [23] 宋炜,刘普灵,杨明义,等. 坡面侵蚀形态转变过程的 REE 示踪法研究[J]. 中国稀土学报,2003,21(6):711-715.
- [24] 薛亚洲,刘普灵,杨明义,等. REE 示踪研究坡面侵蚀时空演变过程[J]. 中国稀土学报,2004,22(5):698-703.
- [25] 姚春梅. 坡面-细沟耦合水蚀过程的试验与模型研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
- [26] 张晴雯,雷廷武,赵军. 应用 REE 示踪法研究细沟流净剥蚀率[J]. 土壤学报,2005,42(1):163-166.
- [27] FOSTER G R,MEYER L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Amer Soc Agr Eng Trans Asae,1972,51(5):99-102.
- [28] 丁文峰,李占斌,丁登山. 稀土元素示踪法在坡面侵蚀产沙垂直分布研究中的应用[J]. 农业工程学报,2003,19(2):65-69.
- [29] ZHU M Y,TAN S D,DANG H S, et al. Rare earth elements tracing the soil erosion processes on slope surface under natural rainfall[J]. Journal of environment radioactivity,2011,102(12):1078-1084.
- [30] 李勉,李占斌,丁文峰,等. 黄土坡面细沟侵蚀过程的 REE 示踪[J]. 地理学报,2002,57(2):218-223.
- [31] 雷廷武,张晴雯,赵军. 细沟水蚀动态过程的稳定性稀土元素示踪研究[J]. 水利学报,2004,35(12):84-91.
- [32] 李雅琦,刘普灵,琚彤军. 土壤侵蚀示踪稀土元素的中子活化分析技术[J]. 水土保持研究,1997,4(2):21-25.
- [33] 李雅琦,吴普特. REE 示踪法研究土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 水土保持研究,1997,4(2):26-33.
- [34] LIU P L,TIAN J L,ZHOU P H, et al. Stable rare earth element tracers to evaluate soil erosion[J]. Soil and tillage research,2004,76(2):147-155.
- [35] 薛亚洲,刘普灵,杨明义,等. 利用 REE 示踪技术研究次降雨坡面侵蚀[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1089-1092.
- [36] 申震洲,刘普灵,杨明义,等. REE 示踪坡面侵蚀过程研究[J]. 核农学报,2007,21(3):311-316.
- [37] 申震洲. REE 示踪坡面侵蚀演变过程及不同下垫面摆荡地的减沙效益研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [38] 魏霞. 黄土高原坡沟系统侵蚀产沙动力过程与调控研究[D]. 西安:西安理工大学,2008.
- [39] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 确定侵蚀细沟土壤临界抗剪应力的 REE 示踪方法[J]. 土壤学报,2004,41(1):28-34.
- [40] 石辉,段宏斌,刘普灵. 坡面土壤侵蚀分布规律的初步分析[J]. 水土保持研究,1997(2):64-68.
- [41] POLYAKOV V O. Use of rare earth elements to trace soil erosion and sediment movement[D]. West Lafayette,USA:Purdue University,2002.
- [42] MAHMOODABADI M,GHADIRI H,ROSE C, et al. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity[J]. Journal of hydrology,2014,513:413-421.
- [43] GUO F,GAO M S,HOU G H, et al. Source tracing of rare earth elements: A case study of core 07 on the southern coast of Laizhou Bay[J]. Continental shelf research,2017,136:29-38.
- [44] 石辉,田均良,刘普灵,等. 小流域侵蚀产沙时间分布的模拟试验研究[J]. 水土保持研究,1997,4(2):75-84.
- [45] 石辉,田均良,刘普灵,等. 利用 REE 示踪法研究小流域泥沙来源[J]. 中国科学 E 辑(技术科学),1996,26(5):474-480.
- [46] 托伊 T J,福斯特 G R,雷纳 K G. 土壤侵蚀:过程预测方法控制[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [47] 田均良. 侵蚀泥沙坡面沉积研究初报[J]. 水土保持研究,1997,4(2):57-63.
- [48] LEI T W,ZHANG Q W,ZHAO J, et al. Tracing sediment dynamics and sources in eroding rills with rare earth elements[J]. European journal of soil science,2006,57(3):287-294.
- [49] ZHANG Q W,LEI T W,HUANG X J. Quantifying the sediment transport capacity in eroding rills using a REE tracing method[J]. Land degradation & development,2016,28(2):591-601.
- [50] 肖海,刘刚,许文年,等. 利用稀土元素示踪三峡库区小流域模型泥沙来源[J]. 水土保持学报,2014,28(1):47-52.

Mega 4.0 软件的 NJ 法建立系统发育树(图 5)。结果显示,菌株 H1 与假交替单胞菌 *Pseudoalteromonas mariniglutinosa* strain KMM 3635 (NR_028992) 的亲缘关系最近,一致性

(identity) 最高达 99%。结合菌株 H1 形态学及生理学特征,鉴定菌株 H1 为假交替单胞菌(*Pseudoalteromonas*)。

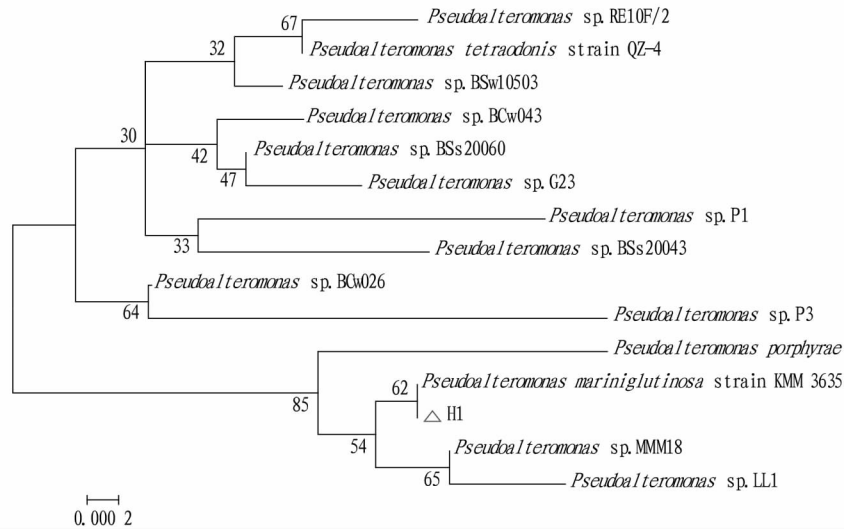


图 5 菌株 H1 16S rRNA 基因序列 NJ 系统发育树

Fig. 5 16S rRNA gene sequence NJ Phylogenetic tree of strain H1

3 结论与讨论

浒苔含有 70% 以上碳水化合物,为浒苔资源化提供了良好的基础。浒苔转化利用之前均需要先破解、降解为可利用的小分子物质,快速、环保降解浒苔是利用浒苔的关键环节。目前浒苔破解、降解方法主要采用酸法、酶法以及酸酶结合法^[9-13]。该研究通过分离筛选获得 1 株海洋假交替单胞菌 H1,利用其对浒苔进行生物发酵快速降解,取得了良好的试验效果,3 d 即可将浒苔生物降解 68.10%。据报道,假交替单胞菌能够分泌多种水解酶系,如内切葡聚糖酶、淀粉酶、琼胶酶、 κ -卡拉胶酶等。这些酶系能够有效降解浒苔细胞壁及大分子多糖,这是进行浒苔降解的物质基础^[14-16]。该研究可为浒苔高效环保降解提供一条有效途径,但针对浒苔降解内在机理及降解工艺还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 樊彦国,白羽,陈潘潘,等. 青岛近海浒苔光谱特征研究[J]. 海洋科学, 2015,39(4):87-91.
- [2] 费岚. 浒苔生物质降解优化条件及发酵生产乙醇研究[D]. 上海:上海海洋大学,2014:7-10.
- [3] 林英庭,朱风华,王利华,等. 浒苔的营养成分及安全性评价[J]. 饲料工业,2015,36(16):1-6.
- [4] 王爽,姜秀民,王谦,等. 不同工况下条浒苔的快速热裂解制取生物油

- 试验研究[J]. 热能动力工程,2013,28(2):202-206,222.
- [5] 盘赛昆,朱强,王淑军,等. 条浒苔多糖的酶法辅助提取及其抗氧化活性[J]. 水产科学,2013,32(4):187-191.
- [6] 衣丹,高春蕾,王能飞,等. 稀酸水解绿潮藻及发酵制生物乙醇研究[J]. 海洋科学进展,2013,31(4):559-565.
- [7] 布坎南 R E,吉本斯 N E. 伯杰细菌鉴定手册[M]. 8 版,北京:科学出版社,1984:274-325.
- [8] 东秀珠,蔡妙瑛. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京:科学出版社,2001:62-65.
- [9] 文新亚,李燕松,张志鹏,等. 酶解木质纤维素的预处理技术研究进展[J]. 酿酒科技,2006(8):97-100.
- [10] 何北海,林鹿,孙润仓,等. 木质纤维素化学水解产生可发酵糖研究[J]. 化学进展,2007,19(7/8):1141-1146.
- [11] 张毅民,杨静,吕学斌,等. 木质纤维素类生物质酸水解研究进展[J]. 世界科技研究与发展,2007,29(1):48-54.
- [12] SUN Y, CHENG J J. Dilute acid pretreatment of rye straw and bermudagrass for ethanol production[J]. Bioresource technology, 2005, 96(14): 1599-1606.
- [13] SILVERSTEIN R A, CHEN Y, SHARMA-SHIVAPPA R R, et al. A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks[J]. Bioresource technology, 2007, 98(6): 3000-3011.
- [14] 游银伟,汪天虹. 适冷海洋细菌交替假单胞菌(*Pseudoalteromonas* sp.) MB-1 内切葡聚糖酶基因的克隆和表达[J]. 微生物学报,2005,45(1):142-144.
- [15] 陶雪莹. 假交替单胞菌淀粉酶和琼脂酶基因的克隆、纯化及其特性鉴定[D]. 武汉:华中农业大学,2008:56-62.
- [16] 李尚勇. 海洋交替假单胞菌 QY203 产 κ -卡拉胶酶研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012:38-42.

(上接第 126 页)

- [51] LIU G, XIAO H, LIU P L, et al. An improved method for tracing soil erosion using rare earth elements[J]. Journal of soils and sediments, 2016, 16(5):1670-1679.
- [52] LI M, XU R S, MA Y L, et al. Geochemistry and biogeochemistry of rare earth elements in a surface environment (soil and plant) in South China[J]. Environmental geology, 2008, 56(2):225-235.
- [53] MORGAN B, RATE A W, BURTON E D, et al. Enrichment and fractionation of rare earth elements in FeS- and organic-rich estuarine sediments receiving acid sulfate soil drainage[J]. Chemical geology, 2012, 308/309(2):60-73.
- [54] MINA RÍK L, ŽIGOVÁ A, BENDL J, et al. The behaviour of rare-earth elements and Y during the rock weathering and soil formation in the any

- granite massif, Central Bohemia[J]. Science of the total environment, 1998, 215(1/2):101-111.
- [55] ORAL R, BUSTAMANTE P, WARNAU M, et al. Cytogenetic and developmental toxicity of cerium and lanthanum to sea urchin embryos[J]. Chemosphere, 2010, 81(2):194-198.
- [56] 金姝兰,黄益宗. 土壤中稀土元素的生态毒性研究进展[J]. 生态毒理学学报, 2014, 9(2):213-223.
- [57] OTERO N, VITÓRIA L, SOLER A, et al. Fertilizer characterization; Major, trace and rare earth elements[J]. Applied geochemistry, 2005, 20(20):1473-1488.
- [58] RAMOS S J, DINALI G S, OLIVEIRA C, et al. Rare earth elements in the soil environment[J]. Current pollution reports, 2016, 2(1):28-50.