

海洋蕨藻的生物地理分布·生物学特性以及生物入侵

刘瑞, 李永梅, 王艺晓, 丁兰平, 黄冰心*, 杨楠, 陈彦伟

(天津师范大学生命科学学院, 天津市动植物抗性重点实验室, 天津 300387)

摘要 大型海藻的生物入侵对入侵区的生态环境、社会经济和人类健康造成严重威胁, 得到各国政府和科学界的广泛重视。其中, 主要的入侵类群如浒苔、蕨藻、松藻和裙带菜等, 在我国沿海不同水域有分布。结合我国东南沿海蕨藻物种多样性及地理分布等信息, 该研究较详细地介绍国际及国内蕨藻的地理分布、生物学特性及生物入侵现状, 了解国外采取的应对方法和预防措施, 为我国防范蕨藻等绿潮藻的入侵提供思路和方法, 对保障我国近岸水域生态安全具有一定的意义。

关键词 蕨藻; 生物入侵; 生物学特性; 压舱水

中图分类号 X834 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)04-0095-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.04.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Biogeographical Distribution, Biological Characteristics and Biological Invasion of *Caulerpa* (Chlorophyta) Seaweeds

LIU Rui, LI Yong-mei, WANG Yi-xiao et al (Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387)

Abstract The biological invasion of large seaweed poses a serious threat to the ecological environment, social economy and human health of the invaded area, it has received extensive attention from governments and the scientific community. Among them, the main invasive groups such as *Enteromorpha*, *Caulerpa*, *Codium* and *Undaria* were distributed in different waters along the coast of China. Combined with the species diversity and geographical distribution of *Caulerpa* in the southeast coast of China, the geographical distribution, biological characteristics and biological invasion status of international and domestic *Caulerpa* were introduced in detail, the countermeasures and preventive measures adopted abroad were realized to provide ideas and methods of preventing the possible invasion of green algae such as *Caulerpa*, which was of certain significance for the ecological security of coastal waters in China.

Key words *Caulerpa*; Biological invasion; Biological characteristics; Ballast water

蕨藻属(*Caulerpa*)属于绿藻门(Chlorophyta)蕨藻目(Caulerpales)蕨藻科(Caulerpaceae), 主要分布于从潮间带到水深50 m处的热带和亚热带海域沙地和珊瑚礁等坚硬基质上^[1-2]。藻体长度可达62 cm, 平均长度50~80 cm, 直立叶状体平均长度为2~10 cm^[3]。

蕨藻成分复杂, 主要含有蕨藻红素、多糖及丰富的矿物质和维生素, 具有很高的经济价值^[4]。凸镜状蕨藻(*C. lentilifera*) 100 g干样品的蛋白、碳水化合物、脂肪、可食纤维及灰分含量分别为10~13、38~59、0.86~1.11、33和24~37 g^[5-6], 总状蕨藻(*C. racemosa*) 100 g干样品的含量分别为17.8~18.4、33~41、9.8、64.9和7~19 g^[7-8]。目前, 主要有*C. bikenensis*、*C. brachypus*、*C. brownii*、*C. cactoides*、*C. chemnitzia*、*C. corynephora*、*C. cupressoides*、*C. cupressoides* var. *lycopodium*、*C. fergusonii*、*C. flexilis*、*C. geminata*、*C. hodkinsoniae*、*C. lamourouxii*、*C. lentillifera*、*C. longifolia*、*C. macrodisca*、*C. microphysa*、*C. obscura*、*C. okamurae*、*C. racemosa*、*C. racemosa* var. *macrophysa*、*C. scalpelliformis*、*C. serrulata*、*C. sertularioides*、*C. taxifolia*、*C. trifaria*、*C. veravalensis*和*C. vesiculifera*等20余种/变种可作为食品和/或调味品使用^[9-13]。在我国台湾、韩国、日本及东南亚沿海国家等早已被民众所接受^[14-15]。其中, 凸镜状蕨藻(俗称绿葡萄

藻、长茎葡萄蕨藻)作为一种暖温性大型经济绿藻, 由于其直立枝外形类似葡萄被称为“海葡萄”^[16], 可蘸酱调味生食、搭配海鲜凉拌或制成高级料理, 被称为“绿色鱼子酱”。

有些蕨藻, 如凸镜状蕨藻、棒叶蕨藻(*C. sertularioides*), 由于其色泽翠绿、形态优美、观赏性佳以及水质净化能力强, 成为海水水族馆热销的海藻种类^[1]。

然而, 近30年以来, 蕨藻由于在地中海、大西洋和太平洋等海域大面积生物入侵问题在国际上引起广泛关注^[3, 17-18], 东亚包括我国东南沿海水域都将可能成为其主要受害者, 因此需要对该类群的生物地理学、入侵特点进行全面了解, 防范在我国南部水域暴发此类绿潮藻成灾的可能性。

1 蕨藻生物地理分布

在自然条件下, 大型海藻固着生长于沿海岸岩石等硬基质上, 也有一部分漂浮生长, 但绝大多数种类都有其特定的分布区域^[19]。蕨藻自然分布于热带至亚热带水域, 在潮间带至潮下带海草草甸松散的砂质底部和珊瑚岩石等硬质表面上生长, 适应的光照和温度范围广。

1.1 蕨藻在国外的分布情况 蕨藻属由Lamouroux于1809年建立, 目前已记录384个种(包括变种变型), 其中仅有98个已得到证实^[20], 表1列举了国际已证实或待证实的物种数量及分布情况。

1.2 蕨藻在我国的分布情况 我国热带、亚热带地区有丰富的蕨藻资源, 南中国海地区都有报道, 共记录蕨藻属30个种、变种及变型^[21]。杉叶蕨藻分布地区最多, 遍及台湾、广东、香港、海南、西沙群岛和南沙群岛; 棒叶蕨藻分布于台湾、

基金项目 国家自然科学基金面上项目(31670199, 31400186); 天津市教委科研计划项目(JW1705); 天津师范大学引进人才基金项目(2016-2019); 天津市高校“学科领军人才培养计划”项目(2017-2019)。

作者简介 刘瑞(1991—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向: 大型海藻生理生态及其调控。*通信作者, 博士, 从事大型海藻资源及海洋生物技术研究。

收稿日期 2018-09-11

海南、西沙群岛^[21];总状蕨藻广泛分布于我国海南、广东、广西、东沙群岛、西沙群岛、台湾^[22]。表 2 列举了我国存在的蕨藻属物种及分布情况。

表 1 国际已证实或待证实的物种数量及分布			
Table 1 Quantity and distribution of international confirmed and waiting for confirmation species			
序号 No.	地区 Area	物种数量 Species	主要分布区 Main distribution area
1	亚洲东部	31 种 8 变种 17 变型	日本、中国、韩国
2	亚洲东南部	47 种 13 变种 22 变型	菲律宾、泰国、越南、印度尼西亚、新加坡、马来西亚、缅甸
3	太平洋岛屿	41 种 9 变种 10 变型	夏威夷群岛、马绍尔群岛、马里亚纳群岛、玻里尼西亚群岛、关岛、斐济、密克罗尼西亚、所罗门群岛、新喀里多尼亚、帕劳、萨摩亚群岛
4	亚洲西南部	36 种 7 变种 30 变型	印度、斯里兰卡、巴基斯坦、伊朗、也门
5	印度洋岛屿	44 种 7 变种 17 变型	迭戈加西亚环礁、马尔代夫群岛、毛里求斯、留尼汪、罗德里格斯岛、塞舌尔共和国
6	非洲	53 种 11 变种 17 变型	埃及、肯尼亚、马达加斯加岛、莫桑比克、索马里、南非、坦桑尼亚
7	澳洲	76 种 11 变种 6 变型	澳大利亚、新西兰、巴布亚新几内亚
8	欧洲	12 种 1 变种 1 变型	西班牙
9	大西洋岛屿	40 种 11 变种 7 变型	百慕大群岛、加那利群岛、佛得角群岛、马丁尼克、波多黎各、特立尼达岛
10	美洲	47 种 11 变种 11 变型	美国、墨西哥、巴拿马、委内瑞拉
11	大西洋西部	66 种 1 变型	特洛普亚特罗普

表 2 我国蕨藻属物种及分布			
Table 2 Distribution and species of <i>Caulerpa</i> in China			
序号 No.	中文名 Chinese name	学名 Scientific name	分布地点 Distribution
1	锯叶蕨藻	<i>Caulerpa brachypus</i>	台湾、南沙群岛
2	小蕨藻	<i>Caulerpa brachypus</i> f. <i>parvifolia</i> <i>Caulerpa chemnitzia</i>	台湾
3	柏叶蕨藻	<i>Caulerpa cupressoides</i>	台湾、南沙群岛
4	柏叶蕨藻扇形变种	<i>Caulerpa cupressoides</i> var. <i>flabellata</i> <i>Caulerpa cupressoides</i> var. <i>lycopodium</i> <i>Caulerpa cupressoides</i> var. <i>lycopodium</i> f. <i>amicorum</i>	南沙群岛 台湾 台湾、香港
5	墨西哥蕨藻	<i>Caulerpa mexicana</i>	南沙群岛
6	小叶蕨藻	<i>Caulerpa microphysa</i>	台湾
7	钱币蕨藻	<i>Caulerpa nummularia</i>	海南、西沙群岛
8	冈村蕨藻	<i>Caulerpa okamurae</i>	福建
9	盾叶蕨藻	<i>Caulerpa peltata</i>	南中国海
10	育枝蕨藻	<i>Caulerpa prolifera</i>	台湾、南沙群岛
11	总状蕨藻	<i>Caulerpa racemosa</i>	台湾、南沙群岛
12	总状蕨藻大叶变种	<i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>macrophysa</i>	台湾、南沙群岛
13	总状蕨藻盾叶变种	<i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>peltata</i>	南沙群岛
14	总状蕨藻西方变种	<i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>occidentalis</i>	台湾
15	总状蕨藻管状变种	<i>Caulerpa racemosa</i> var. <i>turbinata</i>	台湾
16	齿形蕨藻宽叶变型	<i>Caulerpa serrulata</i> f. <i>lata</i>	南沙群岛、西沙群岛、台湾
17	齿形蕨藻宝力变种西方变型	<i>Caulerpa serrulata</i> var. <i>boryana</i> f. <i>occidentalis</i>	南沙群岛
18	齿形蕨藻	<i>Caulerpa serrulata</i> <i>Caulerpa serrulata</i> f. <i>angusta</i>	台湾、南沙群岛 台湾
19	棒叶蕨藻	<i>Caulerpa sertularioides</i>	台湾、海南、南沙群岛
20	棒叶蕨藻长柄变种	<i>Caulerpa sertularioides</i> var. <i>longipes</i>	台湾、香港
21	杉叶蕨藻	<i>Caulerpa taxifolia</i>	台湾、广东、香港、海南、西沙群岛、南沙群岛
22	乌微里蕨藻	<i>Caulerpa urvilleana</i>	南沙群岛
23	轮生蕨藻	<i>Caulerpa verticillata</i>	海南、南沙群岛
24	绒毛蕨藻	<i>Caulerpa webbiana</i>	南沙群岛、西沙群岛、台湾
25	绒毛蕨藻绒毛变型	<i>Caulerpa webbiana</i> f. <i>tomentella</i>	台湾
26	绒毛蕨藻双列变型	<i>Caulerpa webbiana</i> f. <i>disticha</i>	台湾

2 蕨藻的生物学特性

蕨藻整个植株及分枝内部原生质体完全相连相通,属于一个多核细胞,蕨藻属的杉叶蕨藻被公认为世界上最大、分化最好的单细胞生物。

2.1 蕨藻的形态特征 蕨藻藻体一般由假根、匍匐茎和直立枝三部分组成(图 1)。自然情况下,匍匐茎沿着基质向四周

散布平卧生长,通过向下产生须状假根固着于基质上,向上产生直立枝(叶状体)。直立枝形状因种类不同而异,包括螺旋纹状、叶片状、羽状、海绵状、泡状等。光线良好、营养条件适宜的环境下直立枝可达 5~10 cm^[3]。

2.2 蕨藻的繁殖特点 蕨藻具有有性和无性 2 种繁殖方式,但其作用或过程并不相同。其有性繁殖方式为异配生殖,条

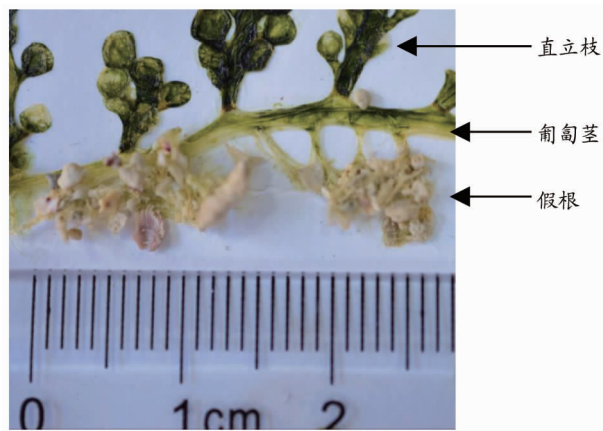


图1 总状蕨藻外形(部分)

Fig.1 Shape of *Caulerpa racemosa* (Part)

件合适情况下通过末枝浅表突起产生凝胶质瘤状的配子囊。其无性繁殖即为营养生殖,以藻体断裂分离的方式进行。

无性繁殖是蕨藻扩散的主要方式^[17]。无性繁殖的增殖速度非常快,正常生长状况下通过尖端扩张生长,比其他通过细胞分裂生长的植物都要快,环境适宜时每天约长 4.6 cm^[2]。

利用蕨藻的无性繁殖特点,人工增殖一般利用断裂的方式进行,藻体组织片段如匍匐茎、直立枝等都可以通过尖端生长的方式进行增殖。

蕨藻的生物入侵也是利用其无性繁殖的特性,如杉叶蕨藻主要依赖无性繁殖和耐受低温的繁殖特征导致在地中海西北部大量繁殖扩散^[18]。

2.3 蕨藻生长的主要影响因素 作为热带、亚热带大型海藻的主要类群之一,蕨藻的形态建成过程受近岸水域地理、水文、生态环境的影响。

温度是影响蕨藻生理代谢活动的重要环境因素,直接影响蕨藻细胞内酶的活性,还可能影响叶绿素的活性^[2]。总状蕨藻的形态受温度影响较大,其藻体生长情况随着温度变化而变化,在海水 24~28 ℃ 时正常生长,水温低于 14 ℃ 时藻体出现白化现象;水温高于 31 ℃ 时,藻体生长变慢,直立茎延长缓慢;水温长时间高于 33 ℃ 时,藻体直立茎上的球状小枝稀少^[23]。由此可见,总状蕨藻在生长期间,温度的降低会迅速地影响其生长,当温度再次上升后又可以恢复生长。总状蕨藻生长的适宜环境条件为:温度 22~31 ℃,盐度 30‰~37‰,pH 6.8~8.8,光照强度 3 000~4 000 lx^[2]。也有报道在营养适宜条件下,温度 30 ℃、盐度 25 ‰、光照强度 2 000 lx 时棒叶蕨藻生长最好^[24]。

3 蕨藻的生物入侵

蕨藻生长速度极快,能够快速蔓延,其在全球范围的地理分布是全球热带到亚热带海域^[4],一些物种延伸到地中海和澳大利亚的温带地区,多样性最高的物种在澳大利亚被发现^[25]。如今,杉叶蕨藻在世界水域已经成为主要入侵的大型绿藻种类之一,除热带和亚热带海域外,也入侵到地中海以及澳洲的温带区域^[1],尤其在亚得里亚海、北大西洋西

岸南美洲东南沿岸海域、非洲北部地中海西南部海域、北太平洋东岸南美洲南部海岸、太平洋西岸澳大利亚东部海域广泛分布^[26-29]。蕨藻高度入侵的特性有赖于其具有的高度适应环境以及快速生长的生物学特性。

目前,蕨藻的入侵物种主要有杉叶蕨藻、剖刀状蕨藻(*C. scalpelliformis*)、奥利蕨藻(*C. ollivieri*)、总状蕨藻、棒叶蕨藻、锯叶蕨藻(*C. brachypus*)等^[27,30-35]。

3.1 入侵蕨藻的起源及现状 关于蕨藻的入侵,据记载杉叶蕨藻最早于 1984 年在摩洛哥海洋博物馆由于废水排放引入到地中海^[34],后迅速繁殖,到 20 世纪末期已经蔓延到欧洲所有海洋和大部分地中海区域,总散布区域面积超过 13 000 hm²^[3];总状蕨藻是一种从澳大利亚西南部引入地中海的海洋绿藻,自 1990 年以来,它一直在入侵地中海和加那利群岛^[36]。在 1965 年,剖刀状蕨藻首次被记载出现在巴西海岸的热带地区^[37],由于分布较少并未引起关注,2001 年才在巴西圣保罗北部海岸 Baleia 海滩的岩石底层首次被注意到;锯叶蕨藻在 2001 年 5 月佛罗里达东南部的珊瑚礁群落被发现,是佛罗里达经历的前所未有绿藻植物入侵的始作俑者,其入侵可能与当地海域某些草食性鱼类大量死亡有关^[35]。

蕨藻侵入适宜生长的新海域后迅速繁殖,其匍匐茎端部会大量生长形成巨大的藻床,逐渐发展成为新的“优势种”,直至覆盖住整片海床。藻床不但遮挡阳光,也大大降低其下海水交换率,不仅对珊瑚礁造成危害,也危害当地其他物种。严重破坏生物多样性,加速当地其他物种的消亡甚至灭绝,造成海域的生态浩劫^[38]。例如地中海北部大面积的海底大量生长杉叶蕨藻,逐渐形成密集的单一种群,阻止当地海域海草场的扩展,最终几乎排挤掉所有的海洋生物,不仅破坏当地的海洋生物,还破坏生态系统和渔民的生计,同时地中海鲷鱼(*sarpa salpa*)食入杉叶蕨藻后在体内积累毒素,被人类食用后影响人类的身体健康^[39];巴西东南部圣保罗州海岸剖刀状蕨藻入侵造成本地特有的马尾藻群落的消失,并且带来越来越多的有机污染物^[40]。入侵种杉叶蕨藻已经在地中海、加州、澳洲等地造成重大损失^[28]。

3.2 蕨藻入侵途径 海洋环境中,引进外来物种主要通过内陆海洋运河、压舱水、船舶污染、水产养殖、养殖饵料、科学研究和水族箱等载体,尤其船舶压舱水成为许多海洋物种入侵的主要途径^[41]。据估计,每年在全球范围内转移 100 亿 t 压舱水^[39];每天通过船舶在世界各地转运的生物物种数则可能超过 3 000 种^[42]。在世界范围内,压舱水引起的生物入侵的例子比比皆是,包括海藻、鱼、牡蛎、多毛类、软体动物、海星、其他浮游动物以及霍乱弧菌。其中,许多生物已造成明显的生态影响,导致大量经济损失,有一些甚至给人类健康造成直接的威胁。

3.3 各国采取的应对措施 一些地中海沿岸国家(如西班牙、法国)试图根除和控制入侵蕨藻,甚至采取禁止水族贸易种类的方法^[36];在美国加州调查 26 个水族商店发现了 16 种蕨藻,科学家们敦促加州采取立法措施禁止蕨藻的水族贸易^[43]。

但在海洋环境中管理生物入侵物种比在内陆地区管理

面临更多挑战:由于海洋环境的连续性,几乎不可能封锁一个地区,任何适用于某片海域某种海藻的应对方法,如毒药投放等都有可能蔓延到其他海域。

为了有效抑制藻类入侵,各国采用过的主要方法有:①氯处理。试验证明只有漂白剂(5%次氯酸钠)可以导致藻类叶状体白化直至组织解体^[29]。因此,采用聚氯乙烯(PVC)框架搭载固体释氯片覆盖在入侵的杉叶藻上,可将其杀灭。但是部分氯在海水环境下被稀释、分解和失活导致氯的消散可能会很快,此种方法存在一定局限。②营养控制。巴哈马地中海地区的研究表明,实现人为氮输入的减少,可以作为控制藻类入侵的手段^[31]。当地海草的最小光需求量大于入射面辐照度的10%,而入侵藻类则为<1%,同等光照条件下,入侵藻类显示出优越的竞争优势。③SCCAT(日本株式会社西武)制作、分发出10万份说明藻类入侵危险性的安全教育手册;南美洲圣地亚哥市议会禁止出售和私有藻类^[43]。

4 讨论

目前,藻类的某些种类已在东亚和东南亚有较广泛的栽培应用,而另一些类群则成为严重的生物入侵种,已在地中海、大西洋、太平洋和印度洋等地有入侵报道,受害程度不一。一些栽培种类和生物入侵种类在我国南部沿海都有分布,因此类似经济和环境关系对应地存在着藻类栽培和生物入侵并存的态势。作为海藻产品需求大国,我们在提倡发展大规模藻类栽培产业的同时,需要关注藻类入侵问题,减少和防范入侵物种的扩展和蔓延,保护我国沿海生态系统。

应对藻类大范围入侵,国外已积极采取措施,但海洋环境的复杂性增大了治理难度和成本,没有统一科学有效且环保可行的方法。应对我国藻类的可能入侵,需要沿海地区积极行动起来,从开展基础生物学、生物入侵行为及环境适应机制等多学科入手,为其生物入侵的防治提供新思路。

参考文献

- [1] 丁兰平,王展,黄冰心.杉叶藻——一种较好的海水观赏藻[J].科学养鱼,2014(6):80.
- [2] 王展.海洋绿藻——藻类(*Caulerpa*)的环境适应及其白化机制初探[D].汕头:汕头大学,2015.
- [3] MEINESZ A, HESSE B. Introduction et invasion de l'algue tropicale *Caulerpa taxifolia* en Méditerranée nord-occidentale [J]. *Océanologica acta*, 1991, 14(4): 415-426.
- [4] 向江波,邓建朝,杨贤庆,等.响应面法优化微波辅助提取长茎葡萄蕨藻中藻类色素[J].食品与发酵工业,2016,42(6):209-214.
- [5] RATANA-ARPORN P, CHIRAPART A. Nutritional evaluation of tropical green seaweeds *Caulerpa lentillifera* and *Ulva reticulata* [J]. *Kasetsart journal-natural science*, 2006, 40(S1): 75-83.
- [6] MATANJUN P, MOHAMED S, MUSTAPHA N M, et al. Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Eucheuma cottonii*, *Caulerpa lentillifera* and *Sargassum polycystum* [J]. *Journal of applied phycology*, 2009, 21(1): 75-80.
- [7] SANTOSO J, GUNJI S, YOSHIE-STARK Y, et al. Mineral contents of Indonesian seaweeds and mineral solubility affected by basic cooking [J]. *Food science & technology research*, 2006, 12(1): 59-66.
- [8] KUMAR M, GUPTA V, KUMARI P, et al. Assessment of nutrient composition and antioxidant potential of *Caulerpaceae* seaweeds [J]. *Journal of food composition & analysis*, 2011, 24(2): 270-278.
- [9] CONTE E, PAYRI C. Present day consumption of edible algae in French Polynesia: A study of the survival of pre-European practices [J]. *Journal of the polynesian society*, 2006, 115(1): 77-93.
- [10] SANDERSON J C, BENEDETTO R D. Tasmanian seaweeds for the edible market [R]. Taroona: Marine Laboratories Department of Sea Fisheries Crayfish Point, 1988.
- [11] LEWMANOMONT K. Some edible algae of Thailand [J]. *The Kasetsart journal*, 1978, 12(2): 119-129.
- [12] LEE Y. Marine algae of Jeju [M]. Seoul: Academy Publication [in Korean], 2008: 177.
- [13] GOMEZ-GUTIERREZ C M, GUERRA-RIVAS G, SORIA-MERCADO I E, et al. Marine edible algae as disease preventers [J]. *Elsevier science & technology*, 2011, 64: 29-39.
- [14] TSENG C K. Common seaweeds of China [M]. Beijing, China: Science Press, 1983: 282-284.
- [15] SMITH C M, WALTERS L J. Fragmentation as a strategy for *Caulerpa* species: Fates of fragments and implications for management of an invasive weed [J]. *Marine ecology*, 1999, 20(3/4): 307-319.
- [16] KUDAKA J, ITOKAZU K, TAIRA K, et al. Investigation and culture of microbial contaminants of *Caulerpa lentillifera* (Sea Grape) [J]. *Journal of the food hygienic society of Japan*, 2008, 49(1): 11-15.
- [17] CECCHERELLI G, PIAZZI L. Dispersal of *Caulerpa racemosa* fragments in the Mediterranean: Lack of detachment time effect on establishment [J]. *Botanica marina*, 2001, 44(3): 209-213.
- [18] JOUSSON O, PAWLOWSKI J, ZANINETTI L, et al. Invasive alga reaches California—The alga has been identified that threatens to smother Californian coastal ecosystems [J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 157-158.
- [19] 丁兰平,黄冰心,谢艳齐.中国大型海藻的研究现状及其存在的问题[J].生物多样性,2011,19(6):798-804.
- [20] GUIRY M D, GUIRY G M. World-wide electronic publication [M]. Galway, Ireland: National University of Ireland, 2017.
- [21] 丁兰平,黄冰心,栾日孝.中国海洋绿藻门新分类系统[J].广西科学,2015,22(2):201-210.
- [22] 邵海艳,吉宏武.总状藻多糖体外抗肿瘤作用[J].食品科学,2014,35(11):251-254.
- [23] SHI C H. Field survey and culture studies of *Caulerpa* in Taiwan [D]. Taipei: National Sun Yat-sen University, 2008.
- [24] 袁荣荣,何文辉,宋海燕,等.环境因子对羽毛藻生长的初步研究[C]//中国环境科学学会.2015年中国环境科学学会学术年会论文集.北京:中国环境科学出版社,2015:5589-5594.
- [25] GLASBY T M. *Caulerpa taxifolia* in seagrass meadows: Killer or opportunistic weed? [J]. *Biol Invasions*, 2013, 15: 1017-1035.
- [26] FAMÁ P, JOUSSON O, ZANINETTI L, et al. Genetic polymorphism in *Caulerpa taxifolia* (Ulvophyceae) chloroplast DNA revealed by a PCR-based assay of the invasive Mediterranean strain [J]. *Journal of evolutionary biology*, 2002, 15(4): 618-624.
- [27] KOMATSU T, ISHIKAWA T, YAMAGUCHI N, et al. But next time?: Unsuccessful establishment of the Mediterranean strain of the green seaweed *Caulerpa taxifolia* in the Sea of Japan [J]. *Biological invasions*, 2003, 5(3): 275-277.
- [28] WILLIAMS S L, SCHROEDER S L. Eradication of the invasive seaweed *Caulerpa taxifolia* by chlorine bleach [J]. *Marine ecology progress series*, 2004, 272: 69-76.
- [29] ANDERSON L W J. California's reaction to *Caulerpa taxifolia*: A model for invasive species rapid response [J]. *Biological invasions*, 2005, 7(6): 1003-1016.
- [30] ERTAN O O, TURNA I I, FURNARI G A. A new record for the marine algal Flora of Turkey: *Caulerpa scalpelliformis* (Brown ex Turner) C. Agardh (Caulerpaceae, Chlorophyceae) [J]. *Turkish journal of botany*, 1998, 22(4): 285-288.
- [31] LAPOINTE B E, BARILE P J, WYNNE M J, et al. Reciprocal *Caulerpa* invasion: Mediterranean native *Caulerpa olivieri* in the Bahamas supported by human nitrogen enrichment [J]. *Aquatic invaders*, 2005, 6(2): 2-5.
- [32] VERLAQUE M, AFONSO-CARRILLO J, GIL-RODRÍGUEZ M C, et al. Blitzkrieg in a marine invasion: *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Bryopsidales, Chlorophyta) reaches the Canary Islands (northeast Atlantic) [J]. *Biological invasions*, 2004, 6(3): 269-281.
- [33] VÁZQUEZ-LUIS M, SANCHEZ-JEREZ B, BAYLE-SEMPERE J T. Changes in amphipod (Crustacea) assemblages associated with shallow-water algal habitats invaded by *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* in the western Mediterranean Sea [J]. *Marine environmental research*, 2008, 65(5): 416-426.
- [34] PIAZZI L, BALATA D, CECCHERELLI G, et al. Comparative study of the growth of the two co-occurring introduced green algae *Caulerpa taxifolia* and *Caulerpa racemosa* along the Tuscan coast (Italy, western Mediterranean) [J]. *Cryptogamie algologie*, 2001, 22(4): 459-466.

基质中对植物的影响还需进一步研究。此外,该试验仅研究了润湿剂对基质水分的表面影响,更深层次的影响机理还需进一步试验证明^[19]。需注意的是,润湿剂并不等同于供水剂,因此在土壤含水量低于一定程度时需采取一定的抗旱措施进行抗旱^[7]。

参考文献

- [1] 范富,侯迷红,张庆国,等.不同质地土壤应用保水剂效果研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):96-103.
- [2] 黄占斌,万会娥,邓西平,等.保水剂在改良土壤和作物抗旱节水中的效应[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):52-55.
- [3] MASCIA S,SEILER C,FITZPATRICK S, et al. Extrusion-spherionisation of microcrystalline cellulose pastes using a non-aqueous liquid binder[J]. Int J Pharm, 2010,389(1/2):1-9.
- [4] 李永胜,杜建军,谢勇,等.聚丙烯酰胺型保水剂对基质持水性和菜心生长的影响[J].中国农学通报,2005,21(10):402-404.
- [5] 李杨,王百田.保水剂对土壤物理性状和棉花生长的影响[J].江苏农业科学,2015,43(10):97-99.
- [6] 李亚东,杨兰芳,李海波,等.聚丙烯酸钠(SP)保水剂对不同基质氮、磷、钾、钠林溶的影响[J].环境科学学报,2012,32(6):1445-1453.
- [7] 蓝松涛,蔡文伟,杨本鹏,等.保水剂特性及其对甘蔗抗旱性的影响[J].广东农业科学,2014(15):9-15.
- [8] 吴琳杰,张志铭,赵勇,等.土壤水分条件及保水剂用量对侧柏、栓皮栎种子萌发及幼苗生长的影响[J].西部林业科学,2016,45(1):112-116,130.
- [9] 许红军,宋冰燕,吴慧,等.聚丙烯酰胺保水剂在番茄育苗中的应用研究[J].黑龙江农业科学,2015(11):64-66.
- [10] MICHEI J C. The physical properties of peat: A key factor for modern growing media[J]. Mires and peat, 2010,6(2):1-6.
- [11] 耿俊峰,宋士娟,鲍静静,等.应用润湿剂促进 WFGD 系统脱除细颗粒物的性能[J].化工学报,2011,62(4):1084-1090.
- [12] 黄锋,卢桂英.石墨炉原子吸收光谱法测定土壤保水剂中的微量镉[J].现代科学仪器,2017(2):98-100.
- [13] 徐俊超,于燕,张军,等.润湿剂促进细颗粒在水汽条件下长大的实验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(1):67-72.
- [14] 颜金培,陈立奇,杨林军.润湿剂促进燃煤细颗粒声波团聚脱除的实验研究[J].燃料化学学报,2014,42(10):1259-1265.
- [15] WANG K,MA X P,JIANG S G,et al. Application study on complex wetting agent for dust-proof after gas drainage by outburst seams in coal mines[J]. International journal of mining science and technology, 2016, 26:669-675.
- [16] 李雪,洪燕龙,鲜洁晨,等.基于转矩流变性的中药微丸润湿剂用量筛选研究[J].中国中药杂志,2017,42(17):3341-3349.
- [17] 郭世文,李品芳,芦凉,等.不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影响[J].中国农业大学学报,2017,22(1):1-11.
- [18] 郑洪倩,李萍萍,赵青松,等.基质含水量对温室栽培莴苣生长和生理特性的影响[J].江苏农业科学,2012,40(1):147-149.
- [19] DELELEGN Y T, PURAHONG W, BLAZEVIĆ A, et al. Changes in land use alter soil quality and aggregate stability in the highlands of northern Ethiopia[J]. Scientific reports, 2017(7):1-12.
- [35] LAPOINTE B E, BEDFORD B J. Ecology and nutrition of invasive *Caulerpa brachypus f. parvifolia* blooms on coral reefs off southeast Florida, U.S.A. [J]. Harmful Algae, 2010, 9(1):1-12.
- [36] KLEIN J, VERLAQUE M. The *Caulerpa racemosa* invasion: A critical review [J]. Marine pollution bulletin, 2008, 56(2):205-225.
- [37] JOLY A B, UGADIM Y, OLIVEIRA E C D, et al. Additions to the marine flora of Brazil [J]. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Botânica, 1956, 13(13):5-21.
- [38] RIZZO L, PUSCEDDU A, STABILI L, et al. Potential effects of an invasive seaweed (*Caulerpa cylindracea*, Sonder) on sedimentary organic matter and microbial metabolic activities [J]. Scientific reports, 2017, 7(1):1-10.
- [39] DE POORTER M. Marine menace: Alien invasive species in the marine environment [R]. IUCN, 2009:32.
- [40] FALCAO C, DE SZECHY M T M. Changes in shallow phytobenthic assemblages in southeastern Brazil, following the replacement of *Sargassum vulgare* (Phaeophyta) by *Caulerpa scalpelliformis* (Chlorophyta) [J]. Botanica marina, 2005, 38(3):208-217.
- [41] THIBAUT T, MEINESZ A, COQUILLARD P. Biomass seasonality of *Caulerpa taxifolia* in the Mediterranean Sea [J]. Aquatic botany, 2004, 80(4):291-297.
- [42] 海事界联合解决压舱水污染[N]. 大公报, 2009-03-17.
- [43] WITHGOTT J. California tries to rub out the monster of the lagoon [J]. Science, 2002, 295(5563):2201-2202.

(上接第 98 页)