

人工藻结皮技术及其在沙漠治理中的应用

饶本强^{1,2,3} 刘永定¹ 胡春香¹ 李敦海¹ 沈银武¹ 王伟波^{1,3}

(1. 中国科学院水生生物研究所, 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072;

2. 信阳师范学院生命科学院 信阳 464000; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

THE TECHNOLOGY OF MAN-MADE ALGAL CRUST AND ITS APPLICATIONS IN CONTROL OF DESERTIFICATION

RAO Ben-Qiang^{1,2,3}, LIU Yong-Ding¹, HU Chun-Xiang¹, LI Dun-Hai¹, SHEN Yin-Wu¹ and WANG Wei-Bo^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072;

2. Life Science College, Xinyang Normal University, Xinyang 464000; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

关键词: 沙漠化; 荒漠藻; 人工藻结皮技术; 固沙; 沙漠化治理

Key words: Desertification; Desert algae; Technology of artificial algae crust; Fixing-sand; Control of desertification

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2009)04-0756-06

沙漠化是荒漠化的主要类型之一,它是指干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人地关系不相协调所造成的以风沙活动为主要标志的土地退化^[1]。我国是世界上受沙漠化危害最严重的国家之一,土地沙漠化发展的速率不断加快,20世纪90年代后期即以每年3600 km²的速度在扩展,到2000年,我国北方沙漠化土地已达到38.57万 km²^[1,2]。尽管我国开展沙漠化研究与防治已半个世纪,但目前我国沙漠化防治仍然面临着“局部治理、整体恶化”的严峻态势。50多年来,我国西部地区虽营造了大量绿洲防护林,但由于降水量减少,地下水位降低,加上天然草场退化和森林面积锐减所造成的水源涵养功能衰退、调蓄能力下降,使西部地区的沙漠化问题更加严重。原来固定、半固定的沙丘活化,在强风的作用下,流沙南侵,耕地沙化、植被退化严重,沙尘暴、干热风频频侵袭危害绿洲农田、牧场和城市。沙漠化带来的西部生态环境恶化,不仅给经济发展和人民生活造成了巨大的损失,也直接影响了西部大开发战略的实施。长期以来,植树造林和种草是沙漠治理的主要途径,在实践中也取得一定成效。然而,通过植树造林等传统方式进行沙漠治理有时很难达到治沙目标^[3]。

治理沙漠化必须要有新的思路。解决防沙治沙和生态

环境建设中存在的问题,关键在于推广科研成果和实用技术,加速成果的转化利用。20世纪80年代以来,伴随着沙漠化威胁的日益加重,生物结皮在荒漠生态系统中的作用愈发突出。生物结皮在荒漠土壤中的保水、改良、防风固沙及全球气候变化等方面所具有的生态功能引起了生态学家的普遍重视,并渐渐成为荒漠地区生态研究的热点^[4-13]。在干旱、半干旱的生态系统稳定和退化生态系统恢复评价过程中,生物结皮被作为重要指标,生物结皮资源的保护也被列为荒漠生态系统管理最优先等级^[14,15]。生物结皮的相关研究成果为荒漠化地区的防沙治沙提供了低成本、高效益的新途径。在干旱沙漠区通过人工培植生物结皮以治理沙漠的设想,是值得研究的重要课题^[3]。因此,实现生物结皮的人工培育及大量快速繁殖,加速实用技术的开发应用,对沙漠治理及生态环境改善具有重要的科学意义和现实意义。随着人们对生物结皮研究的不断深入,一种治理沙漠化的新技术——荒漠藻人工藻结皮技术应运而生并经过试点应用,取得了良好的固沙效果。该技术提供了一种利用荒漠藻类快速固定流沙的方法,具有快速、高效、持久的固沙成土和增肥效果,适宜于全球干旱、半干旱地区流动和半流动沙丘的固定和成土过程。本文对该技术及其应用前景作以介绍,旨在探讨荒漠藻

收稿日期: 2007-11-10; 修订日期: 2008-10-29

基金项目: 淡水生态与生物技术国家重点实验室项目(2008FBZ21); 武汉市科技局与内蒙古自治区发改委重大科技产业化专项(200720112031); 信阳师范学院青年骨干教师计划资助

作者简介: 饶本强(1974—),男,汉族,河南信阳人;博士研究生;主要从事荒漠藻类生物学研究。E-mail: rbqxyl@163.com

通讯作者: 刘永定, E-mail: liuyd@ihb.ac.cn

人工藻结皮技术在沙漠化治理中的重要性及其可行性。

1 荒漠藻人工藻结皮技术概况

所谓荒漠藻人工藻结皮技术,就是运用藻类生态、生理学原理和生物结皮理论,分离、选育野生结皮中的优良藻种,经大规模人工培养后返接流沙表面,使其在流沙表面快速形

成、发育成具有藻类、细菌、真菌、地衣和苔藓在内的生物结皮,而用以治理沙漠化的一项综合技术。该技术主要包括 5 个方面:(1)优良结皮藻种的分离、纯化与选育;(2)藻种的大规模培养;(3)工程化制种;(4)野外工程化接种;(5)人工藻结皮的培植与维护。

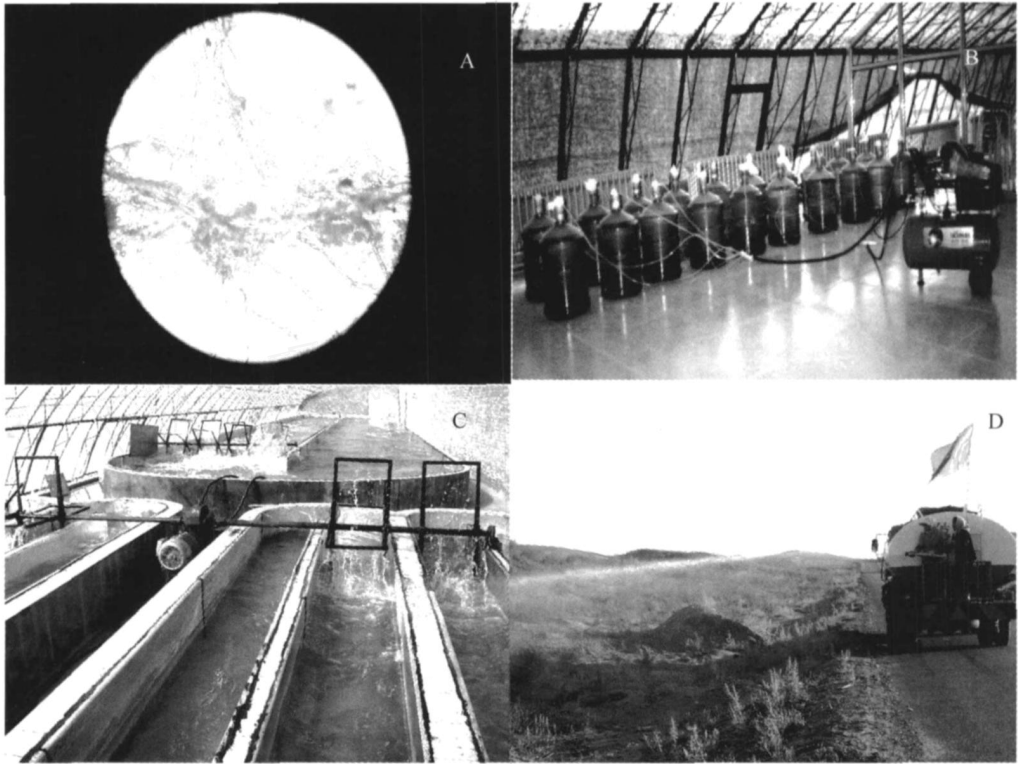


图 1 人工藻结皮技术概览图

Fig. 1 The survey of man-made algal crust technology

- A. 优良结皮藻种的分离与显微观察; B. 结皮藻种的扩大培养; C. 结皮藻种的工程化培养; D. 结皮藻类的野外工程化接种
A. Separation and microcosmic observation of excellent crust algae; B. Enlarged culture of crust algae; C. Engineering culture of crust algae; D. Engineering inoculation of crust algae in the field

早在 20 世纪 50 年代,以黎尚豪院士为首的藻类工作者开创了稻田土壤蓝藻的改土肥田研究和旱地农业的土壤蓝藻生物学研究^[16—20]。他们从 1996 年开始,进一步将土壤环境扩展到荒漠地区,并将荒漠藻的基础研究与荒漠化治理联系起来,先后在腾格里沙漠、甘肃河西走廊地区、古尔班通古特沙漠、库布齐沙漠等开展了生物结皮中藻类的种类组成、分布、演替规律的研究和结皮形成机理、精细结构以及荒漠藻类在固沙成土等方面的研究^[21—29]。同时,筛选到适合于固沙的藻种与藻种组合,实现了荒漠藻的工程化制种,并摸索出了野外流沙上的藻类接种方法。在这些长期的荒漠藻室内研究和野外实验的基础上,刘永定等提出了利用荒漠藻类进行人工固沙结皮的理念,并结合干旱、半干旱地区的自然地理、天然植被、土质特征以及其他辅助条件,将荒漠藻类引入到沙漠化生态治理实践,形成了荒漠藻人工藻结皮技术的雏形。2005 年 9 月,以魏江春院士为组长的鉴定专家组一致认为荒漠藻人工藻结皮技术能够有效固定流沙,并创造性地将藻、草、灌、乔相结合,以修复、重建荒漠生态系统为

目的,开辟了沙漠化治理的新途径,具有重大的科学意义和实用价值。这标志着荒漠藻人工藻结皮技术的正式形成。荒漠藻人工藻结皮技术与传统生物固沙措施相结合,具有互相促进和互相弥补的作用,可以大大提高固沙效果,是一种有效的治沙新技术。从国内外的报道来看,关于荒漠藻人工藻结皮技术的应用研究和工程化实践仅限于我国,并且在我国内蒙古地区已经开展了利用荒漠藻人工藻结皮治理沙漠的较大规模的推广应用。国外只有少数文献介绍了接种蓝藻改善荒漠土壤的研究,且局限于小型试验研究阶段^[30—32]。就目前而言,我国在荒漠藻人工结皮技术的研究和应用方面应处于世界领先水平。

2 荒漠藻人工藻结皮技术在沙漠治理中的作用

荒漠藻类是陆生藻类的一个特定的生态学类群,主要是指生长在荒漠地区的藻类生物。作为先锋拓殖生物,荒漠藻类能够在条件恶劣的环境下(如干旱、紫外线辐射、营养贫瘠等)生长、繁殖,并通过自身的活动,影响并改变着环境^[13]。荒漠藻类能在沙漠表层形成固定流沙的生物结皮。

生物结皮是在荒漠藻类拓殖作用下由活的微小生物及其代谢产物与细微砂粒组成,是土壤颗粒与有机物紧密结合在土壤表层形成的一种壳状体。采用荒漠藻人工藻结皮技术能够在短期内形成固沙藻结皮,而自然结皮的形成则需要较长的时间。接种到沙地表面的藻类能够快速生长和发育,大量的藻类丝状体将沙粒胶结在一起而形成藻类-沙粒结皮。随着藻类-沙粒结皮的发育及演替,加之细颗粒物沉积和大气降尘积累所带来的物质输入,促进了沙漠表面营养物质的富集,为微型土壤生物的繁殖和短命草本植物的拓殖创造了条件,继而推进沙漠生态系统进入良性循环过程。将荒漠藻人工藻结皮技术与传统生物治沙技术相结合,可以因地制宜地建立不同类型的藻类、草本、灌木、乔木三位(或四位)一体的稳定的近自然的生态系统。该项技术的优势在于:一是在干旱荒漠地区使用植物固沙,由于水分平衡的问题,植物不可能完全覆盖沙面而起到完全控制风蚀的作用,即使在半干旱区植物固沙的初期阶段也是如此,利用荒漠藻类形成的结皮与其他植物固沙措施的结合可以弥补这一不足,在植物的行间(株间)用荒漠藻人工结皮覆盖沙表面,可以大大提高固沙效果;二是荒漠藻人工结皮的形成可以加快土壤形成过程,提高土壤肥力,加速沙化土地的改良;三是荒漠藻人工结皮和高等植物在生长和生存环境方面具有互相促进和互相弥补的作用,从微尺度到小、中尺度乃至大尺度逐级提高生物多样性,加快近自然生态系统的建立。

生物治沙最重要的是沙表面的固定和水分平衡,藻类结皮的固沙作用和保水、节水功能控制了沙面的流动性,为高等植物的定居创造了生存环境,其改土和肥田的作用又可以促进高等植物的生长。而高等植物可以减低风速、减弱风蚀以及庇荫的作用为藻类结皮的初期形成创造了条件。沙面一旦形成结皮层,则增加了地表的粗糙度,抗风能力也明显提高,使沙面趋于稳定。而且结皮层是沙土养分富集区,通过物质、能量的循环作用,对改善风沙土具有积极的作用。荒漠藻人工结皮具有的固沙、治沙作用主要表现在:

1)增强沙漠地表的抗侵蚀能力。沙面接入藻种后,藻类大量的丝状体同沙粒颗粒结合,所分泌的有机凝胶体和多聚糖将松散的土粒粘结在一起,形成了一个致密的抗蚀层,直接增强沙土表面的稳定性和抗风蚀的能力。

2)改善沙漠土壤养分。沙面接入藻种后,藻类通过其生长和代谢作用,带动土壤异养微生物的生长,增加了沙漠地表中的生物多样性,从而促进沙质的矿化过程和土壤物质循环及流动,并有利于改变土壤的理化性质,增加土壤有机质及C、N、P含量,加速了沙漠土壤的演化和原始成土过程。

3)保持沙漠土壤水分。接入藻种后形成的固沙藻结皮在发育过程中,结皮中的水稳性土壤团聚体和有机质含量大大增加,土壤的吸湿性、可塑性明显提高,这些都有利于保持沙漠表层土壤的含水量和降低土壤水分的挥发速率。

4)促进沙生植物的拓殖和恢复。荒漠藻人工结皮的快速发育及演替,极大改善了沙漠土壤表层和结皮下层的水分

和养分状况,为其他植物类群的大面积定居和繁衍创造了良好的基础条件。当植物的积累连续不断地在沙土表面形成有机腐殖质层,草本和木本植物侵入和拓殖的机会大大增加^[33]。

3 荒漠藻人工藻结皮技术在沙漠化治理中的应用

2000年以来,中国科学院水生生物研究所联合内蒙古林业科学研究院,在库布齐沙漠东缘的达拉特旗建立了3000亩的荒漠藻综合治沙基地和规模化的示范区,实施了荒漠藻综合固沙工程试验。试验区地处北纬40°21′30″—22°30′,东经109°50′30″—51°50′,位于鄂尔多斯高原的北缘,属中温带大陆性季风气候。立地类型主要有流动沙丘,半固定、固定沙丘和丘间地。通过采用荒漠藻人工藻结皮技术,将结皮优势藻种如微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、伪枝藻(*Scytonema javanicum*)等大规模人工培养制种后,根据立地条件分别进行了流动沙丘流沙、流沙草方格藻类接种和几种模式的藻-草-灌-乔接种试验,如半固定沙丘的披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)藻类(algae)模式、沙蓬(*Agripylum squarrosus*)藻类(algae)模式、固定沙丘沙打旺(*Astragalus adsurgens*)沙蒿(*Artemisia desertorum*)藻类(algae)模式、丘间地沙柳(*Salix psammophila*)羊草(*Aeluropidium chinensis*)藻类(algae)模式、杨树(*Populus tomentosa*)羊草(*A. chinensis*)藻类(algae)模式等。试验发现,藻种接入流动沙地后,先经历短期的适应,几天后藻类生物量迅速增加,到第9天就可形成藻类-沙粒结皮。流沙区接入藻种20d后,固沙藻结皮呈绿色、结皮厚度为1mm、叶绿素含量达65.73 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,而流沙对照区无藻结皮,叶绿素含量仅为4.59 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ^[34]。通过抗风蚀强度检测发现,固沙藻结皮在22d就可以抗4.3级风力^[35]。

在试验区接入藻种后的2—3年期间,经野外生态调查研究发现,形成的固沙藻结皮发育良好,结皮厚度达到3—5mm左右,颜色为黑绿色或灰黑色,结皮表面凹凸不平、呈尖塔状,抗压强度普遍达到35—70 N/cm^2 ,甚至高达225 N/cm^2 。部分固沙藻结皮区出现了发育良好的苔藓结皮。这说明固沙藻结皮的发育和演替并非漫长的过程,当环境条件适宜时,其演替速度相当迅速。这些都为荒漠藻人工藻结皮技术在沙漠治理中的推广应用提供了很好的佐证。研究表明,荒漠藻人工结皮的沙土表层土壤养分和肥力显著提高^[36]。调查发现,流沙藻结皮区普遍出现了沙生植物的拓殖和大量生长,如沙蓬(*A. squarrosus*)、披碱草(*E. dahuricus* Turcz.)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、羊草(*A. chinensis*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、沙蒿(*A. desertorum*)等,植被盖度达60%—90%。调查还发现,在藻-草-灌-乔接种试验的不同样方中,接种到草方格、沙柳(*S. psammophila*)、沙蓬(*A. squarrosus*)、披碱草(*E. dahuricus* Turcz.)和沙蒿(*A. desertorum*)下的藻结皮生物量明显比直接接种在流动沙丘上的藻结皮生物量要高,结皮发育程度要好。原因可能是高等植物的生长为藻类生长提供荫蔽作用,同时减少了风力和流水的侵蚀。可以看出,采用荒漠藻人工藻结皮技术,同时结合藻-草-灌-乔模式,不仅可行而且固沙效果比较理想。由

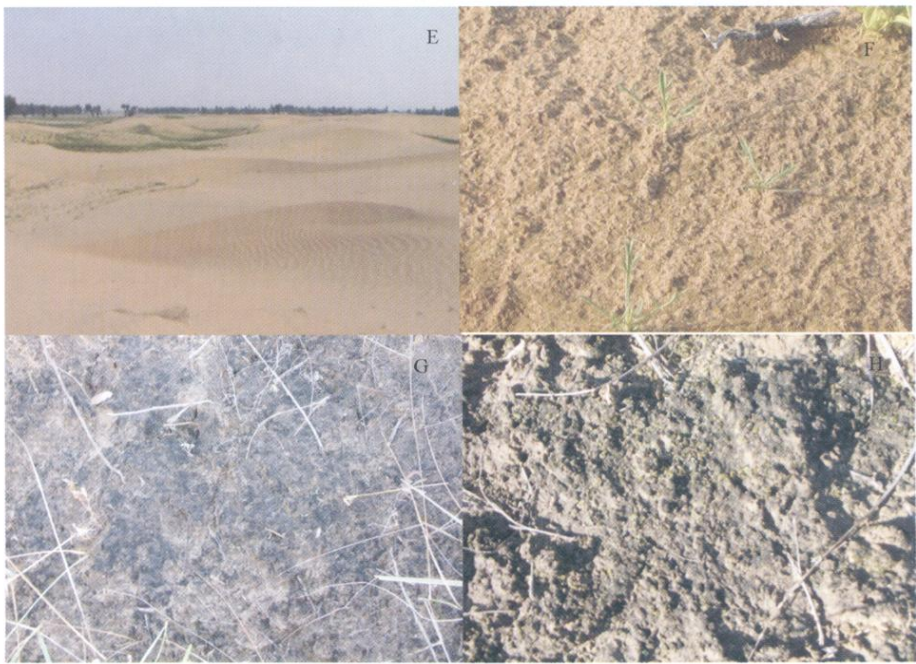


图 2 人工藻结皮技术对荒漠的治理效果

Fig. 2 The reclamation on desertification by means of man-made algal crust technology

E. 未经过接藻治理的野外流沙; F. 野外流沙经接种荒漠藻后形成的早期人工藻结皮, 结皮呈浅绿色; G. 野外经过 3 年生长发育的人工藻结皮, 结皮呈深黑色, 藻结皮上有大量沙生植物的拓殖; H. 发育演替到苔藓阶段的人工藻结皮, 藻结皮上有大量苔藓植物的生长

E. Shifting sand without inoculation of crust algae in the field; F. Early formation of man-made algal crust after inoculation of desert algae, and the crust was jade-green; G. Man-made algal crust with highly dark color after three years' development and abundant desert plants grew on the surface of algal crust; H. Succession of algae-moss crust through development, and rich moss grew on the surface of algal crust

于荒漠藻人工藻结皮技术在固沙实践中取得的良好成效,该技术目前已在内蒙古自治区推广应用 2 万多亩。

4 前景与展望

荒漠藻人工藻结皮技术作为一种新型的防沙治沙手段,在治理沙漠化的进程中还需要通过科学研究和生产实践继续完善。在技术的关键环节方面,尚需进一步的优化和创新。主要表现在: 优良藻种的选育、藻种配伍及制种新技术; 藻种大规模培养工艺的优化; 接种技术的创新; 荒漠藻人工结皮的综合配套技术; 荒漠藻人工结皮的快速培育方法等。

当今世界,人口 资源 环境之间的矛盾日益突出,土地的沙漠化和环境质量的恶化已成为人类共同面临的严峻挑战之一。我国人口已逾 13 亿,干旱、半干旱的荒漠地区约占国土总面积的三分之一,而且每年还不断有许多土地沙漠化。因此,在国土利用和整治中防沙治沙的任务非常紧迫。进一步应用现代科学技术改造荒漠,防止沙漠化,实现可持续发展,是我们当前面临的重要任务。在沙害治理体系中,随着荒漠藻人工藻结皮技术的进一步深化研究和应用,特别是将荒漠藻人工藻结皮技术的工程化应用以及与传统生物治沙技术结合的深化研究,采取封育、飞播、人工造林、生物沙障等综合措施,形成藻、草、灌、乔复合的多层次的人工植被覆盖,这对于加强防护体系的整体稳定性,提高固沙和抵

御风蚀及沙尘暴的效果具有重要的实践意义和创新意义。荒漠藻人工藻结皮技术丰富了我国防沙治沙的技术理论,提高了综合治沙的技术水平和生态效益。开发和利用荒漠藻人工藻结皮技术,对于荒漠化地区生态环境的恢复与重建不仅必要而且可行,必将在沙漠化的治理中有着广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Wang T, Xue X, Wu W, et al Regionalization of desertification lands in north of China—a program [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25: 816—817 [王涛, 薛娴, 吴薇, 等. 中国北方沙漠化土地防治区划 (纲要). 中国沙漠, 2005, 25: 816—817]

[2] Wang T, Wu W, Xue X, et al Time-space evolution of desertification land in northern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23: 230—235 [王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 我国北方土地沙漠化演变趋势分析. 中国沙漠, 2003, 23: 230—235]

[3] Wei J C. Desert biological carpet project—a new way for reclamation of arid desert [J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22: 287—288 [魏江春. 沙漠生物地毯工程 干旱沙漠治理的新途径. 干旱区研究, 2005, 22: 287—288]

[4] Campbell S E, Seeler J, Golubic S Desert crust formation and soil stabilization [J]. *Journal of Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1989, 3: 217—228

- [5] Dunne J. Cryptogamic crusts in arid ecosystems [J]. *Rangelands*, 1989, **11**: 180—182
- [6] West N E. Structure and function of microphytic soil crusts in wildland ecosystems of arid to semiarid regions [J]. *Advances in Ecological Research*, 1990, **20**: 179—223
- [7] Metting B. Biological surface features of semiarid lands and deserts [A]. Skujins J. *Semiarid Lands and Deserts: Soil Resource and Reclamation* [M]. New York: Marcel Dekker 1991, 257—293
- [8] Eldridge D J, Greene R S B. Micro-biotic crusts: a view of the roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, **32**: 389—415
- [9] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: structure, function and management [M]. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Hardbound 2001, 299—300
- [10] Li X R. Micro-biotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China [J]. *Biology Fertility Soil*, 2002, **35**: 147
- [11] Li X R, Jia Y K, Long L Q, *et al* Advances in microbiotic soil crust research and its ecological significance in arid and semiarid regions [J]. *Journal of Desert Research*, 2001, **21**: 4—10 [李新荣,贾玉奎,龙立群,等.干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干进展.中国沙漠, 2001, **21**: 4—10]
- [12] Yang X H, Zhang K B, Zhao Y J. Microbiotic soil crust—a research forefront in desertification prone areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **2**: 474—478 [杨晓晖,张克斌,赵云杰.生物土壤结皮 荒漠化地区研究的热点问题.生态学报, 2001, **2**: 474—478]
- [13] Chen L Z, Liu Y D, Li D H, *et al* The research process/progress of desert algae and crust [J]. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 2003, **2**: 90—91 [陈兰周,刘永定,李敦海,等.荒漠藻类及其结皮研究进展.中国科学基金, 2003, **2**: 90—91]
- [14] Eldridge D J, Greene R S B. Biological soil crusts: A view of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1997, **32**: 389—415
- [15] Belnap J. The world at your feet [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, **1**: 181—189
- [16] Lee S H. The subaerial algae from the Paracel Islands in the South China Sea [J]. *Bot Bull Acad Sin*, 1948, **2**: 235—242
- [17] Li S H, Ye Q Q, Liu F R. Primary studies on nitrogen-fixing blue-green algae as biofertilizer in rice crop [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1959, **4**: 440—444 [黎尚豪,叶清泉,刘富瑞.固氮蓝藻对水稻肥效的初步研究.水生生物学集刊, 1959, **4**: 440—444]
- [18] Li S H. Studies on the nitrogen-fixing blue-green algae as biofertilizer in the last rice crop [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1981, **7**: 417—423 [黎尚豪.固氮蓝藻作为晚稻肥源的研究.水生生物学集刊, 1981, **7**: 417—423]
- [19] Liu Y D, Li S H. Soil algae and its physiological-ecology [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, **17**: 272—277 [刘永定,黎尚豪.土壤藻类及其生理生态.水生生物学报, 1993, **17**: 272—277]
- [20] Hong Y, Li Y Y, Li S H. Primary studies on cyanobacterial communities of desert soil in Qaidam Basin [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1992, **34**: 161—168 [洪英,李尧英,黎尚豪.柴达木盆地荒漠土壤蓝藻群落的初步研究.植物学报, 1992, **34**: 161—168]
- [21] Hu C X, Liu Y D, Song L R. Species composition and distribution of algae in Shapotou area, Ningxia Hui autonomous region, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999b, **23**: 443—448 [胡春香,刘永定,宋立荣.宁夏沙坡头地区藻类组成及其分布.水生生物学报, 1999b, **23**: 443—448]
- [22] Hu C X, Liu Y D, Huang Z B, *et al* The fine structure and development of algal crusts in desert area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24**: 11—18 [胡春香,刘永定,黄泽波,等.荒漠藻类的精细结构与发育.水生生物学报, 2000, **24**: 11—18]
- [23] Hu C X, Liu Y D, Song L R. New development of soil algal research [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**: 524—525 [胡春香,刘永定,宋立荣.土壤藻研究新进展.水生生物学报, 2002, **26**: 524—525]
- [24] Hu C X, Liu Y D, Zhang D L, *et al* Cementation mechanism of desert algal crusts [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**: 931—937 [胡春香,刘永定,张德禄,等.荒漠藻结皮的胶结机理.科学通报, 2002, **47**: 931—937]
- [25] Hu C X, Liu Y D, Zhang D L, *et al* Colonization succession and its influenced factors on desert algae [J]. *Applied Acta Ecological Sinica*, 2003, **14**: 11—12 [胡春香,刘永定,张德禄,等.荒漠藻类拓殖演替及其影响因子.应用生态学报, 2003, **14**: 11—12]
- [26] Hu C X, Liu Y D. Soil algal biomass and its influential factors in desert soil crusts [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**: 284—290 [胡春香,刘永定.土壤藻生物量及其在荒漠结皮的影响因子.生态学报, 2003, **23**: 284—290]
- [27] Hu Ch-X, Liu Y-D. Primary Succession of Algal Community Structure in Desert Soil [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45**: 917—924
- [28] Chen L Z, Liu Y D, Song L R. The function of exopolysaccharides of *Microcoleus* in the formation of desert soil [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2002, **26**: 157—159 [陈兰周,刘永定,宋立荣.微鞘藻胞外多糖在沙漠土壤成土中的作用.水生生物学报, 2002, **26**: 157—159]
- [29] Hu C X, Liu Y D, Berit Smestad Paulsen, *et al* Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, **54**: 33—42
- [30] O. Malam Issa, Y. LeBissonnais, C. De farge, *et al* Role of a cyanobacterial cover on structural stability of sandy soils in the Sahelian part of western Niger [J]. *Geoderma*, 2001, **101**: 15—30
- [31] M. J. Acea, A. Prieto-Femández, N. Diz-Cid. Cyanobacterial inoculation of heated soils: effect on microorganisms of C and N

- cycles and on chemical composition in soil surface [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35: 513—524
- [32] G Z de Caire, M S de Cano, R M Palmab, *et al* Changes in soil enzyme activities following additions of cyanobacterial biomass and exopolysaccharide [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 1985—1987
- [33] Zhang YM, Cao T, Pan B R. Research summary on ecology of moss in arid and semiarid areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22: 1129—1134 [张元明,曹同,潘伯荣. 干旱与半干旱地区苔藓植物生态学研究综述. 生态学报, 2002, 22: 1129—1134]
- [34] Yan D R, Yang J P, An X L, *et al* Report of crust sand fixation by algae [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004, 18: 147—150 [闫德仁,杨俊平,安晓亮,等. 荒漠藻固沙结皮试验研究初报. 干旱区资源与环境, 2004, 18: 147—150]
- [35] Yang J P, Yan D R, Liu Y D, *et al* Study on the technology ways of rapid recovering vegetation for controlling sand dust storm-example for the east part of Kubuqi Desert [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20: 193—196 [杨俊平,闫德仁,刘永定,等. 控制沙尘暴的植被快速建设技术途径研究—以库布齐沙漠东缘为例. 干旱区资源与环境, 2006, 20: 193—196]
- [36] Chen L, Xie Z, Hu C, *et al* Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 521—527