

综 述

土壤丝状蓝藻在荒漠治理中的作用研究

谢作明^{1,2} 陈兰洲³ 李敦海¹ 沈银武¹ 胡春香¹ 刘永定¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 3. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072)

THE RESEARCH ON THE FUNCTION OF SOIL FILAMENTOUS CYANOBACTERIA IN DESERTIFICATION CONTROL

XIE Zuo-Ming^{1,2}, CHEN Lan-Zhou³, LI Dun-Hai¹, SHEN Yin-Wu¹, HU Chun-Xiang¹ and LIU Yong-Ding¹

(1. Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072; 2. School of Environment, China University of Geosciences, Wuhan 430074;
3. Department of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072)

关键词: 荒漠治理; 拓殖; 藻结皮; 胞外多糖; 伪枝藻素

Key words: Desertification control; Colonization; Algae crust; Exopolysaccharides (EPSs); Scytonemin

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2007)06-0886-05

土地荒漠化是当前全球性的重要环境问题之一。我国是世界上荒漠化面积较大,危害最严重的国家之一,全国荒漠和荒漠化土地面积 $2.782 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占国土陆地面积的三分之一。荒漠化土壤常存在区域性结皮现象,这种结皮对改善荒漠化土壤具有极其重要的作用。导致结皮的产生有物理的、化学的和生物的因素,其中以生物结皮最具生态意义,而生物结皮又分藻结皮、苔藓结皮和地衣结皮。藻类是荒漠中的先锋植物,尤其是一些抗逆性很强的蓝藻,特别是丝状蓝藻在荒漠土壤中具有更强的拓殖作用。本文从丝状蓝藻在生理生态上的优势综合介绍其在荒漠治理中不可替代的作用。

1 土壤丝状蓝藻的分布

1.1 生态分布 Croft 和 George 研究发现多列藻科的藻体在中泥盆纪就已经完成了具有异形胞的异质丝体的丝状系统,因此丝状蓝藻在原始的山脉上就已存在。D. I. Grane 发现,实际上在 35 亿年前甚至更早就已经生活有丝状蓝藻。在元古宙(38—35 亿年)前期,蓝藻一直是生物圈的优势生物类群,也是全球生态系统主要的初级生产者。到元古宙中后期,臭氧层形成,后动物与后植物适应了辐射,蓝藻不再是优势生物类群,但依然是生物圈中重要的成员。

有些丝状蓝藻,如微鞘藻(*Microcoleus*)属和念珠藻(*Nostoc*)属等的生态位很宽,几乎在各种类型的生态系统中都有存在,只是在酸性土壤中相对较少,中性和碱性土壤中相对较多^[1]。在质地较细的荒漠土壤上分布的蓝藻种类较多,而在较粗的土壤上,几乎只有移动性较高的丝状蓝藻,如微鞘藻属(*Microcoleus*)、伪枝藻属(*Scytonema*)和念珠藻属(*Nostoc*)等。土壤的湿度也影响藻类的分布,湿度越低,蓝藻生物量越大,其中尤以丝状蓝藻最多。另外,土壤的化学成分、沙丘的坡向、所处环境的光照强度和光质、小生境中高等植物的种类与覆盖度等也影响丝状蓝藻的分布^[2,3]。

1.2 垂直分布 在土壤藻的垂直分布上,很多藻类学者都发表了自己的观点,认为藻类只在土壤表层几个厘米内,靠光合同化 CO_2 生长。关于土壤藻分布的最大深度,胡春香等发现沙坡头地区土壤中仅分布到地下 10 cm,而且灌溉区与非灌溉区及非灌溉区不同龄土壤间也有差异^[4],刘永定等发现我国稻田中土壤藻可达 20 cm,并且从表及里呈富藻层-疏藻层-集藻层-稳定层-稀藻层规律变化^[5,6],Metting 报道稻田土壤中一般到 30 cm^[7],Lukesova 发现在闲散地中可以分布到地表 52 cm^[8],一般土表数厘米内藻的密度最高,且随着深度的增加,数量迅速降低,最大深度可达 2 m^[9]。出现这些差异在于所研究土壤的种类、质地和结构不同^[10-12]。实际上,藻

收稿日期:2006-01-06;修订日期:2007-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目资助(No. 30170112, 30500068);中国科学院知识创新工程项目(220418)资助

作者简介:谢作明(1973—),男,汉族,湖北监利县人,博士后;主要从事环境生物学研究。E-mail: xiezuoming06@yahoo.com.cn

通讯作者:刘永定, E-mail: liuyd@ihb.ac.cn

类的活动限于4 mm深度之内,2.9 cm以下藻类很少^[5,6]。我们发现,土壤藻形成的荒漠藻结皮具有明显的分层现象,一般可以分为无机层(0—0.02 mm)、富藻层(0.02—1.0 mm)和疏藻层(1.0—5.0 mm),而富藻层又可以分为 层(0.02—0.05 mm)、 层(0.05—0.1 mm)、 层(0.1—0.15 mm)、 层(0.15—0.5 mm)和 层(0.5—1.0 mm)。 层中的荒漠藻全为丝状蓝藻, 层中有少量丝状蓝藻, 层中以丝状蓝藻 *M. vaginatus* 占优势, 层丝状蓝藻 *M. vaginatus*、*A. azotica*、*L. crytovaginat*、*P. tenue* 非常丰富, 层仍以 *M. vaginatus* 占优势。在疏藻层依然有丝状蓝藻的存在^[13,14]。

到目前为止,还没有发现只在土壤深层生活而在同一土壤表层没有出现的藻种。还有,丝状蓝藻的藻丝体能分化出短而直的可移动的藻殖段。因此,在土壤表层生活有丝状蓝藻的地方,其深层土壤中一般也有丝状蓝藻的分布。

由此可见,无论是在水平方向还是在垂直方向上,丝状蓝藻的分布还是较为广泛的,特别是在荒漠藻结皮中,分布更为广泛。

2 丝状蓝藻的拓殖作用

在茫茫沙漠中,风沙肆虐,土壤贫瘠,严重缺水,冷热不均,在这种极端恶劣的环境中,大部分生物无法生存。这给荒漠治理带来了难以克服的困难。

但是,有些植物能适应这种环境而生长良好并促进荒漠生境的原生演替,这就是荒漠中的先锋植物——藻类,尤其是一些抗逆性很强的蓝藻,特别是一些丝状蓝藻。当蓝藻的生命活动使得沙层表面的营养条件和生态因子改善后,尤其是氮素的积累达到一定限度后,对环境适应较弱的地衣、苔藓才开始在上面生长、繁殖^[15]。土壤的原生演替首先是在土壤表面形成藻结皮,随后向地衣结皮和苔藓结皮转变,然后是高等植物的入侵,这样,一个裸露的土壤生境就得到了彻底的改善。

当然,在整个过程中,最至关重要的一步是形成藻结皮。形成自然藻结皮,因其所处环境条件而异,这主要与微气候条件(降水量、蒸发量、光质、光强、气温、风力、空气湿度)、土壤化学成分、土壤表面温度、土壤质地、坡度与坡向、土壤中藻的种类与生物量、外界干扰程度等有关^[1,16]。初期的生物土壤结皮常以大型丝状蓝藻为优势种^[3],这与丝状蓝藻的形态和生理特征有关,丝状蓝藻的藻丝体分化出的藻殖段,不仅担负着繁衍藻丝体的重任,而且能够抵御不利的环境^[17]。藻殖段在最初分化阶段是亲水的,并可以移动,它在形成48h之后,在光照下,则变成疏水的,这种变化有利于蓝藻的固着和迁移,以便使它在自然生境中传播开来^[18]。蓝藻中的某些丝状体种类具有异形胞,它是一种能固氮的细胞,能将空气中游离的氮转化为可利用的化合态氮,同时,它们也是光能自养型生物,能通过光合作用将空气中的CO₂固定为糖水化合物。随后,丝状蓝藻通过向外分泌次生代谢产物或藻体死亡分解后将碳、氮留在土壤中,从而为后来入侵的其他生物的生长和发育提供必需的碳源和氮源。土壤丝状蓝藻具

有充分利用短期雨水或露水的能力。当藻体含水减少时,其光合作用迅速降低,当土壤持水量低于12%时,藻体停止生长,当再次降雨时,藻体重新迅速生长^[19]。

3 丝状蓝藻的固氮作用

众所周知,大气中氮素并不缺乏,约有4/5是N₂,但它并不能直接为植物所利用。

某些丝状蓝藻的藻丝细胞中的一些营养细胞可以转化为异形胞(Heterocyst),异形胞内含有固氮酶,可以将大气中的游离态氮(N₂)固定为氮素化合物。有些固氮蓝藻的固氮能力很强,MacRae曾用¹⁵N示踪法测定蓝藻的固氮量为10—55kg/ha·a。

并不是所有丝状蓝藻的异形胞的数目、位置、形状和大小完全相同,实际上它们在藻丝中因种而异^[20]。在藻丝中,有些异形胞呈球形与营养细胞间生,如肥沃鱼腥藻和普通念珠藻;有些异形胞1个,基生,并与厚壁孢子相连,如漂浮胶刺藻;有些异形胞近圆柱形,如水华束丝藻;有些异形胞单生或成对,圆柱形,如贺氏伪枝藻。

异形胞的形成和外界因子有密切关系,目前已经证实氮、光、钼等因子是影响异形胞形成的几个重要条件。我们知道,当在固氮蓝藻培养基中加入结合态氮时,则会抑制异形胞的形成,而撤消结合态氮后,藻体中异形胞又增加。钼是固氮酶的组成成分,当培养基中缺钼时,异形胞明显增多,因为缺钼时,固氮酶的活性减少。

氮是生物生长发育必需的营养元素之一,拓殖植物要在可利用氮素极低的流动沙丘表面生长,固氮蓝藻必不可少。

4 丝状蓝藻的重要产物

4.1 多糖(Polysaccharides)

蓝藻产生的多糖可以分为三类:储藏多糖、细胞外被多糖和胞外多糖。储藏多糖糖链的平均长度约为13个葡萄糖单元;细胞外被由细胞质膜、细胞壁和细胞外层构成,其中细胞壁由肽聚糖、蛋白质和脂多糖组成,而细胞外层从里到外分别为鞘(sheath)、荚膜(capsule)和黏质(slime),鞘是一较薄的均一层,具均匀纤丝状结构,围绕在细胞壁外,荚膜是一非均匀厚层,包围在鞘外,黏质是缺乏固定边缘的最外层,物理上可检测为一黏胶层;胞外多糖是指由细胞分泌到细胞外的多糖。通常所说的胞外多糖指后面两类。

土壤丝状蓝藻分泌的胞外多糖量相对其他藻类要高得多,如 *M. vaginatus* 可达到藻体干重的27.6%, *P. tenue* 为36.1%,而 *Nostoc* sp. 甚至可以达到40.5%^[21]。研究表明,藻多糖溶液的黏度很高,呈非牛顿流体特性,其流变性的可与黄原胶相比。这就决定了胞外多糖可以防止藻体脱水,粘附藻体附近的土壤等其他颗粒形成生物土壤结皮,从而达到防风固沙,减少水土流失,提高土壤蓄水能力的作用。胞外多糖还可减缓藻体自身水分的挥发。这为丝状蓝藻在荒漠环境下生长发育提供了重要保障。藻多糖为带负电荷的多聚大分子,含有多种功能基团,如羧基、羟基、羰基、硫酸基等均可与阳离子作用,可利用泌糖蓝藻去除污水中的重金属,

如 Cu^{2+} 等^[22,23],也可影响周围环境 pH 值的变化。

通过在内蒙古野外实验站多年的研究发现,蓝藻的胞外多糖产率主要受其自身特性影响,当然环境因子的影响也很重要。*M. vaginatus* 在盐胁迫下胞外多糖分泌量增加 67 %^[24]。研究还发现,荒漠藻的培养时间越长,多糖积累量越高;藻的不同生长期的多糖积累也不相同,对数生长期的积累量最多也最快。另外,光强、温度、以及硫、磷、钾等营养元素也影响蓝藻的胞外多糖产率。

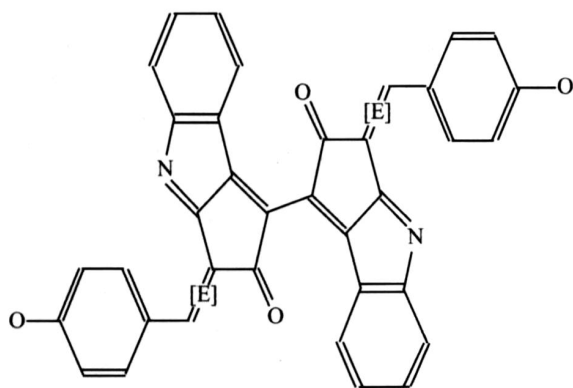
4.2 伪枝藻素 (Scytonemin)

在自然环境中,光合自养生物依靠太阳光作为其最初的能源进行光合作用,合成自身所需的营养物质。近来,由于人类的活动不断向大气中排放污染物,使得同温层的臭氧持续损耗,穿过大气层照射到地表的紫外线增加^[25-27],其能量很高,极易损伤生物的多条生理生化途径。

荒漠藻结皮避免其光合系统和核酸遭受紫外线伤害的机理是在藻结皮表层产生色素——伪枝藻素和类胡萝卜素^[28],特别是伪枝藻素,其抗紫外辐射的能力更强。通过野外试验研究发现,在培植人工荒漠藻结皮的接种过程中,当富含伪枝藻素的 *S. javanicum* 含量降低时,所接藻成活率下降,形成人工荒漠藻结皮的可能性降低。

Scytonemin 是一种存在于蓝藻中的棕黄色色素,属于脂溶性的化合物。它存在于强太阳光辐射下仍生长旺盛的种类中,特别是在具有较强紫外线的太阳光下依然生长的蓝藻中。主要在藻体最外面的藻鞘中,或者在藻席 (Mat)、藻结皮 (Crusts) 和群落的最顶层部分^[29]。

到目前为止,已从 30 多种蓝藻的藻鞘中提纯到了 Scytonemin,通过 NMR (Nuclear magnetic resonance) 发现,它们都具有相同的结构,从 Scytonemin 的结构上来看,是一种二聚物,分子式为 $\text{C}_{36}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_4$ 。



Scytonemin 在 UV-A (320—400 nm) 吸收最强,其在活体中的最大吸收峰在 370 nm 处,丙酮提取液中在 384 nm。在 UV-B (280—320 nm) 的 300 nm 和 UV-C (190—280 nm) 的 252 nm 处也具有重要的吸收峰^[30]。实验发现,通过大气照射到结皮表面 90 % 以上的 UV-A 被 Scytonemin 阻挡,从而保证了荒漠藻免遭紫外光的伤害,为荒漠藻的拓殖提供了重要保障。

5 荒漠土壤中藻类的特殊适应性

荒漠生境的特征一般有:高温(昼夜温差大)、缺水、高紫

外辐射、高盐碱度、土壤贫瘠等。干旱和半干旱地区流沙表面的温差超过 100 °C,在内蒙古的库布齐沙漠沙表面温度最高时达到 66 °C,最低达到 -39 °C;即使在同一天,昼夜温差有时也超过 70 °C。土壤藻还可以承受低温,在冰冻的土壤中进行代谢活动,如 *Microcoleus* 能够在 -192 °C—195 °C 长期生长^[31]。荒漠藻类能够忍受低温和较大的温度变化范围的原因可能是细胞内蔗糖等物质对质膜具有稳定作用。荒漠地区的降雨量很低,但是露水较大,荒漠藻类特别是一些丝状蓝藻的细胞外被有较厚的黏胶层或胶鞘,能够大量吸收雨水或露水,在干旱时为藻细胞营造湿润的微环境。紫外辐射可以抑制许多生物的光化学和光生物学过程,而有些荒漠丝状蓝藻具有应对紫外辐射的机制,主要有:修复紫外辐射所造成的 DNA 损伤、积累类胡萝卜素、解毒酶和抗氧化物质,另外,有些藻体在紫外辐射下还生成防止紫外诱导伤害的紫外吸收或屏蔽物质,如 Scytonemin 和 MAAs^[32]。研究表明,在盐胁迫条件下,脯氨酸和低分子量的碳水化合物在渗透调节中起着重要的作用。荒漠藻细胞生长时分泌大量的碳水化合物,是防止离子毒害的机制之一^[33]。在低盐浓度水平时,荒漠藻细胞的光合放氧速率增加,可能有利于维持其胞内外的水势平衡;脯氨酸在低盐浓度时含量下降,只有在高浓度盐胁迫时含量增加,因此在低盐浓度时糖类是藻细胞的主要渗透调节物质^[34]。在盐胁迫过程中,*S. javanicum* 还泄露出大量的蛋白质,可能也是其调节机制之一^[35]。在贫瘠的土壤中生长发育,是荒漠藻类作为拓殖植物最具优势的特征之一,正如上文所述,荒漠藻类利用固氮酶固氮为自己的生长与发育提供氮源,通过光合作用合成碳水化合物,然后通过机体自身的生化反应再合成各种代谢物质,从而完成其生活史。

6 土壤丝状蓝藻增加藻结皮的抗压强度和抗风蚀能力

研究了内蒙古库布齐沙漠边沿人工荒漠藻结皮的抗压强度和甘肃沙坡头自然藻结皮的抗风蚀能力。在干旱、半干旱地区,除了荒漠藻结皮外偶尔还有碱结皮和雨结皮,后两种结皮是由于物理的和化学的因素形成的结皮,它们是由粘粒和粉粒在范德华引力、库仑引力、风力及沙粒的挤压下,经 CaSO_4 、 CaCO_3 、氯化物、氧化铁等相互粘结、凝聚形成的灰白色锥形结皮,这种结皮相当脆弱,极易被风等外力破坏^[14]。只有当藻类特别是丝状蓝藻进入并达到一定生物量后,这样的结皮才能抵抗更大的外力。研究发现,人工荒漠藻结皮的抗压强度和抗风蚀能力与其生物量成正相关^[36],说明荒漠藻在增加藻结皮的强度上具有很重要的作用。

随着藻体的生长,分泌的胞外聚合物不断增加,这些聚合物加速了矿物质的分解,丝状蓝藻的藻丝缠绕土壤颗粒,有些甚至伸入硅土中,藻丝与土壤颗粒形成的团聚体也不断增多。藻丝体分化出的藻殖段具有可移动性,它们选择性地延伸到营养条件较好的土壤颗粒,便于其生长发育,这样不可避免地缠绕住其他颗粒,使这些颗粒成为难以分割的整体。另外,这些藻丝体分泌的胞外聚合物也与土壤中的阳离

子结合,使土壤颗粒结合更加牢固。这样,土壤和藻体共同形成的藻结皮抵抗外力的能力增强。

7 结 语

土壤丝状蓝藻适应干旱、半干旱地区环境而生长发育的特性显示了它们在荒漠化治理中的独特优势。从目前已有的土壤丝状蓝藻的研究结果来看,有必要利用生物学、环境科学、土壤学、物理学、气象学和化学对丝状蓝藻在荒漠土壤表层形成生物结皮并改善该地区的微环境做进一步的研究,为充分利用土壤丝状蓝藻这一重要资源治理荒漠化,开拓新的荒漠化防治途径,为改善荒漠生境提供新的理论基础。

参考文献:

- [1] Liu Y D, Li S H. On soil algae and their physiological ecology [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, **17** (3): 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** (3): 272—277]
- [2] Wu Y H, Gao Q, Yu X H. Distribution influencing factors and monitoring of biological soil crusts [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22** (3): 38—42 [吴玉环, 高谦, 于兴华. 生物土壤结皮的分布影响因子及其监测. 生态学杂志, 2003, **22** (3): 38—42]
- [3] Harper K T, Marble J R. A role for nonvascular plants in management of arid and semiarid rangeland [A]. In: Tueller P T (Eds.), *Vegetation science applications for rangeland analysis and management* [C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1988, 135—169
- [4] Hu C X, Liu Y D. Vertical distribution of algae in semi-desert soil of Shapotou area, Ningxia Hui Autonomous Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23** (1): 38—44 [胡春香, 刘永定. 宁夏回族自治区沙坡头地区半荒漠土壤中藻类的垂直分布. 生态学报, 2003, **23** (1): 38—44]
- [5] Liu Y D, Li S H. Seasonal changes and vertical distribution of soil algae in several rice field of yellow brown earth in the Yangtzi River region [A]. In: Lian Z (Eds.), *Proceedings of study on the resource, ecology, environment and economic development in Yangtzi River basin* [C]. Beijing: Science Press, 1988, 266—269 [刘永定, 黎尚豪. 长江中游黄棕壤地区几种稻田土壤的蓝藻种类及田间季节差异与垂直分布. 见: 廉正, 长江流域资源、生态、环境与经济开发研究论文集. 北京: 科学出版社, 1988, 266—269]
- [6] Liu Y D, Ley S H. Species composition and vertical distribution of blue-green algae in rice field soil, Hubei, China [J]. *Nova Hedwigia*, 1989, **48** (1—2): 55—67
- [7] Metting B. The systematic and ecology of soil algae [J]. *The Bot. Rev.*, 1981, **47** (2): 195—312
- [8] Lukesova A. Soil algae in four secondary successional stages on abandoned fields [J]. *Algological Studies*, 1993, **71**: 81—102
- [9] Peterson J B. Studies on the biology and taxonomy of soil algae [J]. *Dansk Botanisk Arkiv*, 1935, **8** (9): 8—70
- [10] Liu Y D, Shen Y W, Song L R, et al. Species composition of algae and the relationship with fertility of soils in the middle reach of Yellow River, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, **23** (5): 434—442 [刘永定, 沈银武, 宋立荣, 等. 黄河中游土壤类的种类组成与土壤肥力的关系. 水生生物学报, 1999, **23** (5): 434—442]
- [11] Liu Y D, Shen Y W, Song L R, et al. Species composition and distribution of blue-green algae from soil in the middle reach of Yellow River, China. Proceeding of intertional conference on Asian Network on microbial researches, 1998, 395—401
- [12] Bongale U D. Distribution of *Nostoc* and *Anabaena* (Cyanophyta) in relation to soil propertiel in the cultivated soils of Karnataka state (India) [J]. *Cryptogamie/ Algologie*, 1987, **8** (1): 13—18
- [13] Hu C X, Zhang D L, Huang Z B, et al. The vertical microdistribution of cyanobacteria and green algae within desert crusts and the development of the algal crusts [J]. *Plant and Soil*, 2003, **257**: 97—111
- [14] Hu C X, Liu Y D, Huang Z B, Song L R. The fine structure and development of algal crusts in desert area [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2000, **24** (1): 11—18 [胡春香, 刘永定, 黄泽波, 宋立荣. 荒漠藻壳的精细结构与发育. 水生生物学报, 2000, **24** (1): 11—18]
- [15] Zhang D W, Wang Y, Cai W M. A new thinking of controlling sand storm [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, *suppl.*: 1—4 [张大伟, 王艳, 蔡伟民. 沙尘暴源头控制的新思路, 上海环境科学, 2003, 增刊: 1—4]
- [16] Hu C X, Liu Y D. Soil algal biomass and its influential factors in desert soil crusts [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23** (2): 284—291 [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** (2): 284—291]
- [17] Bilger W, Budel B. Photosynthetic activity of two developmental stages of a *Nostoc* strain (Cyanobacteria) isolated from *Ceospion* pyriforme (Mycota) [J]. *Phycol*, 1994, **30**: 225—230
- [18] Zhong Z P, Shi D J. Differentiation of hormogonia from filamentous cyanobacteria and their regulation mechanisms [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, **17** (3): 204—210 [钟泽璞, 施定基. 丝状体蓝藻藻殖段的分化及其调节机制. 植物学通报, 2000, **17** (3): 204—210]
- [19] Tchan Y T, Whitehouse J N A. Study of soil algae. The variation of the soil algal population in sandy soils [J]. *Proc. Linn. Soc. New. South Wales*, 1953, **78**: 160—170
- [20] Zhou Y L. The nitrogen fixation in cyanobacteria and heterocyst [J]. *Chinese Bulletin of Biology*, 1994, **29** (11): 5—7 [周云龙. 异形胞与蓝藻的固氮. 生物学通报, 1994, **29** (11): 5—7]
- [21] Hu C X, Liu Y D, 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
- [22] Roberto De P, Raffaella P, et al. Assessment of the metal removal capability of two capsulated cyanobacteria, *Cyanospira capsulata* and *Nostoc* PCC7936 [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2003, **15**: 155—161
- [23] Roberto De P, Massimo V. Outermost polysaccharidic investments of cyanobacteria: Nature, significance and possible applications [J]. *Recent Res. Devel. Microbiology*, 2003, **7**: 13—22
- [24] Chen L Z, Li D H, Liu Y D. Salt tolerance of *Microcoleus vaginatus* Cbm., a cyanobacterium isolated from desert algal crust, was enhanced by exogenous carbohydrates [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003, **55**: 645—656
- [25] Kerr J B, McElroy C T. Evidence for large upward trends of ultraviolet-

- B radiation linked to ozone depletion [J]. *Science*, 1993, **262**: 1032—1034
- [26] Lubin D, Jensen E H. Effects of clouds and stratospheric ozone depletion on ultraviolet radiation trends [J]. *Nature*, 1995, **377**: 710—713
- [27] Kirchhoff V W J H. Evidence for an ozone hole perturbation at 30° south [J]. *Atmos. Environ.*, 1996, **30**: 1481—1488
- [28] Edwards H G M, Moody C D, *et al.* Raman spectroscopic analysis of cyanobacterial colonization of hydromagnesite, a putative martian extremophile [J]. *Icarus*, 2005, Available online at www.sciencedirect.com
- [29] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and biological implications of scytonemin, a cyanobacteria sheath pigment [J]. *Phycol.*, 1991, **27**: 395—409
- [30] Edwards H G M, Garcia-Pichel F, *et al.* Vibrational Raman spectroscopic study of scytonemin, the UV-protective cyanobacterial pigment [J]. *Spectrochimica Acta*, 1999, **56A**: 193—200
- [31] Chen L Z, Liu Y D, *et al.* The Research process/progress of desert algae and crust [J]. *Bulletin of National Natural Science foundation of China*, 2003, **17**(2): 90—93 [陈兰周, 刘永定, 等. 荒漠藻类及其结皮的研究. 中国科学基金, 2003, **17**(2): 90—93]
- [32] Sinha R P, *et al.* Ultraviolet-absorbing/ screening substances in cyanobacteria, phytoplankton and macroalgae [J]. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 1998, **47**: 83—94
- [33] Liu H, Buskey E J. Hyper salinity enhances the production of extracellular polymeric substance (EPS) in the Texas brown tide alga, *Aureoumbra lagunensis* (Pelagophyceae) [J]. *J. Phycol.*, 2000, **36**: 71—77
- [34] Chen L Z, Liu Y D, Li D H. Effect of salt stress on physiological and biochemical characteristics of *Scytonema javanicum* [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, **23**(3): 285—288 [陈兰周, 刘永定, 李敦海. 盐胁迫对爪哇伪枝藻 (*Scytonema javanicum*) 生理生化特性的影响. 中国沙漠, 2003, **23**(3): 285—288]
- [35] Biagini A B, Kirk K, Schofield P J, *et al.* Role of K⁺ and amino acids in osmoregulation by the free-living microaerophilic protozoan *Hexamita inflata* [J]. *Microbiol.*, 2000, **146**: 427—433
- [36] Xie Z M, Liu Y D, Hu C X, *et al.* Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**: 567—572.