

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



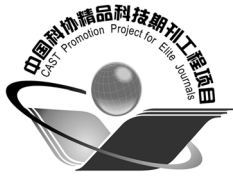
中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

目次

综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 宋长青 谭文峰 (957)
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 吴绍华 虞燕娜 朱江等 (970)

研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 李玲 张少凯 吴克宁等 (979)
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 刘莉红 胡雪峰 叶玮等 (991)
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 李硕 汪善勤 史舟 (1014)
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 王升 陈洪松 付智勇等 (1024)
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 曹永强 徐丹 曹阳 (1031)
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 赵丹 李毅 冯浩 (1058)
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 李婷 王火焰 陈小琴等 (1078)
生物质灰对红壤酸度的改良效果 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 李洋 宋洋 王芳等 (1096)
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 张默 贾明云 卞永荣等 (1106)
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 王慧 桂娟 刘满强等 (1124)
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)
土壤团聚体N₂O释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 周汉昌 张文钊 刘毅等 (1144)
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 王寅 冯国忠 张天山等 (1153)

问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 易晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 吴丽 杨红 兰书斌等 (1173)
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 李从娟 唐俊妍 高培等 (1180)
不同NaNO₃浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 张政勤 罗文贱 陈勇等 (1188)

封面图片: 不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性 (由王赢利提供)

DOI: 10.11766/trxb201408280431

干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响*

吴 丽^{1, 2} 杨 红¹ 兰书斌² 张德禄³ 胡春香^{2†}

(1 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

(2 中国科学院水生生物研究所, 中国科学院藻类生物学重点实验室, 武汉 430072)

(3 武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

摘 要 通过接种蓝藻构建人工藻结皮促进荒漠地区生物结皮的生长发育以及整个荒漠生态系统的恢复, 被认为是一种行之有效的荒漠化控制方法。在构建藻结皮过程中, 接种的蓝藻以及形成的藻结皮, 经常遭受干旱等环境条件的胁迫。本研究通过室内人工构建藻结皮, 对形成的藻结皮进行干旱及重吸水处理, 在此过程中监测结皮光合生物量、多糖含量以及结皮光合特性的变化规律。结果发现, 干旱处理 I_0 后, 结皮蓝藻胞外多糖的分泌明显增加 ($p < 0.05$); 当结皮完全进入干燥状态后, 结皮蓝藻停止所有代谢活动, 结皮生物量及胞外多糖含量保持在一个相对稳定的水平。在结皮重吸水后, 结皮初始荧光 F_0 能够迅速恢复, 并在 10 min 内达到最大; 之后 F_0 逐渐下降, 同时结皮光合活性 (F_v/F_m) 按照函数 $y = ax / (b + x)$ 逐渐上升并达到稳定。此外, 在不同水分条件下, 结皮光合活性随着水分的增加逐渐增加; 然而结皮净光合速率 (P_n) 却随着水分的增加先增加后又下降, 呈现单峰变化模式。该研究表明结皮蓝藻的代谢调节在人工藻结皮适应荒漠干旱环境中具有重要的作用, 这对于进一步理解蓝藻乃至蓝藻结皮对干旱胁迫的适应, 以及荒漠化防治中人工藻结皮的构建、维护、管理具有重要的理论与实践意义。

关键词 荒漠化; 生物结皮; 蓝藻; 干旱; 光合作用

中图分类号 X172 **文献标识码** A

干旱生态系统占到陆地面积的33%以上, 而且随着气候的变化与荒漠化进程的加剧, 干旱区面积仍有继续增加的可能^[1-2]。在这些地区由于有限的降雨及强烈的蒸发, 干旱成为很多植物生长乃至生存的重要限制因子。然而生物结皮却能够在这些地区广泛地分布, 甚至占到生物覆盖的70%以上^[3-4]。生物结皮是由藻类、地衣、苔藓、细菌、真菌等生物成分胶结、捆绑土壤颗粒在沙土表面形成的一层易剥离的生物土壤复合层。它们在荒漠地区土表稳定、营养改良、水分循环及整个荒漠生态系统的发育演替中起着重要的作用^[1, 3, 5]。

蓝藻是结皮形成的先锋生物, 经过近35亿年的漫长进化, 形成了多种保护机制适应逆境^[6-8]。

在荒漠化防治及干旱生态系统生境恢复工作中, 不少研究也证实通过接种蓝藻能够快速 (约一个月左右) 形成藻结皮, 从而促进生物结皮的发育演替^[4, 9]。然而在荒漠干旱地区, 通过接种蓝藻构建的藻结皮由于缺少水分大部分时间处于干旱状态。已有的研究表明, 干燥结皮内光合生物的捕光色素复合体与光系统 (PS) II 反应中心处于无活性状态^[8, 10]。干燥能够诱导捕光色素复合体与PS II 反应中心呈现功能性断开, 并导致PS II 的Mn簇释放^[10-11], 同时干燥也可能引起某些光合相关蛋白的降解以及叶绿素分子蛋白构象的改变^[12-13]。通过上述一些机能的变化干燥的结皮停止了一切光合代谢活动, 然而一旦获得水分之后, 结皮的光合

* 林业公益性行业科研专项 (201404204)、国家自然科学基金项目 (31170464) 与中央高校基本科研业务费专项资金 (WUT: 2014-IV-072) 共同资助

† 通讯作者, E-mail: cxhu@ihb.ac.cn

作者简介: 吴 丽 (1983—), 女, 博士, 主要从事藻类环境生物学研究。E-mail: wuli774@126.com

收稿日期: 2014-08-28; 收到修改稿日期: 2014-12-22

活性便可以迅速恢复^[10]。

接种蓝藻构建生物结皮时,结皮蓝藻经常经受干旱胁迫,只有在获得水分的条件下它们才能够进行光合生长。然而结皮在干旱、以及重新获得水分过程中,结皮蓝藻光合变化规律目前还不清楚。因此,本研究旨在通过人工培养蓝藻结皮,进而研究干旱对藻结皮光合特性的影响;通过让干旱结皮重新获得水分,初步探讨结皮蓝藻光合恢复的规律以及对荒漠干旱的适应,这将有助于进一步理解结皮蓝藻乃至生物结皮对于干旱胁迫的适应,为荒漠化防治中人工藻结皮的构建提供重要的理论支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

实验中用于人工构建藻结皮的荒漠蓝藻——具鞘微鞘藻 (*Microcoleus vaginatus*) 分离于库布齐沙漠 (内蒙古达拉特旗) 中的生物结皮,该藻株为当地生物结皮中的第一优势藻种;实验中所用流沙采自于库布齐沙漠的流动沙丘。

1.2 试验方法

具鞘微鞘藻用 BG-11 培养基在温室中 (25 ± 3) °C 通气培养,光照为 $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。15 d 后,培养物 (叶绿素 a 含量为 $1.72 \pm 0.16 \mu\text{g ml}^{-1}$) 喷雾接种于盛有流沙 (约 1.5 cm 厚) 的培养皿中 (直径 15 cm, 共 8 个),培养皿置于培养箱中,温度 (25 ± 1) °C,光强为 $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,水分保持在 10% (w/w)。21 d 后,其中 4 个培养皿停止浇水,进行干旱处理,其余 4 个仍保持 10% 的含水量作为对照,干旱处理时间为 29 d。29 d 后,将对照组中结皮进行干旱处理 (自然干燥约 5 h),干燥后每一平皿中采集 12 块结皮样品分别进行不同水分条件下结皮光合特性的测定和干燥藻结皮重吸水后光合活性的监测。在不同水分条件下结皮光合特性的测定中,分别将 11 块结皮样品加水至相对含水量为 0% ~ 100% 11 个水分梯度,其中 0% 为干燥结皮;100% 为加水饱和结皮。加水恢复 1 h 后测定结皮的光合活性和净光合速率。其余 1 块结皮样品加水至 10% (w/w) 进行光合活性恢复,同时进行干燥藻结皮重吸水后光合活性的监测。

1.3 指标监测

接种蓝藻后及干旱处理后每隔 7 d 进行结皮生物量与光合活性的监测。结皮生物量用叶绿素 a 含

量表示,叶绿素 a 含量测定参照文献 [14] 中描述的方法。结皮光合活性 (暗适应结皮的 F_v/F_m ; 所有结皮暗适应为 10 min; 下同) 利用植物效率分析仪 (PEA; Hansatech, UK) 进行监测。

在结皮进行干旱处理 1、8 和 29 d 后,对于干旱处理组及对照组中结皮的胞外多糖含量进行测定。测定前,结皮胞外多糖在 80 °C 的蒸馏水中提取 30 min,多糖提取液 5000 r min^{-1} 离心 10 min,取上清用苯酚-硫酸法测定多糖含量^[15],用蔗糖做标准曲线。

在不同水分条件下结皮光合特性的测定中,加水恢复 1 h 后测定结皮的光合活性 (暗适应结皮的 F_v/F_m) 和净光合速率。结皮光合活性用 PEA 进行测定,结皮净光合速率 (P_n) 用远红外 CO_2 气体分析仪 (CGT-7000, Shimadzu, Japan) 进行测定,具体测定方法参照文献 [16]。

在干燥藻结皮重吸水后光合活性的监测中,用 PEA 对结皮光合活性 (暗适应结皮的 F_v/F_m) 和叶绿素荧光瞬态进行监测。叶绿素荧光瞬态为暗适应结皮接受饱和脉冲后激发出来的荧光信号,荧光信号由 PEA 自动记录 2 s。记录的荧光信号以对数转化的时间为横坐标进行作图,即为叶绿素荧光的 O-J-I-P 曲线,O 点代表初始荧光 F_0 ,P 点代表最大荧光 F_m ,J 点和 I 点分别为 2 和 30 ms 处的荧光信号^[10]。

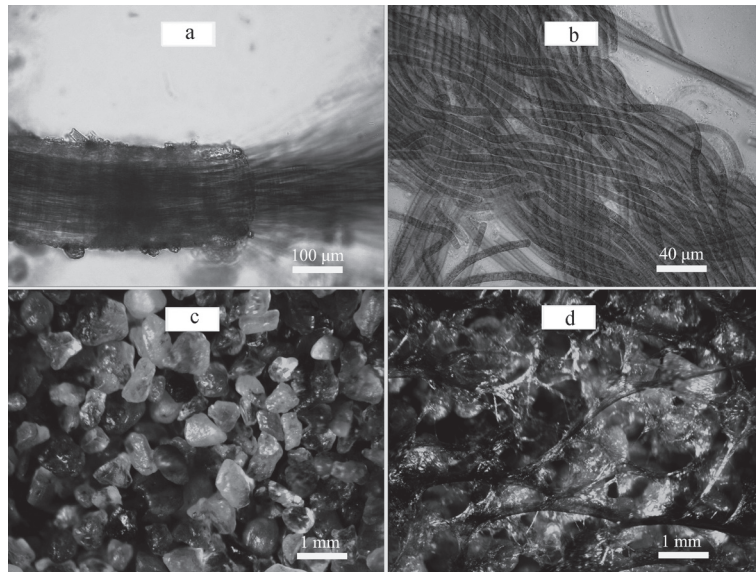
1.4 数据分析

干旱处理组与对照组之间结皮胞外多糖含量的差异,用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 在 95% 水平进行分析 (SPSS 13.0 软件);干燥结皮重吸水后光合活性 (暗适应结皮的 F_v/F_m) 的恢复与恢复时间之间的关系用曲线拟合 (Fit Curve) 进行分析 (SigmaPlot 8.0 软件)。

2 结果

2.1 人工蓝藻结皮的形成

在实验样品-结皮蓝藻分离区,具鞘微鞘藻为第一优势藻种,生物量最大能够达到 $0.4 \text{ mm}^3 \text{ g}^{-1}$ ^[14]。这些藻丝常分布于结皮表面下层,而非直接分布于结皮表面。多数藻丝聚集成束,外面被共同的多糖胶被包裹,然而这种特性在室内分离培养后即消失 (图 1a, 图 1b)。在室内培养情况下,单独的藻丝常常互相编织缠绕在一起,形成藻丝团,但此时藻丝并不形成共同的多糖胶被,只有在单独的藻丝外



注：(a) 野外结皮中多糖鞘包裹的具鞘微鞘藻藻丝；(b) 室内培养的具鞘微鞘藻藻丝；(c) 未接种蓝藻的沙土；(d) 接种蓝藻后沙土表面藻丝缠绕、胶结沙粒的情况 Note: (a) *M. vaginatus* in the natural crusts, wrapped with exopolysaccharides sheath; (b) *M. vaginatus* cultured in the lab; (c) sandy soil without cyanobacterial inoculation; (d) sands being wound and cemented with cyanobacterial filaments on the surface after cyanobacterial inoculation

图1 结皮蓝藻与人工藻结皮的显微观察

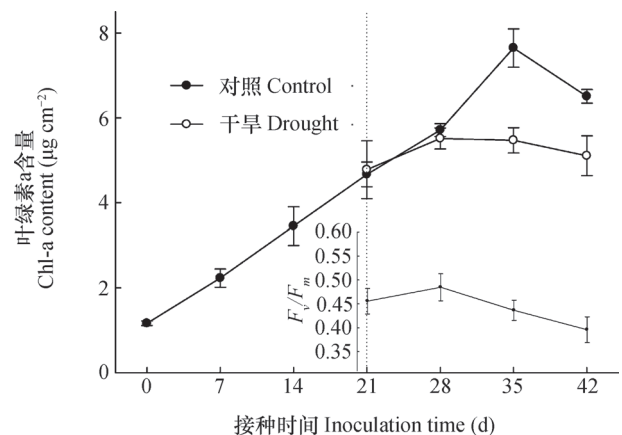
Fig.1 Microscopic observation of crust cyanobacteria and artificial algal crusts

形成胶鞘。没有接种微鞘藻的沙粒松散地堆积在一起，没有固定形状（图1c）。当将液体扩大培养的藻丝体接种到流沙表面之后，藻丝生长的同时缠绕沙粒，同时分泌的胞外多糖也不断黏结沙土颗粒，从而形成平坦的藻结皮（图1d）。

2.2 干旱处理对人工藻结皮的影响

接种蓝藻后，结皮生物量逐渐增加（图2）。在接种后21 d对部分接种的蓝藻结皮进行干旱处理后发现，干旱处理组结皮生物量没有明显变化（ $p>0.05$ ），基本维持在一个恒定的范围（叶绿素a含量为 $4.8 \sim 5.5 \mu\text{g cm}^{-2}$ ）；然而对照组中结皮生物量却保持继续增加的趋势，直至接种后35 d生物量达到最大（叶绿素a含量为 $7.6 \mu\text{g cm}^{-2}$ ），之后开始下降。与干旱处理组中结皮光合活性相比（光合活性 F_v/F_m 为0），对照组中结皮光合活性（ F_v/F_m ）一直维持在 $0.40 \sim 0.48$ 之间（图2）。

干旱处理1 d后，干旱处理组结皮蓝藻胞外多糖含量明显高于对照组（ $p<0.05$ ；图3）。随着处理时间的延长，干旱处理组结皮蓝藻胞外多糖含量并未明显变化，维持在相对恒定的水平（ $7.3 \sim 8.3 \mu\text{g cm}^{-2}$ ）；然而对照组结皮蓝藻胞外多糖却不断积累。直至干旱处理8 d后，对照组与处理组结皮

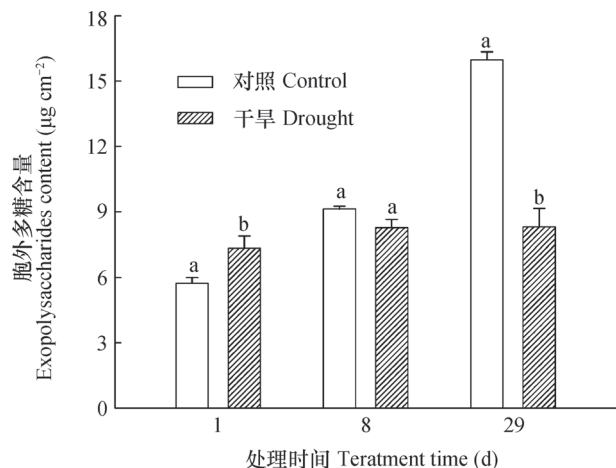


注：图中右下部分显示未进行干旱处理的对照组中结皮光合活性（ F_v/F_m ）的变化；干旱处理组中结皮的光合活性（ F_v/F_m ）在处理7 d后已下降为0 Note: The small figure on the right bottom shows change in crust photosynthetic activity F_v/F_m in Control without drought treatment. In the drought treated group, crust photosynthetic activity (F_v/F_m) declined to 0 after 7 days of treatment

图2 干旱处理对结皮生物量及光合活性的影响

Fig.2 Effects of drought on crust biomass and photosynthetic activity

蓝藻胞外多糖含量没有明显差别（ $p>0.05$ ）；处理29 d后，对照组中结皮积累的胞外多糖含量明显高于处理组（ $p<0.05$ ；图3）。



注：不同字母代表处理组与对照组结皮胞外多糖含量存在明显差异 ($p < 0.05$) Note: The different letter means significant difference in exopolysaccharides content between Treatment and Control ($p < 0.05$)

图3 干旱处理对结皮胞外多糖的影响

Fig. 3 Effects of drought treatment on crust exopolysaccharides

2.3 不同水分条件下结皮光合特性的变化

在不同水分条件下，结皮光合活性 (F_v/F_m) 随着结皮水分含量的增加逐渐上升，结皮相对含水量为90%和100%时，结皮光合活性没有明显差别 ($p > 0.05$)。然而结皮净光合速率却随着结皮水分的增加呈现先上升后又下降的单峰变化模式 (图4)。在结皮相对含水量为30%时，结皮净光合速率达到最大，固定 CO_2 速率为 $341 \mu mol cm^{-2} h^{-1}$ ；之后随着结皮水分的增加，结皮净光合速率逐渐下降，直到结皮处于饱和含水量时 (相对含水量为100%)，结皮净光合速率仅为最佳含水量时 (相对含水量为30%) 结皮净光合速率的42%。

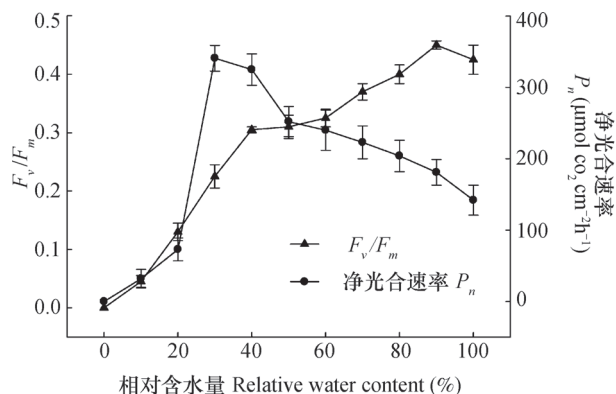


图4 不同水分条件下结皮光合活性 (F_v/F_m) 和净光合 (固定 CO_2) 速率的变化

Fig. 4 Variation of crust photosynthetic activity (F_v/F_m) and net photosynthesis (P_n ; fixed CO_2) with soil moisture regime

2.4 重吸水后结皮光合活性的恢复

干燥的结皮基本没有荧光信号激发出来，此时结皮的叶绿素荧光瞬态呈一条直线状态 (图5)，结皮光合活性 (F_v/F_m) 为0 (图6)。重吸水后，结皮初始荧光 F_o 迅速上升，并在10 min时达到最大，此时虽然出现了P点，但可变荧光 F_v ($F_m - F_o$) 值并不高， F_v/F_m 值只有0.2左右 (图5和图6)。之后 F_o 值逐渐下降，叶绿素荧光瞬态呈现明显的O-J-I-P曲线形式 (图5)；在此过程中，结皮光合活性 (F_v/F_m) 逐渐增加并达到稳定 (图6)，且整个重吸水过程中，结皮光合活性的恢复符合函数 $y = ax / (b + x)$ 的变化 ($R^2 = 0.99$; $p < 0.01$)。

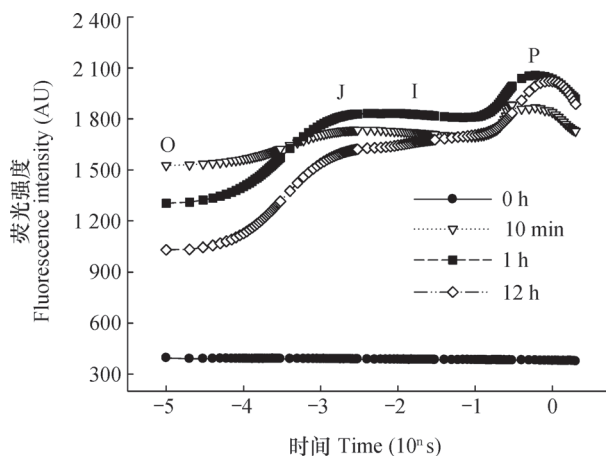


图5 干燥结皮重吸水后叶绿素荧光瞬态的变化

Fig. 5 Variation of dried crust in Chl fluorescence transient after rehydration

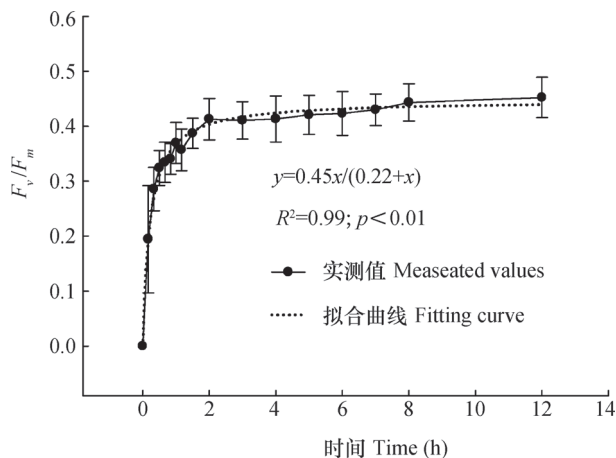


图6 干燥结皮重吸水后光合活性 (F_v/F_m) 的恢复

Fig. 6 Recovery of dried crust in photosynthetic activity (F_v/F_m) after rehydration

3 讨 论

在不同地区的研究报道中，具鞘微鞘藻经常成为结皮中的第一优势种，因此微鞘藻也被称为“四海为家”的普生种^[1, 4, 13]。作为结皮中一种常见的优势种，具鞘微鞘藻生物量通常占到藻类生物量的1/2以上，它们在结皮的形成、发育中起着非常重要的作用^[9, 14]。而且研究表明具鞘微鞘藻在抵御辐射、高温、高盐等环境胁迫方面具有重要的生理优势^[6, 8, 10]，因此在本研究中被选为人工构建生物结皮的接种材料。

作为一种促进结皮形成以及荒漠地区生态恢复的方法，人工接种蓝藻构建生物结皮已被很多学者提议并开展了相关研究^[4, 9, 15]。研究发现接种蓝藻之后，一周左右结皮便开始形成，但刚形成的藻结皮很薄，颜色较浅，平坦、易碎，易被风吹走^[15, 17]。随着结皮的生长发育，其厚度逐渐增加，颜色变深，一个月之后便能够抵御19 mm降雨和4.3级风力的侵蚀^[17-18]。在本实验中，接种35 d后，结皮叶绿素a含量达到 $7.6 \mu\text{g cm}^{-2}$ ，之后结皮生物量出现下降的趋势，这可能是由于基质中营养物质的消耗所致。

水分是荒漠地区一个重要的环境限制因子，因此在人工藻结皮构建以及生物结皮发育演替过程中，干旱便是结皮经常遭受的胁迫条件之一^[8, 19]。本研究发现在不同水分条件下，结皮光合活性随着水分的增加逐渐上升；然而结皮净光合速率却随着水分的增加先上升后又下降，呈现单峰变化模式。这也表明在人工藻结皮构建过程中，适当的水分补充对于接种蓝藻的生长以及结皮的形成有着重要的促进意义。但并非水分越多越好，适量的水分补充一方面节约了水量使用与工程投入，另一方面也为结皮有机碳的积累提供了有利保证，我们的实验结果表明在人工藻结皮的维护管理中，土壤水分控制在20%~40%最适合结皮进行光合固碳。

暗适应后叶绿素a的可变荧光与最大荧光的比值(F_v/F_m)是PS II最大光化学产量，反映PSII反应中心的最大光能转换效率，是植物潜在的、最大的光合活性^[10, 20]。在非胁迫条件下，该值比较稳定，高等植物的 F_v/F_m 常大于0.8^[21]，真核藻类约为0.65^[22]。在本实验的蓝藻藻结皮中测到的 F_v/F_m 值一般小于0.5，而且当结皮再处于干旱胁迫时，其 F_v/F_m 值便会进一步下降，甚至消失。干旱虽然

使得结皮光合活性停止，然而当结皮重新获得水分之后，结皮光合活性能够迅速恢复。在结皮光合活性恢复过程中， F_o 首先达到最大，这表明重吸水后结皮首先恢复捕光色素复合体的功能并进行光能捕获^[10, 19]。之后 F_o 逐渐下降， F_v 及 F_v/F_m 逐渐上升并达到最大，这表明在捕光色素复合体恢复捕光作用后，反应中心活性逐渐恢复，捕光色素复合体与反应中心之间的光合传递逐渐建立^[11, 19]。

生物结皮能够适应各种胁迫条件而在荒漠地区广泛分布，这与各种结皮生物抵御胁迫的能力有着非常密切的关系。蓝藻（主要为丝状蓝藻）作为先锋物种，最先在流沙上拓殖生长而形成藻结皮，这一方面是由于蓝藻藻丝在生长过程中不断缠绕捆绑沙土颗粒；另一方面则是由于蓝藻胞外多糖的分泌使得松散的沙土颗粒被胶结在一起，从而形成稳定的结皮结构^[17, 23]。同时，蓝藻分泌的胞外多糖在结皮减少水分损失^[8, 24]、蓝藻自身维持膜的流变特性以及细胞结构稳定方面同样起着重要的作用^[8, 25-26]。在本实验中发现，随着接种蓝藻的生长以及结皮的形成，结皮蓝藻胞外多糖含量逐渐积累，尤其在干旱处理后短期内结皮蓝藻能够分泌更多的胞外多糖以保证结皮度过干旱环境。然而当结皮完全进入干燥状态后，结皮蓝藻停止所有代谢活动，结皮生物量及胞外多糖含量保持在一个相对稳定的水平。在干早期，尽管结皮中的胞外多糖为结皮提供了保护，但与处于湿润期的结皮相比，干燥的结皮停止了胞外多糖的分泌，因此实验中干旱处理29 d后的结皮胞外多糖含量明显低于对照，这也进一步表明了长期干旱对结皮的不利影响。甚至在一些研究中还发现随着干旱时间的延长以及其他环境条件的胁迫，结皮生物量有可能出现下降^[17, 27]；此外，结皮在获得水分不足以维持光合固碳的情况下，结皮生物也可能利用胞外多糖作为碳源进行短暂的生命活动^[27-28]。

4 结 论

本文通过实验室内接种荒漠蓝藻构建人工藻结皮，研究了干旱与重吸水对藻结皮光合生物量、多糖含量以及结皮光合特性的影响，取得的主要结论有：1) 接种蓝藻（具鞘微鞘藻*M. vaginatus*）能够快速促进藻结皮的形成；2) 干燥的藻结皮在重吸水后，结皮光合活性能够快速恢复；3) 在不

同水分条件下, 结皮光合活性随着水分的增加逐渐上升, 然而结皮净光合速率却随着水分的增加先上升后又下降。结皮蓝藻的代谢调节一方面是对水分可利用性的响应, 另一方面也可能是结皮适应荒漠干旱环境的一种重要策略; 同时实验结果也表明在人工藻结皮的维护管理中, 土壤水分控制在 20%~40% 最适合结皮进行光合固碳。

参考文献

- [1] Evans R D, Johansen J R. Microbiotic crusts and ecosystem processes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999, 18: 183—225
- [2] Elbert W, Weber B, Büdel B, et al. Microbiotic crusts on soil, rock and plants: Neglected major players in the global cycles of carbon and nitrogen? . *Biogeosciences Discussions*, 2009, 6: 6983—7015
- [3] 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 (3) : 287—288. Wei J C. Desert biological carpet engineering—A new governance way in arid desert (In Chinese) . *Arid Zone Research*, 2005, 22 (3) : 287—288
- [4] Hu C X, Zhang D L, Liu Y D. Research progress on algae of the microbial crusts in arid and semiarid regions. *Progress in Natural Science*, 2004, 14: 289—295
- [5] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China) . *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65 (1) : 77—88
- [6] Garcia-Pichel F, Castenholz R W. Characterization and biological implications of scytonemin, a cyanobacterial sheath pigment. *Journal of Phycology*, 1991, 27: 395—409
- [7] Potts M. Desiccation resistance of prokaryotes. *Microbiology Reviews*, 1994, 58: 755—805
- [8] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Effects of drought and salt stresses on man-made cyanobacterial crusts. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46: 381—386
- [9] Lan S B, Zhang Q Y, Wu L, et al. Artificially accelerating the reversal of desertification: Cyanobacterial inoculation facilitates the succession of vegetation communities. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48: 307—315
- [10] Lan S B, Wu L, Zhang D L, et al. Desiccation provides photosynthetic protection for crust cyanobacteria *Microcoleus vaginatus* from high temperature. *Physiologia Plantarum*, 2014, 152: 345—354
- [11] Bilger W, Rimke S, Schreiber U, et al. Inhibition of energy-transfer to photosystem II in lichens by dehydration: Different properties of reversibility with green and blue-green phycobionts. *Journal of Plant Physiology*, 1989, 134: 261—268
- [12] Nishiyama Y, Yamamoto H, Allakhverdiev S I, et al. Oxidative stress inhibits the repair of photodamage to the photosynthetic machinery. *EMBO Journal*, 2001, 20: 5587—5594
- [13] Heber U, Bilger W, Türk R, et al. Photoprotection of reaction centres in photosynthetic organisms: Mechanisms of thermal energy dissipation in desiccated thalli of the lichen *Lobaria pulmonaria*. *New Phytologist*, 2010, 185: 459—470
- [14] 吴丽, 张高科, 陈晓国, 等. 生物结皮的发育演替与微生物生物量变化. *环境科学*, 2014, 35 (4) : 1479—1485. Wu L, Zhang G K, Chen X G, et al. Development and succession of biological soil crusts and the changes of microbial biomasses (In Chinese) . *Environmental Science*, 2014, 35 (4) : 1479—1485
- [15] 吴丽, 陈晓国, 张高科, 等. 人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究. *环境科学*, 2014, 35 (3) : 1138—1143. Wu L, Chen X G, Zhang G K, et al. Development and succession of artificial biological soil crusts and water holding characteristics of topsoil (In Chinese) . *Environmental Science*, 2014, 35 (3) : 1138—1143
- [16] Wu L, Lan S B, Zhang D L, et al. Recovery of chlorophyll fluorescence and CO₂ exchange in lichen soil crusts after rehydration. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 55: 77—82
- [17] 兰书斌, 胡春香, 饶本强, 等. 人工藻结皮形成过程中表土非降雨型水分吸收的变化情况. *中国科学: 生命科学*, 2010, 53 (8) : 751—757. Lan S B, Hu C X, Rao B Q, et al. Non-rainfall water sources in the topsoil and their changes during formation of man-made algal crusts at the eastern edge of Qubqi Desert, Inner Mongolia. *Science China: Life Sciences*, 2010, 53 (9) : 1135—1141
- [18] Chen L Z, Xie Z M, Hu C X, et al. Man-made desert algal crusts as affected by environmental factors in Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67: 521—527
- [19] Wu L, Lan S B, Zhang D L, et al. Functional reactivation of photosystem II in lichen soil crusts after long-term desiccation. *Plant and Soil*, 2013, 369: 177—186
- [20] Wu L, Zhang G K, Lan S B, et al. Longitudinal photosynthetic gradient in crust lichens' thalli. *Microbial Ecology*, 2014, 67: 888—896
- [21] Björkman O, Demmig B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K

- among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 1987, 170: 489—504
- [22] Kolber Z, Zehr J, Falkowski P G. Effects of growth irradiance and nitrogen limitation on photosynthesis energy conversion in photosystem II. *Plant Physiology*, 1988, 88: 72—79
- [23] Xie Z M, Liu Y D, Hu C X, et al. Relationships between the biomass of algal crusts in fields and their compressive strength. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 567—572
- [24] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress. *Plant Cell and Environment*, 2002, 25: 239—250
- [25] Hill D R, Keenan T W, Helm R F, et al. Extracellular polysaccharide of *Nostoc commune* (cyanobacteria) inhibits fusion of membrane vesicles during desiccation. *Journal of Applied Phycology*, 1997, 9: 237—248
- [26] Potts M. Minireview: Mechanisms of desiccation tolerance in cyanobacteria. *European Journal of Phycology*, 1999, 34: 319—328
- [27] Kidron G J. Microclimate control upon sand microbiotic crusts, western Negev Desert, Israel. *Geomorphology*, 2000, 36: 1—18
- [28] Mager D M, Thomas A D. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75: 91—97

EFFECTS OF DROUGHT AND REHYDRATION ON PHOTOSYNTHETIC CHARACTERISTICS OF ARTIFICIAL ALGAL CRUSTS

Wu Li^{1, 2} Yang Hong¹ Lan Shubin² Zhang Delu³ Hu Chunxiang^{2†}

(1 School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(2 Key Laboratory of Algal Biology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China)

(3 School of Sciences, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract Constructing artificial algal crusts by means of cyanobacterial inoculation could promote growth and development of biological crusts on sand dunes in desert regions and restoration of the whole desert ecosystem, and hence is considered as an effective approach to desertification control. However, in the course of constructing artificial algal crusts, the inoculated cyanobacteria or formed crusts are susceptible to various environmental stresses, mainly drought in the desert regions. An in-lab experiment was carried out to have artificial algal crusts exposed to drought and rehydration, and to explore their effects on crust biomass, exopolysaccharides and photosynthesis of the crusts. It was found that drought for one day could provisionally promote secretion of crust cyanobacterial exopolysaccharides ($p < 0.05$). Once the crusts were completely dried, cyanobacteria of the crusts stopped all their metabolic activities, and biomass and exopolysaccharides content of the crusts remained at a certain relatively steady level. After rehydration, crust original fluorescence F_o got recovered quickly and reached the maximum within 10 min. Afterwards, F_o decreased gradually and crust photosynthetic activity (F_v/F_m) increased and leveled off steadily in line with the function $y = ax / (b + x)$. In addition, under different water conditions, crust photosynthetic activity increased with the increasing crust water content, but crust net photosynthesis (P_n) first increased and then decreased with the increasing crust water content, showing a unimodal variation pattern. This study suggests that the regulation of crust cyanobacteria in metabolism plays an important role in the adaptation of artificial algal crusts to arid desert environmental conditions. The findings may help us further understand how cyanobacteria or cyanobacterial crusts adapt to drought stress, and provide theoretical basis and practical lessons for construction, maintenance and management of artificial algal crusts in desertification control.

Key words Desertification; Biological soil crusts; Cyanobacteria; Drought; Photosynthesis

(责任编辑: 卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis Song Changqing, Tan Wenfeng (968)
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. (977)

Research Articles

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. (989)
 Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. (1000)
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. (1013)
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou (1022)
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. (1030)
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang (1042)
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. (1056)
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao (1067)
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti (1076)
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. (1086)
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. (1095)
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. (1104)
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. (1114)
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. (1122)
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. (1133)
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. (1142)
 Relationships of N₂O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. (1151)
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. (1164)

Communications and Comments

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. (1172)

Research Notes

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. (1179)
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. (1186)
 Distribution of Cu (II) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO₃ and its affecting factors Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. (1194)

Cover Picture: Toxicity of deca-brominated diphenyl ether (BDE-209) to *Caenorhabditis elegans* (by Wang Yingli)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址:南京市北京东路71号 邮政编码:210008
电话:025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
电话:010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱 邮政编码:100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号:CN 32-1119/P

国内邮发代号:2-560

国外发行代号:BM45

定价:60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156