

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 20 期 Vol.31 No.20 **2011**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 20 期 2011 年 10 月 (半月刊)

## 目 次

- 洋山港潮间带大型底栖动物群落结构及多样性..... 王宝强,薛俊增,庄 骅,等 (5865)
- 天津近岸海域夏季大型底栖生物群落结构变化特征..... 冯剑丰,王秀明,孟伟庆,等 (5875)
- 基于景观遗传学的滇金丝猴栖息地连接度分析..... 薛亚东,李 丽,李迪强,等 (5886)
- 三江平原湿地鸟类丰富度的空间格局及热点地区保护..... 刘吉平,吕宪国 (5894)
- 江苏沿海地区耕地景观生态安全格局变化与驱动机制 ..... 王 千,金晓斌,周寅康 (5903)
- 广州市主城区树冠覆盖景观格局梯度..... 朱耀军,王 成,贾宝全,等 (5910)
- 景观结构动态变化及其土地利用生态安全——以建三江垦区为例 ..... 林 佳,宋 戈,宋思铭 (5918)
- 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划..... 李 晖,易 娜,姚文璟,等 (5928)
- 苏南典型城镇耕地景观动态变化及其影响因素..... 周 锐,胡远满,苏海龙,等 (5937)
- 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式..... 韩大勇,杨永兴,杨 杨,等 (5946)
- 放牧胁迫下若尔盖高原沼泽退化特征及其影响因子..... 李 珂,杨永兴,杨 杨,等 (5956)
- 近 20 年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响..... 蓝文陆 (5970)
- 万仙山油松径向生长与气候因子的关系 ..... 彭剑峰,杨爱荣,田沁花 (5977)
- 50 年来山东塔山植被与物种多样性的变化 ..... 高 远,陈玉峰,董 恒,等 (5984)
- 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性..... 王亚婷,范连连 (5992)
- 遮荫对濒危植物崖柏光合作用和叶绿素荧光参数的影响..... 刘建锋,杨文娟,江泽平,等 (5999)
- 遮荫对 3 年生东北铁线莲生长特性及品质的影响..... 韩忠明,赵淑杰,刘翠晶,等 (6005)
- 云雾山铁杆蒿茎叶浸提液对封育草地四种优势植物的化感效应..... 王 辉,谢永生,杨亚利,等 (6013)
- 杭州湾滨海滩涂盐基阳离子对植物分布及多样性的影响 ..... 吴统贵,吴 明,虞木奎,等 (6022)
- 藏北高寒草原针茅属植物 AM 真菌的物种多样性..... 蔡晓布,彭岳林,杨敏娜,等 (6029)
- 成熟马占相思林的蒸腾耗水及年际变化..... 赵 平,邹绿柳,饶兴权,等 (6038)
- 荆条叶性状对野外不同光环境的表型可塑性..... 杜 宁,张秀茹,王 炜,等 (6049)
- 短期极端干旱事件干扰后退化沙质草地群落恢复力稳定性的测度与比较..... 张继义,赵哈林 (6060)
- 滨海盐碱地土壤质量指标对生态改良的响应..... 单奇华,张建锋,阮伟建,等 (6072)
- 退化草地阿尔泰针茅与狼毒种群的小尺度种间空间关联..... 赵成章,任 珩 (6080)
- 延河流域植物群落功能性状对环境梯度的响应 ..... 龚时慧,温仲明,施 宇 (6088)
- 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加——FACE 研究 ..... 王云霞,王晓莹,杨连新,等 (6098)
- 甘蔗//大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响 ..... 杨文亭,李志贤,舒 磊,等 (6108)
- 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响..... 张 鹏,李新荣,胡宜刚,等 (6116)
- 锌对两个品种茄子果实品质的效应..... 王小晶,王慧敏,王 菲,等 (6125)
- Cd<sup>2+</sup> 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响 ..... 钱永强,周晓星,韩 蕾,等 (6134)
- 紫茉莉对铅胁迫生理响应的 FTIR 研究 ..... 薛生国,朱 锋,叶 晟,等 (6143)

结缕草对重金属镉的生理响应 .....	刘俊祥,孙振元,巨关升,等 (6149)
两种大型真菌子实体对 Cd <sup>2+</sup> 的生物吸附特性 .....	李维焕,孟凯,李俊飞,等 (6157)
富营养化山仔水库沉积物微囊藻复苏的受控因子 .....	苏玉萍,林慧,钟厚璋,等 (6167)
一种新型的昆虫诱捕器及其对长足大竹象的诱捕作用 .....	杨瑶君,刘超,汪淑芳,等 (6174)
光周期对梨小食心虫滞育诱导的影响 .....	何超,孟泉科,花蕾,等 (6180)
农林复合生态系统防护林斑块边缘效应对节肢动物的影响 .....	汪洋,王刚,杜瑛琪,等 (6186)
中国超大城市土地利用状况及其生态系统服务动态演变 .....	程琳,李锋,邓华锋 (6194)
城市综合生态风险评价——以淮北市城区为例 .....	张小飞,王如松,李正国,等 (6204)
唐山市域 1993—2009 年热场变化 .....	贾宝全,邱尔发,蔡春菊 (6215)
基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究 .....	王茜茜,周敬宣,李湘梅,等 (6224)
长株潭城市群生态屏障研究 .....	夏本安,王福生,侯方舟 (6231)
基于生态绿当量的城市土地利用结构优化——以宁国市为例 .....	赵丹,李锋,王如松 (6242)
基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测——以甘肃省为例 .....	张勃,刘秀丽 (6251)
<b>专论与综述</b>	
孤立湿地研究进展 .....	田学智,刘吉平 (6261)
甲藻的异养营养型 .....	孙军,郭术津 (6270)
生态工程领域微生物菌剂研究进展 .....	文娅,赵国柱,周传斌,等 (6287)
我国生态文明建设及其评估体系研究进展 .....	白杨,黄宇驰,王敏,等 (6295)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 440 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 49 * 2011-10	



**封面图说:** 壶口瀑布是黄河中游流经秦晋大峡谷时形成的一个天然瀑布。此地两岸夹山,河底石岩上冲刷成一巨沟,宽达 30 米,深约 50 米,最大瀑面 3 万平方米。滚滚黄水奔流至此,倒悬倾注,若奔马直入河沟,波浪翻滚,惊涛怒吼,震声数里可闻。其形其声如巨壶沸腾,故名壶口。300 余米宽的滚滚黄河水至此突然收入壶口,有“千里黄河一壶收”之说。

**彩图提供:** 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

张鹏, 李新荣, 胡宜刚, 黄磊, 冯丽, 赵洋. 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响. 生态学报, 2011, 31(20): 6116-6124.  
Zhang P, Li X R, Hu Y G, Huang L, Feng L, Zhao Y. Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6116-6124.

## 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响

张 鹏\*, 李新荣, 胡宜刚, 黄 磊, 冯 丽, 赵 洋

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠试验研究站, 兰州 730000)

**摘要:** 土壤可利用氮是干旱半干旱区生态系统中除水分之外的关键限制因子, 研究湿润持续时间和温度变化对温性荒漠藻类结皮和藓类结皮固氮活性的影响, 对于深入认识和准确评价全球变化大背景下生物土壤结皮对区域生态系统的氮贡献至关重要。通过野外调查采样, 在一次较大降水事件发生后, 利用开顶式生长室, 采用乙炔还原法连续测定了沙坡头地区人工植被区和天然植被区两类典型生物土壤结皮固氮活性的变化, 分析了湿润持续时间和模拟增温对其固氮活性的影响。研究表明: 在经历 31d 持续干旱, 降水发生后第 4 天两类结皮的固氮活性达到最大, 此后随样品水分含量下降, 至第 10 天其固氮活性将至最低; 结皮固氮活性与水分含量之间呈显著的二次函数关系, 其固氮活性随水分含量的增加呈先上升后下降的趋势, 藻类结皮的固氮活性显著高于藓类结皮; 短期模拟增温并不能显著提高其固氮活性, 增温主要通过加速结皮水分散失来影响其固氮活性。上述结果反映了水分是控制生物土壤结皮固氮活性的关键因子, 而实验前样品所经历的环境条件则决定了降水发生后其到达最大固氮速率的时间, 野外长期观测结合控制严格的室内实验才能准确评价生物土壤结皮对区域生态系统的氮贡献。

**关键词:** 生物土壤结皮; 乙炔还原法; 湿润持续时间; 固氮活性; 固氮

## Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China

ZHANG Peng\*, LI Xinrong, HU Yigang, HUANG Lei, FENG Li, ZHAO Yang

Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** In addition to moisture, availability of soil nitrogen is generally the key limiting factor in arid and semiarid ecosystems. Thus, research on the potential nitrogen-fixing activity (NA) of algae and moss crusts for different wetting durations and temperatures in temperate desert was conducted. The present study is especially important for the understanding and accurate evaluation of nitrogen contribution ability of biological soil crust (BSC) to region ecosystems in the context of global change. Algae and moss crusts were collected at artificial revegetation desert area and at the nearly natural vegetation area in the Shapotou area of Tengger Desert. Samples were incubated in OTC. The NA of two BSC types was continuously measured using the method of acetylene reduction assay (ARA) after a large precipitation event. Subsequently the influence of wetting duration and temperature on NA of BSC was analyzed. The results demonstrated that the NA of two crusts reached the maximum level 4 days after precipitation at drought condition (i. e., without precipitation for 31 days). The NA achieved the lowest value on the 10th day with the decrease of moisture content. Significant quadratic function relationship was observed between NA and water content. The NA of algae crust was significantly higher than that of moss crust; the average values were  $5.3 \times 10^4$  and  $0.9 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  for algae crust and moss crust, respectively. The NA of BSC increased and subsequently decreased with the increase of moisture content. Short-term

基金项目: 中国科学院重要方向性项目(KZCXZ-EW-301); 国家自然科学基金杰出青年基金(40825001)

收稿日期: 2011-06-17; 修订日期: 2011-07-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangp1419@163.com



simulated warming did not increase the nitrogen-fixation activity of BSC significantly, which influenced the NA of BSC by accelerating water loss of the crusts. These results showed that moisture was the key factor controlling the NA of BSC. The environmental conditions prior to the experiment determined the maximum time required to reach nitrogen fixation rate after rainfall. In the future, the combination of the long-term field observations and strict laboratory work will be necessary to achieve accurate evaluation of the nitrogen contribution of BSC to the region ecosystems.

**Key Words:** biological soil crusts (BSC); acetylene reduction assays (ARA); wetting duration; nitrogenase activity (NA); nitrogen fixation

氮素限制在陆地生态系统中普遍存在,在干旱环境中表现的尤为明显<sup>[1]</sup>。干旱、半干旱区占地球陆地表面的 35% 以上<sup>[2]</sup>,氮素可利用性是除水分之外影响该区域生态系统生物活性的关键控制因子<sup>[3]</sup>。大多数荒漠生态系统受非生物因子的调控和胁迫,特别是水分的匮乏,地表不可能支持大面积、相对均一和连续分布的维管束植物群落的覆盖,植物稀疏和斑块状的分布为隐花植物(Cryptogam,包括藻类、地衣、苔藓、蕨类和土壤微生物)的拓殖发育提供了空间和适宜的生态位,其分布面积在干旱区占地表面积的 40%<sup>[4]</sup>。隐花植物中的藻类、地衣、苔藓和蓝藻、蓝细菌形成的生物土壤结皮具有固氮作用,它们能将大气中的 N<sub>2</sub> 固定或还原为可被生物所利用的铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)<sup>[5]</sup>。它们所固定的氮是这些地区的重要氮源,对土壤的物理和生态过程具有重要影响<sup>[5-5]</sup>,在诸如沙漠、荒漠、稀树草地等极端环境中的作用尤为突出<sup>[7]</sup>。关于生物土壤结皮在干旱环境中的形成、分布及其生态功能已经引起研究者的广泛关注<sup>[8-9]</sup>,但与豆科固氮类植物的研究相比,对广泛分布于干旱环境中的隐花植物共生固氮的生态学认识有限,在我国对自然系统中生物土壤结皮的固氮功能的生态学研究也不多见<sup>[10]</sup>。

国外有关生物土壤结皮固氮功能的众多研究表明,其固氮活性受环境因子的强烈影响,使得其固氮速率在时间和空间上存在着较大的变异性<sup>[5]</sup>。生物土壤结皮属变水(poikilohydric)生物,自身对水分的调节能力极差,无法利用深层土壤水分<sup>[11]</sup>。而生物土壤结皮仅在湿润时才能进行新陈代谢和氮固定,因此其生物活性主要与降雨量、降雨频度和降雨的持续时间密切相关<sup>[12]</sup>,特别是降水事件发生后其保持湿润的持续时间将直接影响其固氮速率,湿润持续时间被认为是影响其固氮功能的关键因子之一<sup>[13]</sup>。国外关于生物土壤结皮水分含量与固氮速率关系的研究已有很多,但由于大部分结果是在实验室人工控制条件下得出的,与少量的野外试验结果相差较大,甚至相反<sup>[5]</sup>,说明生态因子与环境因子对其固氮活性的影响极其复杂,这可能与研究的区域条件特别是降水发生后的环境条件、实验时间尺度等密切相关。而目前我国来自野外研究的实验数据非常稀少,很难将实验室得出的研究结果外推到区域尺度和自然环境水平上。

腾格里沙漠东南缘沙坡头地区属于典型的温带荒漠化草原向草原化荒漠的过渡区,始建于 20 世纪 50 年代中期的人工固沙植被体系和相邻自然植被区内广泛分布着不同发育阶段的生物土壤结皮。它们在研究区内的分布对土壤水文过程、物种多样性、土壤种子库和土壤质地养分等土壤环境条件和植被组成产生了深刻影响<sup>[4, 9]</sup>。但关于生物土壤结皮对该系统的氮贡献,环境因子对其固氮能力的影响,及其影响机理,目前尚不清楚。仅有的研究尚停留在通过测定土壤氮素含量等性状参数方面来定性描述和推测其对系统的氮贡献,缺乏对其自身固氮能力的定量研究<sup>[9]</sup>。因此,本实验以腾格里沙漠东南缘沙坡头地区人工固沙植被区和相邻天然植被区发育良好的两类典型生物土壤结皮(藻类和藓类为优势种)为研究对象,野外采集原状结皮土壤样品,在一次较大的自然降水事件发生后,利用开顶式生长室(Open-top growth chambers, OTC)连续测定了两类生物土壤结皮固氮活性的变化,研究湿润持续时间、水分含量和温度变化对其固氮活性的影响,分析并阐述我国温带荒漠区生物土壤结皮对荒漠生态系统的氮贡献及对人工植被系统演替的指示意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘沙坡头包兰铁路以北人工固沙植被区和相邻红卫天然植被区(37°32'—

37°26' N, 105°02'—104°30' E), 该区海拔 1300—1350 m, 年均温 10 °C, 1 月平均气温 -6.9 °C, 7 月 24.3 °C; 年均降水量 186 mm, 80% 的降水集中在 5—9 月; 年均潜在蒸发量约 2900 mm, 平均风速 2.6 m/s, 年内降尘天数约 59 d<sup>[14]</sup>。主要土壤类型为灰钙土和风沙土。人工植被区的主要固沙灌木、半灌木为柠条 (*Caragana korshinskii*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*), 草本植物主要有小画眉草 (*Eragrostis poaeoides*)、雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 等。天然植被区灌木、半灌木有柠条 (*Caragana korshinskii*)、红砂 (*Reaumuria soongorica*)、白刺 (*Nitraria tangutorum*)、珍珠猪毛菜 (*Salsola passerina*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 等, 优势草本植物有茵陈蒿 (*A. capillaris*)、冷蒿 (*A. frigida*)、无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*)、寸苔草 (*Carex duriuscula*) 等<sup>[15]</sup>。

## 1.2 样品采集与布置

2010 年 10 月中旬采用样线法在沙坡头人工固沙植被区 (1964 年建植) 和相邻红卫天然植被区选择生物土壤结皮发育良好的区域采集典型生物土壤结皮样品 (藻类结皮和藓类结皮), 为避免地貌和灌木及草本植物对样品的影响, 采样时选择各种类型结皮均有发育的迎风坡和垄间低地, 距离灌丛 2 m 外的区域采集结皮样品。为保证样品的完整性, 采样前先湿润地表, 之后用 PVC 管 (直径 10 cm, 高 10 cm) 采集原状结皮土壤样品。将野外采集的原状样带回沙坡头沙漠试验研究站气候观测场摆放在自然环境下。

## 1.3 生物土壤结皮固氮活性测定

### 1.3.1 基本原理

采用乙炔还原法 (Acetylene reduction assay, ARA) 测定生物土壤结皮的固氮活性<sup>[5, 16-17]</sup>。该方法的基本原理是在供给等量还原物的情况下, 生物土壤结皮的固氮酶还原 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 的量与还原大气中的 N<sub>2</sub> 呈一定的比例, 一般用生物土壤结皮还原 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 的产物——C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 的生成速率来表征生物土壤结皮的固氮活性 (NA)。

### 1.3.2 实验过程

2011 年 5 月 7—9 日有降雨, 降雨量 17 mm, 10 日天气转晴, 早 8 时将摆放在实验观测场的生物结皮样品用电子天平 (TD3100) 进行称重后布置在不同规格的开顶式生长室 (OTC) (大 OTC: 边长 1.3 m、高 2 m 等边八边体; 小 OTC: 边长 1 m、高 1.5 m 等边四边体) 内中心位置及生长室外自然状态下 (对照), 2 个地区 (沙坡头 1964 年建植人工固沙植被区和相邻天然植被区), 2 种结皮类型 (藻类结皮和藓类结皮), 3 个温度梯度 (大 OTC、小 OTC 和对照), 各 3 个重复。将样品放置 2 h 后用红外温度计 (IRT, England) 测量样品表面温度, 之后将有机玻璃罩 (直径 12 cm, 高 15 cm, 下端开口, 上端密封, 中间留一圆孔用橡皮塞密封) 罩在结皮样品上, 下端插入沙子中, 创造一个密闭环境。然后用注射器向培养器中注入乙炔气体, 使容器乙炔体积分数为 10%。在自然状态下培养 4 h, 同时每隔 1 h 记录大小 OTC 内及室外的空气温度。培养结束后用注射器收集培养器顶部气体 5 mL。收气结束后即刻去除收气罩, 并用红外温度计测量样品表面温度。将收集的气体带回实验室后即刻用气相色谱仪 (Agilent GC6820, USA) 测定乙烯生成量。固氮活性结果以乙烯生成速率 (nmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) 表示。10 日晚至 11 日下午有降雨, 降雨量 2 mm。12—19 日天气晴好, 无降雨发生, 从 12 日开始每日 (12—15 日) 和隔日 (17 日和 19 日) 于相同时间重复上述试验过程, 一直到样品重量恒定, 结束实验。

## 1.4 统计分析

采用 Excel 2003 和 SPSS11.5 for Windows (SPSS, Chicago, IL, USA) 进行数据整理和统计分析, 用 ANOVA 模块中的 LSD 分析不同结皮类型、不同温度处理和实验期生物土壤结皮固氮活性的差异显著性, 用 Regression-Curve Estimation 模块中的 QUADRATIC 拟合结皮固氮活性与水分含量的曲线回归方程并对拟合效果进行显著性检验。

## 2 结果

### 2.1 实验期温度与样品含水量变化

实验期 (2011 年 5 月 10 日, 12—15 日, 17 日, 19 日) 全天气温在 12—28.5 °C 之间变化, 平均为 18.6 °C。

培养期(10:00—14:00)气温在 19.1—34.5 °C 之间变化,平均为 27.4 °C,其中小 OTC 气温显著高于大 OTC 和 CK,平均值分别为 29.8、26.5 和 26 °C。培养期样品表面温度(用培养时加罩前和除罩后样品表面温度的平均值表示)在 19.2—45.1 °C 间变化,平均为 28.7 °C;藻类结皮的表面温度在 19.1—45.9 °C 间变化,平均为 29.1 °C,由于受天气、太阳辐射及 OTC 本身局部遮光的影响,不同温度处理下的样品表面温度变化不一致,总体表现为 CK>小 OTC>大 OTC;藓类结皮的表面温度在 19.3—44.3 °C 间变化,平均为 28.3 °C,不同温度处理下的藓类结皮样品表面温度表现为小 OTC>CK>大 OTC。

实验期两类生物土壤结皮含水量在 0.2%—15.2% 间变化,降雨后第 1 天和第 3 天(第 2 天有降雨,降雨量 2 mm)藻类结皮样品平均含水量高于藓类结皮,分别为 14.1% 和 13.3%,这是由于藓类结皮相对于藻类结皮具有较高的生物量,水分散失快于藻类结皮,含水量相对较低;其后由于样品表层水分散失殆尽,两类生物土壤结皮的含水量差异不大,约为 0.1%—0.2%。不同温度处理下两类生物土壤结皮样品平均含水量表现一致,都表现为 CK>小 OTC>大 OTC,这是因为大、小 OTC 内相对较高的气温导致样品水分散失快于 CK(表 1,图 1)。

表 1 实验期温度与样品含水量的变化

Table 1 Variation of temperature and samples water content in experimental period

温度与样品含水量 Temperature/°C and SWC/%	结皮类型 Types of BSCs	模拟升温 Simulated temperature	降水后天数 Days after rainfall/d						
			1	3	4	5	6	8	10
全天气温 Day temperature /°C *			16.1 (3.6)	12.0 (2.5)	13.9 (2.6)	20.7 (3.1)	22.0 (2.8)	28.5(1.9)	17.3 (1.1)
培养期气温 Incubation period temperature/°C **	大 OTC		29.6 (0.4)a	23.3 (0.6)a	23.0 (0.7)a	29.0 (1.1)a	29.6 (0.5)a	32.3 (1.0)a	18.3 (0.8)a
	小 OTC		33.4 (0.8)b	26.3 (0.9)b	23.7 (0.8)b	31.9 (1.9)b	34.4 (0.4)b	36.9 (1.2)b	21.7 (0.4)b
	CK		28.2 (0.3)c	21.6 (0.4)c	20.9 (0.6)c	28.1 (1.4)a	31.6 (0.2)c	34.2 (0.8)c	17.3 (1.1)a
	平均 Average		30.4	23.7	22.5	29.7	31.8	34.5	19.1
样品表面温度 Surface temperature/°C	藻类结皮 Algae crust	大 OTC	30.3 (0.5)a	18.6 (0.23)a	18.3 (0.17)a	32.2 (0.8)a	34.5 (0.4)a	44.9 (0.3)a	18.7 (0.23)a
		小 OTC	31.9 (0.5)b	21.9 (0.14)b	19.2 (0.11)b	30.8 (0.3)a	37.7 (0.1)b	44.1 (0.5)a	19.3 (0.10)b
		CK	32.6 (0.2)b	19.5 (0.04)c	18.8 (0.04)c	31.0 (0.8)a	37.8 (0.4)b	48.7 (0.5)b	19.3 (0.04)b
		平均 Average	31.6	20.0	18.8	31.3	36.7	45.9	19.1
	藓类结皮 Moss crust	大 OTC	29.1 (0.5)a	18.8 (0.1)a	18.5 (0.1)a	27.5 (0.4)a	32.9 (0.2)a	42.2 (0.3)a	18.9 (0.1)a
		小 OTC	32.0 (0.4)b	22.2 (0.2)b	19.5 (0.2)b	30.6 (0.6)b	37.0 (0.4)b	44.4 (1.0)ab	19.6 (0.2)b
		CK	33.4 (0.2)c	19.6 (0.1)c	18.9 (0.1)c	29.0 (0.2)b	35.4 (0.2)c	46.4 (0.2)b	19.4 (0.1)b
		平均 Average	31.5	20.2	19.0	29.0	35.1	44.3	19.3
		总平均 Total average	31.5	20.1	18.9	30.2	35.9	45.1	19.2
样品含水量 SWC/%	藻类结皮 Algae crust	大 OTC	14.6 (0.3)a	12.9 (0.2)a	8.8 (0.2)a	5.5 (0.1)a	3.5 (0.1)a	2.1 (0.02)a	0.4 (0.00)a
		小 OTC	15.0 (0.3)a	13.2 (0.3)ab	9.5 (0.2)ab	6.7 (0.2)b	4.1 (0.2)b	2.2 (0.05)a	0.4 (0.02)a
		CK	15.2 (0.2)a	14.0 (0.2)b	9.9 (0.1)b	6.4 (0.2)b	3.6 (0.1)ab	2.2 (0.04)a	0.4 (0.02)a
		平均 Average	14.9	13.4	9.4	6.2	3.7	2.2	0.4
	藓类结皮 Moss crust	大 OTC	13.4 (0.2)a	12.0 (0.2)a	8.6 (0.3)a	5.7 (0.3)a	3.7 (0.1)a	2.0 (0.03)a	0.2 (0.01)a
		小 OTC	13.8 (0.4)ab	12.1 (0.4)a	8.8 (0.4)a	6.3 (0.4)ab	3.7 (0.2)ab	2.0 (0.06)a	0.2 (0.02)a
		CK	14.8 (0.3)b	13.7 (0.3)b	10.2 (0.2)b	7.1 (0.2)b	4.3 (0.1)b	2.2 (0.02)a	0.4 (0.02)a
		平均 Average	14.0	12.6	9.2	6.4	3.9	2.1	0.3
		总平均 Total average	14.5	13.0	9.3	6.3	3.8	2.1	0.4

\* 全天气温数据来自沙坡头沙漠试验研究站气候观测场相距 50 m 处小型气候观测塔; \*\* 不同字母表示培养期气温、样品表面温度、样品含水量在不同温度处理下差异显著( $P<0.05$ ); 表中数据为 Mean 和(SE)

## 2.2 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响

实验期藻类结皮固氮活性在  $1.3 \times 10^4$ — $12.8 \times 10^4$  nmol  $C_2H_4 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$  间变化,平均为  $5.5 \times 10^4$  nmol  $C_2H_4 \cdot$

$\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。自然植被区和人工植被区藻类结皮固氮活性的变化区间分别为  $1.6\times 10^4$ — $12.8\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $1.3\times 10^4$ — $12.2\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 平均为  $4.9\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $5.7\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 人工植被区藻类结皮固氮活性高于自然植被区。不同温度处理下自然植被区藻类结皮平均固氮活性表现为小 OTC>大 OTC>CK, 人工植被区藻类结皮平均固氮活性则表现为小 OTC>CK>大 OTC。实验期藓类结皮固氮活性在  $0.2\times 10^4$ — $2.3\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  间变化, 平均为  $0.9\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 显著低于藻类结皮的平均固氮活性。自然植被区和人工植被区藓类结皮固氮活性的变化区间分别为  $0.2\times 10^4$ — $2.3\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $0.2\times 10^4$ — $1.7\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 平均为  $1.0\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $0.8\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , 自然植被区藓类结皮固氮活性略高于人工植被区。不同温度处理下自然植被区和人工植被区藓类结皮固氮活性差异不大, 仅为  $0.1$ — $0.2\times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  (表 2)。

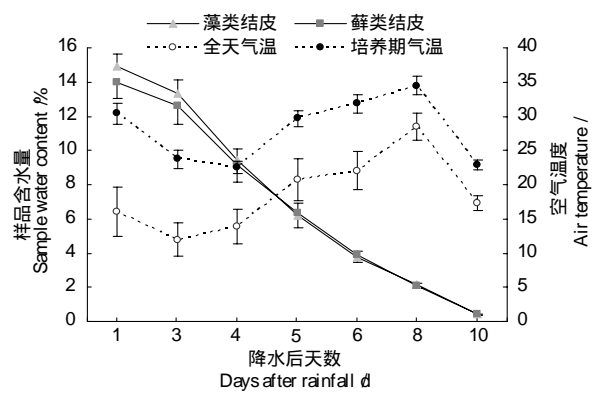


图 1 实验期间样品含水量 (Mean±SD) 及气温 (Mean±SE) 的变化  
Fig. 1 Variation of samples water content and temperature in experimental period

表 2 实验期不同植被区、不同类型生物土壤结皮固氮活性在不同温度处理下的变化

Table 2 Variation of NA of different BSC types, vegetation areas at different temperature treatments in experimental period

固氮活性 Nitrogenase activity (NA) /( $\text{nmol C}_2\text{H}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) *			降水后天数 Days after rainfall/d							
结皮类型 Types of BSCs	植被区 Vegetation area	模拟升温 Simulated temperature	1	3	4	5	6	8	10	
藻类结皮 Algae crust	自然植被区 Nature vegetation area	大 OTC	2.6 (0.1)a	4.7 (1.8)a	6.1 (0.2)a	6.5 (1.8)a	6.3 (0.2)a	4.1 (1.73)a	1.9 (0.7)a	
		小 OTC	1.9 (0.5)a	4.2 (1.1)ab	12.8 (2.2)b	9.1 (2.1)b	7.7 (1.0)b	4.7 (0.54)a	1.7 (0.8)a	
		平均 Average	2.0	3.8	8.9	7.3	6.6	3.8	1.7	
	人工植被区 Artificial vegetation area	大 OTC	2.3 (0.1)a	3.9 (0.4)a	10.0 (2.6)a	6.2 (0.4)a	7.1 (2.5)a	4.6 (1.2)a	1.9 (0.3)a	
		小 OTC	1.6 (0.4)b	4.0 (1.2)a	12.1 (2.0)a	10.6 (1.4)b	8.6 (1.2)a	4.7 (0.8)a	1.3 (0.2)b	
		CK	1.3 (0.3)b	3.3 (1.1)b	12.2 (3.1)a	10.4 (0.5)b	7.6 (1.0)a	3.4 (0.2)a	1.8 (0.5)a	
		平均 Average	1.8	3.7	11.6	9.1	7.8	4.3	1.7	
总平均 Total average			1.9	3.8	10.3	8.2	7.2	4.1	1.7	
藓类结皮 Moss crust	自然植被区 Nature vegetation area	大 OTC	0.5 (0.1)a	0.9 (0.2)a	1.1 (0.3)a	0.9 (0.2)a	1.6 (0.4)a	0.6 (0.1)a	0.7 (0.3)a	
		小 OTC	0.3 (0.1)b	0.7 (0.4)a	2.3 (0.5)b	1.6 (0.6)a	1.4 (0.1)a	0.6 (0.2)a	0.6 (0.2)a	
		CK	0.2 (0.1)b	0.6 (0.1)a	1.7 (0.2)ab	1.5 (0.3)a	1.3 (0.1)a	0.9 (0.1)a	0.7 (0.3)a	
	平均 Average	0.3	0.7	1.7	1.4	1.4	0.7	0.7		
	人工植被区 Artificial vegetation area	大 OTC	0.3 (0.08)a	0.7 (0.18)a	1.4 (0.26)a	0.9 (0.28)a	0.9 (0.15)a	0.7 (0.21)a	0.7 (0.09)a	
		小 OTC	0.2 (0.04)a	0.5 (0.21)a	1.7 (0.15)a	0.9 (0.22)a	1.1 (0.34)a	0.6 (0.13)a	0.5 (0.11)b	
		CK	0.2 (0.03)a	0.6 (0.07)a	1.5 (0.25)a	1.3 (0.23)a	1.2 (0.46)a	0.7 (0.11)a	0.6 (0.07)ab	
平均 Average		0.2	0.6	1.5	1.0	1.1	0.7	0.6		
总平均 Total average			0.3	0.6	1.6	1.2	1.2	0.7	0.6	

\* 不同字母表示相同植被区、同一类型生物土壤结皮固氮活性在不同温度处理下差异显著 ( $P<0.05$ ); 表中数据为 Mean $\times 10^4$  和 ( $SD\times 10^4$ )

降水后藻类和藓类结皮固氮活性随水分散失都表现出相同的变化趋势, 但整个实验期藻类结皮的固氮活性都要显著高于藓类结皮 (图 2)。降水后第 1 天两类结皮的固氮活性都较低, 从第 3 天开始, 随着水分散失,



固氮活性逐渐增强,至第4天迅速达到最大值(藻结皮和藓类结皮平均固氮活性分别为  $10.3 \times 10^4$  和  $1.6 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),是第1天固氮活性的5倍多。此后,由于气温升高(图1),水分散失加快,两类结皮固氮活性缓慢下降(第5、6天),但都显著高于降水后第1、3、8和第10天的固氮活性(图2)。至第6天后,由于样品水分已散失殆尽,两类结皮的固氮活性急剧下降,至第10天,两类结皮的含水量仅为0.3%左右,其固氮活性也下降到  $1.7 \times 10^4$  和  $0.6 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,仅为最大固氮活性时的1/6和1/3。

### 2.3 生物土壤结皮固氮活性与水分含量、温度的关系

整个实验期藻类、藓类结皮固氮活性与样品含水量之间均呈显著的二次函数关系,随水分含量增加,固氮活性呈现先上升后降低的趋势,差异显著(图3,  $P < 0.001$ )。藻类结皮样品含水量在6.7%时的固氮活性(平均为  $8.5 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )显著高于较高含水量(14.1%)和较低含水量(1.3%)时的固氮活性(分别为  $2.8 \times 10^4$  和  $2.9 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )。藓类结皮固氮活性在样品含水量为6.8%时(平均为  $1.3 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )显著高于较高含水量(13.4%)和较低含水量(1.3%)时的固氮活性(分别为  $0.5 \times 10^4$  和  $0.6 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) (表2,图2,图3)。

藻类结皮具有较高固氮活性时的平均样品表面温度为  $28.9^\circ\text{C}$ ,具有较低固氮活性时的平均表面温度分别为  $25.8^\circ\text{C}$  (样品含水量较高)和  $32.5^\circ\text{C}$  (样品含水量较低)。藓类结皮具有较高固氮活性时的平均样品表面温度为  $27.7^\circ\text{C}$ ,而较低固氮活性时的平均表面温度分别为  $25.8^\circ\text{C}$  (样品含水量较高)和  $31.8^\circ\text{C}$  (样品含水量较低) (表1,表2,图2,图3)。

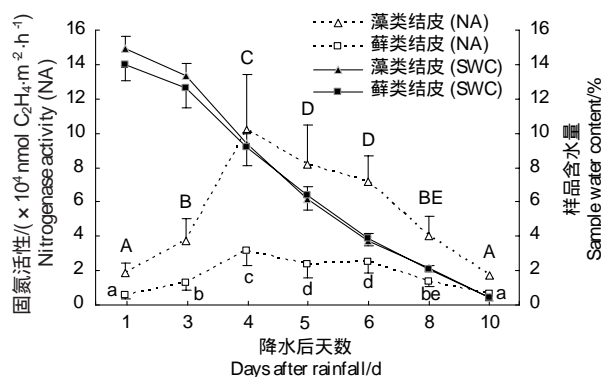


图2 实验期生物土壤结皮固氮活性 (Mean±SD) 的变化

Fig. 2 Variation of nitrogenase activity of different BSCs in experimental period

不同大写字母表示藻类结皮固氮活性在实验期差异显著,不同小写字母表示藓类结皮固氮活性在实验期差异显著 ( $P < 0.05$ )

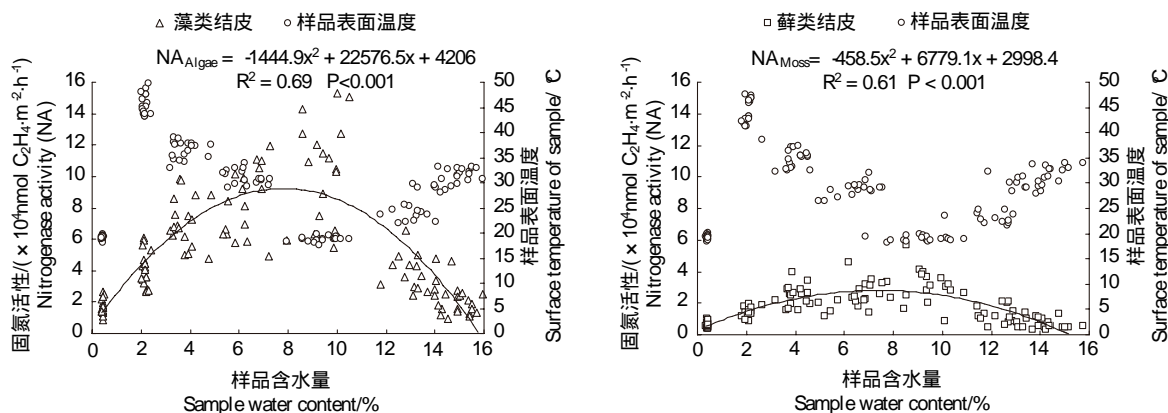


图3 生物土壤结皮固氮活性与水分含量和温度的关系

Fig. 3 The relationship between nitrogenase activity of different BSCs and samples water content and surface temperature

## 3 讨论

### 3.1 沙坡头地区藻类和藓类结皮的固氮活性

藻类和藓类结皮在沙坡头地区人工固沙植被区和天然植被区均有发育,藻类结皮处于演替早期阶段,藓类结皮则是演替的后期阶段。整个实验期藻类和藓类结皮的平均固氮活性为  $5.3 \times 10^4$  和  $0.9 \times 10^4$   $\text{nmol C}_2\text{H}_4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,藻类结皮平均固氮活性是藓类结皮的5.9倍。无论是人工植被区还是天然植被区,藻类结皮的固氮活性都显著高于藓类结皮。两类结皮之间这种固氮差异主要归因于结皮组成生物体即隐花植物的差异。Li等详细调查研究了沙坡头人工固沙植被区不同演替阶段隐花植物的种类组成及相关特征,发现人工固沙植被建

立后经过近 40a (1964 年建植) 的发展, 藻类共有 22 种, 盖度达 30%, 苔藓只有 3 种, 但其盖度却高达 75%<sup>[18]</sup>。藻结皮主要有大量的蓝藻和一些绿藻组成, 在所有 22 种藻类中, 近一半为蓝细菌, 占总数的 45.5%, 丝状蓝细菌又占蓝细菌总数的 70%。蓝细菌是一类具有原核结构而能进行光合作用的生物类群, 它们既能进行光合作用固定碳, 同时又能固定大气中的氮气合成能被生物利用的氮化物, 使得主要由蓝细菌组成的藻结皮的固氮能力远远高于藓类结皮。而藓类结皮主要组成的生物体苔藓并不具备固氮作用, 其微弱的固氮量是结皮中混生的少量蓝藻或地衣所致。在整个实验期人工植被区藻结皮平均固氮活性为  $5.7 \times 10^4$  nmol  $C_2H_4 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , 高于天然植被区的藻类结皮 ( $4.9 \times 10^4$  nmol  $C_2H_4 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ), 藓类结皮的平均固氮活性差异不大, 分别为  $0.9 \times 10^4$  和  $1.0 \times 10^4$  nmol  $C_2H_4 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ , 说明人工固沙植被建立后经过近半个世纪的演替, 生物土壤结皮的种类组成和固氮能力都已超过或接近天然植被区, 生物土壤结皮的拓殖发展改善了贫瘠的荒漠生境, 为高等植物、尤其是浅根系草本植物的定居繁衍提供了条件。

### 3.2 湿润持续时间对生物土壤结皮固氮活性的影响

生物土壤结皮固氮的关键是固氮酶, 固氮酶催化  $N_2$  的裂解, 合成可被生物体利用的铵态氮 ( $NH_4^+$ ), 这是一个需能过程<sup>[19]</sup>。而固氮作用所需的 ATP 和碳仅能由光合作用合成<sup>[20]</sup>, 由于生物土壤结皮只有在湿润的条件下才具有生理活性, 因此, 生物土壤结皮的氮固定在很大程度上取决于结皮的水分条件<sup>[11]</sup>。研究证实蓝藻的碳固定需要液态水<sup>[21]</sup>, 因此, 液态水的有效性可能最终决定着生物土壤结皮氮固定的总量。实验期两类生物土壤结皮固氮活性与样品含水量之间均呈显著的二次函数关系, 固氮活性随含水量的增加表现为先上升、后下降的趋势(图 3)。藻类和藓类结皮在样品含水量为 3.5%—10.2% 时的固氮活性显著高于高含水量 (12%—15.2%) 和低含水量时 (0.3%—2.2%) 的固氮活性。有研究指出土壤中的地木耳保持持续的水合时, 其固氮酶活性较低<sup>[22]</sup>。地衣结皮持续较高的水分含量能导致非结晶葡萄糖的大量排出, 该过程会消耗用以氮固定的能量贮存<sup>[23]</sup>, 因此长时间的高土壤水分含量一般会降低生物结皮的固氮能力。我们在野外进行的为期 5 个月的模拟降水实验也证实藻类和藓类结皮固氮活性在模拟 3 mm 降水时即可达到最大值, 超过 3 mm 的降水 (5 mm 和 10 mm) 时其固氮活性并无显著增加。来自实验室的研究表明藻类结皮水分含量在其干重的 6% 到完全浸湿区间具有固氮活性<sup>[23-24]</sup>。也有研究显示亚热带地木耳 (*Nostoc commune*) 重量含水量在 22%—126% 时具有最大的固氮活性, 而当土壤含水量为 500% 时, 来自于北方温带草原土壤的地木耳属种的固氮速率达到最大值<sup>[25]</sup>。当土壤含水达到饱和状态时, 来自于蒙古草原土壤的地木耳有最大的固氮速率<sup>[26]</sup>。室内控制实验由于影响的因子的可控性, 使得对其结果的解释相对容易, 但可能并不能客观地反映野外的实际情况。比如大量关于结皮水分含量与其固氮活性的室内实验仅考虑结皮生物体本身的水分含量, 而实际上结皮微小的生物量决定了降水事件发生后结皮生物体自身并不能贮存更多的水分, 或许结皮下浅层土壤的含水量才是影响其固氮能力的关键。

实验中我们发现一次较大的降水事件 (19 mm, 沙坡头地区以 <10 mm 的降水事件占主导) 发生后, 藻类和藓类结皮固氮活性都表现出相同的变化规律, 即降水后第 1 天, 固氮活性较低, 其后随着水分的散失, 固氮活性迅速提高, 至降水后第 4 天达到最大值, 尔后缓慢下降, 至第 6 天后, 随着样品含水量急剧下降, 其固氮活性也迅速下降, 到降水后的第 10 天, 样品含水量极低, 其固氮活性也降至最低 (图 2)。有研究显示降水事件发生后, 呼吸和光合作用几乎在蓝藻中同时立即进行, 但是在湿润与氮固定启动和达到最大固氮速率之间总有一段滞后时间<sup>[5]</sup>。而滞后时间的长短则不仅取决于结皮物种组成的差异, 还受结皮过去和现在所经历的环境条件的影响。一般而言, 结皮生物体干燥的时间越长, 复水后氮固定启动至达到最大固氮速率所需的时间就越长。有关生物结皮复水后到达最大固氮速率所需时间的研究报道差异很大, 在几个小时到 6 天之间变化<sup>[5, 21]</sup>, 由于大部分研究没有报道采样前或实验前样品所经历的环境变化, 使得对其结果的比较评价尤为困难。本次实验供试样品是在 2010 年 10 月中旬采集的, 采集后带回试验站气候观测场摆放在自然环境下, 我们认为至实验前所有样品所经历的环境条件是一致的。本次实验前所有样品共经历了 31d 的干燥期 (4 月 5 日—5 月 6 日无降水发生), 降水事件发生后其固氮速率在第 4 天达到最大值。长期的干燥导致结皮生物体

内贮存的碳被消耗,复水后光合产物和能量首先被用于碳水化合物的构建和能量的储备,或光损害的修复,其次才被用于固氮酶体系的重建<sup>[11,27]</sup>。因此,复水前干旱持续的时间越久,复水后固氮酶活性达到最高固氮速率所需的时间也越长,从而导致该时间段固氮活性的降低。

### 3.3 模拟升温对生物土壤结皮固氮活性的影响

在水分充足和光照条件下,结皮固氮活性主要受制于温度。大多数蓝藻和蓝藻地衣在-5—30℃均具有固氮活性,其固氮的理想温度在20—30℃<sup>[5,17]</sup>。为了深入了解温度对结皮固氮活性的影响,实验中我们通过不同规格的OTC来设置温度梯度,不仅考虑了实验期全天气温的变化,还特别注意了培养期温度和样品表面温度的变化。结果显示降水后结皮达到最大固氮速率时(第4天)的培养期气温为22.5℃,具有较高固氮速率时(第5、6天)的气温平均为28℃。而具有较低固氮活性时(第1、3、8、10天)的培养期气温平均为26.8℃(表1)。尽管整个实验期培养期温度都处于先前研究指出的固氮理想温度范围,但降水后第1、3、8和10天的固氮速率却远远低于第4—6天的固氮速率(图2),说明水分状况才是控制其固氮活性的关键因子。或许,正如先前所指出的,实验前样品所经历的环境状况可能最终决定着降水后结皮达到最大固氮速率所需的时间。

实验期小OTC培养期气温显著高于大OTC和CK,平均温度比CK增加了3.8℃;而样品表面温度可能受天气状况、OTC本身局部遮阴等因素的影响,并未表现出一致的变化规律,但总体看,藻结皮的表面温度要略高于藓类结皮,所有样品的平均表面温度均高于培养期气温(表1)。尽管实验期小OTC的增温效果是显著的,但不同温度处理下两类结皮的固氮活性却并未表现出一致的变化规律,这也印证了生物土壤结皮固氮活性具有较为宽泛的温度范围,短期、小幅度的增温并不能显著提高其固氮速率。总体而言小OTC温度处理下两类结皮的固氮活性都略高于大OTC和CK(表2),说明一定范围的升温有利于结皮固氮酶活性的提高。此外,增温会加速结皮土壤中水分的散失(如实验期对照处理下样品含水量都高于大OTC和小OTC)(表1),使结皮保持湿润的时间缩短,进而影响其氮固定。但如何确定结皮氮固定所需的最适水分和温度范围,可能还需要设计精细、控制严格的室内实验来进一步证实。

## 4 结论

(1)实验期藻类结皮和藓类结皮的平均固氮活性分别为 $5.3 \times 10^4$ 和 $0.9 \times 10^4$  nmol C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,藻类结皮对系统的氮贡献显著高于藓类结皮。

(2)在经历31d持续干旱,降水发生后两类生物土壤结皮固氮活性均表现为第1天较低,之后迅速增加,至第4天达到最大值,尔后缓慢下降,第6天后迅速下降,至第10天降至最低。实验前样品所经历的持续干旱时间决定了降水发生后其到达最大固氮速率的时间。

(3)实验期两类生物土壤结皮固氮活性与样品含水量之间均呈显著的二次函数关系,其固氮活性随样品含水量的增加呈先上升后下降的趋势,藻结皮的固氮活性显著高于藓类结皮。

(4)OTC装置模拟增温效果显著,但短期模拟增温并不能显著提高两类生物土壤结皮的固氮活性,增温主要通过加速结皮水分散失来影响其固氮活性。

## References:

- [ 1 ] Hungate B A, Dukes J S, Shaw M R, Luo Y Q, Field C B. Nitrogen and climate change. *Science*, 2003, 302(5650): 1512-1513.
- [ 2 ] Housman D C, Powers H H, Collins A D, Belnap J. Carbon and nitrogen fixation differ between successional stages of biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66(4): 620-634.
- [ 3 ] Whitford W G. *Ecology of Desert Systems*. San Diego: Academic Press, 2002.
- [ 4 ] Li X R, Zhang Z S, Wang X P, Liu L C, Huang L. The ecohydrology of the soil vegetation system restoration in arid zones: a review. *Journal of Desert Research*, 2009, 29(5): 845-852.
- [ 5 ] Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 241-261.
- [ 6 ] Billings S A, Schaeffer S M, Evans R D. Soil microbial activity and N availability with elevated CO<sub>2</sub> in Mojave Desert soils. *Global Biogeochemical*

- Cycles, 2004, 18; GB1011, doi:10.1029/2003GB002137.
- [ 7 ] Vitousek P M, Cassman K, Cleveland C, Crews T, Field C B, Grimm N B, Howarth R W, Marino R, Martinelli L, Rastetter E B, Sprent J I. Towards an ecological understanding of biological nitrogen fixation. *Biogeochemistry*, 2002, 57-58: 1-45.
- [ 8 ] Williams J D, Dobrowski J P, West N E. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1999, 13(2): 145-154.
- [ 9 ] Li X R, Zhang Y M, Zhao Y G. A study of biological soil crusts: recent development, trend and prospect. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(1): 11-24.
- [ 10 ] Song C J, Ma K M, Fu B J, Qu L Y, Liu Y. A review on the functions of nitrogen-fixers in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 869-877.
- [ 11 ] Nash T H III. *Lichen Biology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [ 12 ] Belnap J, Phillips S L, Miller M E. Response of desert biological soil crusts to alterations in precipitation frequency. *Oecologia*, 2004, 141(2): 106-316.
- [ 13 ] Belnap J. Nitrogen fixation in biological soil crusts from southeast Utah, USA. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(2): 128-35.
- [ 14 ] Li X R, He M Z, Zerbe S, Li X J, Liu L C. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(8): 932-940.
- [ 15 ] Feng L, Li X R, Guo Q, Zhang J G, Zhang Z S. Effects of highway on the vegetation species composition along a distance gradient from road edge in southeastern margin of Tengger Desert. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(5): 1114-1120.
- [ 16 ] Hardy R W F, Burns R C, Holsten R D. Applications of the acetylene-ethylene assay for measurement of nitrogen fixation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1973, 5(1): 59-72.
- [ 17 ] Belnap J. Soil surface disturbances in cold deserts: effects on nitrogenase activity in cyanobacterial-lichen soil crusts. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23(4): 362-367.
- [ 18 ] Li X R, Zhou H Y, Wang X P, Zhu Y G, O'Conner P J. The effects of sand stabilization and revegetation on cryptogam species diversity and soil fertility in the Tengger Desert, Northern China. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 237-245.
- [ 19 ] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vorosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [ 20 ] Honegger R. The Lichen symbiosis-what is so spectacular about it? *The Lichenologist*, 1998, 30(3): 193-212.
- [ 21 ] Belnap J, Lange O L. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 263-279.
- [ 22 ] Jones K. Interactions between desiccation and dark nitrogen fixation in tropical *Nostoc commune*. *New Phytologist*, 1989, 113(1): 1-5.
- [ 23 ] Kershaw K A. *Physiological Ecology of Lichens*. London: Cambridge University Press, 1985.
- [ 24 ] Jones K. Acetylene reduction in the dark by mats of blue-green algae in sub-tropical grassland. *Annals of Botany*, 1977, 41(4): 807-812.
- [ 25 ] Coxson D S, Kershaw K A. Rehydration response of nitrogenase activity and carbon fixation in terrestrial *Nostoc commune* from *Stipa-Bouteloua* grassland. *Canadian Journal of Botany*, 1983, 61(10): 2658-2668.
- [ 26 ] Belnap J, Ojima D, Phillips S, Barger N. Biological soil crusts of inner and outer Mongolia: impacts of grazing and precipitation on nitrogen cycles // Eldridge D J, Tongway D, King G, eds. *Proc 6th Int Rangeland Congress*. Townsville, 1999.
- [ 27 ] Dodds W K, Gudder D A, Mollenhauer D. The ecology of *Nostoc*. *Journal of Phycology*, 1995, 31(1): 2-18.

#### 参考文献:

- [ 4 ] 李新荣, 张志山, 王新平, 刘立超, 黄磊. 干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展. *中国沙漠*, 2009, 29(5): 845-852.
- [ 9 ] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望. *地球科学进展*, 2009, 24(1): 11-24.
- [ 10 ] 宋成军, 马克明, 傅伯杰, 曲来叶, 刘杨. 固氮类植物在陆地生态系统中的作用研究进展. *生态学报*, 2009, 29(2): 869-877.
- [ 15 ] 冯丽, 李新荣, 郭群, 张景光, 张志山. 腾格里沙漠东南缘公路对路域植被物种组成的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1114-1120.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 20 October, 2011 (Semimonthly)

## CONTENTS

- Community structure and diversity of macrobenthos in the intertidal zones of Yangshan Port ..... WANG Baoqiang, XUE Junzeng, ZHUANG Hua, et al (5865)
- Variation characteristics of macrobenthic communities structure in tianjin coastal region in summer ..... FENG Jianfeng, WANG Xiuming, MENG Weiqing, et al (5875)
- Analysis of habitat connectivity of the Yunnan snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus bieti*) using landscape genetics ..... XUE Yadong, LI Li, LI Diqiang, WU Gongsheng, et al (5886)
- Study on the spatial pattern of wetland bird richness and hotspots in Sanjiang Plain ..... LIU Jiping, LÜ Xianguo (5894)
- Dynamic analysis of coastal region cultivated land landscape ecological security and its driving factors in Jiangsu ..... WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang (5903)
- Landscape pattern gradient on tree canopy in the central city of Guangzhou, China ..... ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (5910)
- Research on dynamic changes of landscape structure and land use eco-security: a case study of Jiansanjiang land reclamation area ..... LIN Jia, SONG Ge, SONG Siming (5918)
- Shangri-La county ecological land use planning based on landscape security pattern ..... LI Hui, YI Na, YAO Wenjing, WANG Siqi, et al (5928)
- Changes of paddy field landscape and its influence factors in a typical town of south Jiangsu Province ..... ZHOU Rui, HU Yuanman, SU Hailong, et al (5937)
- Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China ..... HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5946)
- Characteristics and influence factors of the swamp degradation under the stress of grazing in the Zoige Plateau ..... LI Ke, YANG Yongxing, YANG Yang, et al (5956)
- Variation of organic pollution in the last twenty years in the Qinzhou bay and its potential ecological impacts ..... LAN Wenlu (5970)
- Response of radial growth Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) to climate factors in Wanxian Mountain of He'nan Province ..... PENG Jianfeng, YANG Airong, TIAN Qinhua (5977)
- Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China ..... GAO Yuan, CHEN Yufeng, DONG Heng, et al (5984)
- Effect of urban heat island on plant growth and adaptability of leaf morphology constitute ..... WANG Yating, FAN Lianlian (5992)
- Effects of shading on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of the endangered plant *Thuja sutchuenensis* ..... LIU Jianfeng, YANG Wenjuan, JIANG Zeping, et al (5999)
- Effects of shading on growth and quality of triennial *Clematis manshurica* Rupr. .... HAN Zhongming, ZHAO Shujie, LIU Cuijing, et al (6005)
- Allelopathic effect of extracts from *Artemisia sacrorum* leaf and stem on four dominant plants of enclosed grassland on Yunwu Mountain ..... WANG Hui, XIE Yongsheng, YANG Yali, et al (6013)
- Effects of soil base cation composition on plant distribution and diversity in coastal wetlands of Hangzhou Bay, East China ..... WU Tonggui, WU Ming, YU Mukui, et al (6022)
- Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi of *Stipa* L. in alpine grassland in northern Tibet in China ..... CAI Xiaobu, PENG Yuelin, YANG Minna, et al (6029)
- Water consumption and annual variation of transpiration in mature *Acacia mangium* Plantation ..... ZHAO Ping, ZOU Lvliu, RAO Xingquan, et al (6038)
- Foliar phenotypic plasticity of a warm-temperate shrub, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, to different light environments in the field ..... DU Ning, ZHANG Xiuru, WANG Wei, et al (6049)

An case study on vegetation stability in sandy desertification land; determination and comparison of the resilience among communities after a short period of extremely aridity disturbanc .....	ZHANG Jiyi, ZHAO Halin (6060)
Response of soil quality indicators to comprehensive amelioration measures in coastal salt-affected land .....	SHAN Qihua, ZHANG Jianfeng, RUAN Weijian, et al (6072)
Fine-scale spatial associations of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Stellera chamaejasme</i> population in alpine degraded grassland .....	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6080)
The response of community-weighted mean plant functional traits to environmental gradients in Yanhe river catchment .....	GONG Shihui, WEN Zhongming, SHI Yu (6088)
Ozone stress increases lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu; a FACE study .....	WANG Yunxia, WANG Xiaoying, YANG Lianxin, et al (6098)
Effect of sugarcane//soybean intercropping and reduced nitrogen rates on sugarcane yield, plant and soil nitrogen .....	YANG Wenting, LI Zhixian, SHU Lei, et al (6108)
Effect of wetting duration on nitrogen fixation of biological soil crusts in Shapotou, Northern China .....	ZHANG Peng, LI Xinrong, HU Yigang, et al (6116)
Effects of zinc on the fruits' quality of two eggplant varieties .....	WANG Xiaojing, WANG Huimin, WANG Fei, et al (6125)
Rapid light-response curves of PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of <i>Salix leucopithecia</i> subjected to cadmium-ion stress .....	QIAN Yongqiang, ZHOU Xiaoxing, HAN Lei, et al (6134)
Physiological Response of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. to Lead Stress by FTIR Spectroscopy .....	XUE Shengguo, ZHU Feng, YE Sheng, et al (6143)
Physiological response of <i>Zoysia japonica</i> to Cd <sup>2+</sup> .....	LIU Junxiang, SUN Zhenyuan, JU Guansheng, et al (6149)
Biosorption of Cd <sup>2+</sup> using the fruiting bodies of two macrofungi .....	LI Weihuan, MENG Kai, LI Junfei, et al (6157)
Factors regulating recruitment of <i>Microcystis</i> from the sediments of the eutrophic Shanzai Reservoir .....	SU Yuping, LIN Hui, ZHONG Houzhang, et al (6167)
A new type of insect trap and its trapping effect on <i>Cyrtotrachelus buqueti</i> .....	YANG Yaojun, LIU Chao, WANG Shufang, et al (6174)
Photoperiod influences diapause induction of Oriental Fruit Moth(Lepidoptera: Tortricidae) .....	HE Chao, MENG Quanke, HUA Lei, et al (6180)
Influence of edge effects on arthropods communities in agroforestry ecological systems .....	WANG Yang, WANG Gang, DU Yingqi, et al (6186)
Dynamics of land use and its ecosystem services in China's megacities .....	CHENG Lin, LI Feng, DENG Huafeng (6194)
Comprehensive assessment of urban ecological risks; the case of Huaibei City .....	CHANG Hsiaoifei, WANG Rusong, LI Zhengguo, et al (6204)
The dynamics of surface heat status of Tangshan City in 1993—2009 .....	JIA Baoquan, QIU Erfa, CAI Chunju (6215)
A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan .....	WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al (6224)
Research on ecological barrier to Chang-Zhu-Tan metropolitan area .....	XIA Benan, WANG Fusheng, HOU Fangzhou (6231)
Optimization of urban land structure based on ecological green equivalent; a case study in Ningguo City, China .....	ZHAO Dan, LI Feng, WANG Rusong (6242)
Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model; a case study of Gansu Province, China .....	ZHANG Bo, LIU Xiuli (6251)
<b>Review and Monograph</b>	
A prospect for study on isolated wetland .....	TIAN Xuezhi, LIU Jiping (6261)
Dinoflagellate heterotrophy .....	SUN Jun, GUO Shujin (6270)
Research progress of microbial agents in ecological engineering .....	WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al (6287)
The progress of ecological civilization construction and its indicator system in China .....	BAI Yang, HUANG Yuchi, WANG Min, et al (6295)

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

## 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 20 期 (2011 年 10 月)

## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 20 2011

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

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

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail:journal@espg.net

**订 购** 全国各地邮局  
**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

**广告经营**  
**许 可 证** 京海工商广字第 8013 号

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

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

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

**Distributed** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@espg.net

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元