

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.06.013

# 不同水分条件下苔藓结皮光合能力对氮素添加量的响应

闫佳毅, 张宇清, 秦树高, 吴斌, 冯薇, 邵晨曦, 法科宇

(北京林业大学 水土保持学院 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083)

**摘要:** [目的] 探究苔藓结皮失水过程中光合能力对不同梯度氮添加的响应, 为进一步研究苔藓结皮对氮沉降的响应过程以及为干旱、半干旱区荒漠生态系统的管理提供理论依据。[方法] 选取毛乌素沙地的优势藓种拟双色真藓 (*Bryum pachytheca*) 为研究对象, 在控制条件下采用氮添加的模拟试验手段。[结果] 苔藓结皮净光合速率在低于  $0.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的氮添加量时受到促进, 在高于  $0.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的氮素添加量下, 低水分含量时被抑制, 高水分含量时会受促进; 同时,  $0.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  是苔藓结皮能承受的最优氮添加量, 此时苔藓结皮的光合固碳能力达到最大, 年光合固碳量为对照条件的 2 倍。[结论] 氮沉降引起的氮素增加对于干旱、半干旱区苔藓结皮的光合能力以及固碳潜力具有显著的影响。

**关键词:** 苔藓结皮; 氮沉降; 失水过程; 光合作用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0075-06

中图分类号: S728.1

## Responses of Bryophytes' Photosynthesis to Nitrogen Addition Under Different Water Content

YAN Jiayi, ZHANG Yuqing, QIN Shugao, WU Bin, FENG Wei, SHAO Chenxi, FA Keyu

(Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] The responses of bryophytes' photosynthesis to nitrogen addition in the process of its dehydration were studied in order to demonstrate how it will respond to nitrogen deposition and to provide relevant theoretical knowledge for management of desert ecosystems in arid or semi-arid region. [Methods] The dominant bryophytes, *Bryum pachytheca* in Mu Us desert was selected to examine the responses of bryophytes' photosynthesis to nitrogen addition with eight levels. [Results] The net photosynthetic rates of bryophytes ( $P_n$ ) increased when nitrogen addition was less than  $0.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . When nitrogen addition was over  $0.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , the responses of  $P_n$  varied under different water condition. It was enhanced under high levels of water content, and was suppressed under low levels. In terms of bryophytes' photosynthetic carbon sequestration capacity in tested site, the optimal adding amount of nitrogen was  $0.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ . At this addition amount, carbon fixed by bryophytes' photosynthesis was doubled as compared with that without adding nitrogen. [Conclusion] Nitrogen increment from deposition can strongly influence photosynthesis and carbon sequestration capacity of bryophytes in arid and semi-arid regions.

**Keywords:** bryophytes; nitrogen deposition; dehydration; photosynthesis

生态系统中可获取的氮素与大气氮固定及微生物的矿化作用等一系列生物过程密切相关<sup>[1]</sup>。全球陆地生态系统氮沉降总量每年至少高达  $43.47 \text{ Tg}$  ( $1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$ )<sup>[2]</sup>, 且随着人类活动的加剧, 未来氮沉降可能还会持续增加<sup>[3]</sup>。氮沉降导致的氮富集在不同地区和不同阶段对于生态系统水平上的影响相差很大, 主要包括植被生长变化, 植被健康水平降低, 生物多样性减少, 土壤性状变化, 生态功能变化, 生态系统

稳定性降低, 生态系统退化等<sup>[1,4]</sup>。因此, 了解氮素对不同生态系统的影响过程, 是在全球变化背景下, 预判生态系统演替方向, 并采取科学管理措施的前提。

干旱、半干旱区土地占全球陆地表面的  $1/3$  以上<sup>[5]</sup>, 由于受到非生物因子(温度、水分等)的调控和胁迫, 大多数荒漠生态系统的土壤无法支撑面积广泛、相对均一旦连续分布的维管束植物群落的生长,

收稿日期: 2014-03-20

修回日期: 2014-03-29

资助项目: “十二五”科技支撑计划项目“荒漠化地区退化土地治理与植被保育技术集成与示范”(2012BAD16 B02)

第一作者: 闫佳毅(1987—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: jiajia\_726@126.com。

通信作者: 秦树高(1983—), 男(汉族), 山西省晋城市人, 博士, 讲师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: qinshugao204@163.com。

生物结皮(隐花植物,由生长在土壤表面和土壤表面以下的藻类、地衣、藓类、真菌和细菌等小生物体与土壤颗粒相互粘结、捆绑形成的一层垫状、薄层的复合体<sup>[6]</sup>)便成为荒漠生态系统土地上普遍分布的植物,其分布面积在荒漠地区可占地表面积的 70%,甚至更高<sup>[7]</sup>。近些年越来越多的研究表明,在干旱、半干旱区荒漠生态系统地表覆盖的生物结皮充分利用微少的降水(或露水)进行光合作用<sup>[8]</sup>,所固定大气中的碳是荒漠生态系统净初级生产力的重要组成部分<sup>[9]</sup>。例如在内盖夫沙漠(Negev Desert),盖度为 20%的生物结皮的最大光合固碳量可与该地区的显花植物相当<sup>[10]</sup>。因此生物结皮光合能力微小的改变,对所处的荒漠生态系统的影响可能是巨大的。然而,对于氮沉降对生物结皮光合作用的影响,目前的了解还非常不充分。大量在北半球森林、草地生态系统的研究<sup>[1]</sup>表明,生物结皮作为重要的林下组分,对大气中的氮素的变化非常敏感,光合固碳能力深受氮素变化的影响。例如针对欧洲高山灌丛的研究说明,地衣<sup>[11]</sup>与苔藓<sup>[12]</sup>对氮沉降增加均表现为多度、光合能力迅速下降。为了更好地管理和调控生态系统服务功能,有些地区已明确提出了其典型植被对氮沉降的载荷阈值<sup>[13-14]</sup>。然而,对于荒漠生态系统,氮素对生物结皮光合作用影响的研究十分稀少,相关的研究<sup>[15-16]</sup>也主要集中在荒漠生态系统中生物结皮固氮方面,因此要提出荒漠生态系统的氮载荷阈值,进而合理的管理和调控其生态系统服务功能是很难实现的。Bates 等<sup>[17]</sup>通过大量气候变化模型预测,中国干旱、半干旱区未来的降雨量将会增加 10%~20%,并随着人类活动的持续加剧,干旱、半干旱区氮沉降量亦会明显增加。微小的氮沉降变化可能会对生物结皮的光合能力产生巨大的影响,进而影响荒漠生态系统固碳潜力、甚至植被自然修复与景观格局。所以研究干旱、半干旱区生物结皮的光合能力对氮沉降增加的响应变得极为迫切。为了探索并了解氮沉降增加对荒漠生态系统生物结皮光合能力的影响,本研究选取在干旱、半干旱区分布最广泛的苔藓结皮为研究对象,

采用模拟氮添加的试验方法,分析在不同梯度氮添加下,苔藓结皮在失水过程中净光合速率以及其光合固碳量的变化。研究结果有助于了解苔藓结皮对氮沉降的响应过程,也可为干旱、半干旱区荒漠生态系统的管理提供相关的理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地西南缘宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站区,地理坐标为北纬 37°04′—38°10′,东经 106°30′—107°41′,海拔约为 1 530 m,属于典型中温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 287 mm,主要集中在夏秋两季,7—9 月合计占全年总降水量的 62%。潜在年蒸发量为 2 100~2 500 mm,年太阳辐射值为  $1.4 \times 10^5$  J/cm<sup>2</sup>, $\geq 10$  °C 的积温为 2 944.9 °C,年平均气温 7.6 °C。土壤以风沙土为主,pH 值 8.5~8.8。该研究区的植被类型以油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙柳(*Salix psammophila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)以及杨柴(*Hedysarum mongolicum*)等沙生、旱生植物群落为主。研究区地表分布有发育良好的生物土壤结皮,由于水分条件、生物种类和发育阶段的不同而呈现出浅绿色、黑色、黑褐色和黄绿色等。其中油蒿林地中广泛分布着苔藓结皮,具有很强的代表性。

### 1.2 样品采集及鉴定

2013 年 6 月,在宁夏盐池荒漠生态系统定位研究站选择地势平坦、苔藓结皮广泛分布且长势良好的油蒿林地作为试验样地(样地的基本情况详见表 1)。选取样地内植被间隙分布完整的苔藓结皮为试验对象(在植被周围 1 m 范围以外采样,以减少植被对其影响),用培养皿(直径 9 cm,高 2 cm)随机采集盖度 >70%的苔藓结皮样品 32 份。为了保证苔藓结皮样品完整性,取样前需要湿润地表。将样品带回实验室,在培养箱(PRX-250 A)内培养并进行物种鉴定,以保证属同种结皮。

表 1 样地基本情况

结皮类型	样地位置	优势植物种	结皮优势种	结皮厚度/mm	结皮容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
苔藓结皮	丘间地	油蒿	拟双色真藓	18.8±2.7	1.70±0.45

采用解剖镜(Opton west Germany 475200-9901 型体视显微镜)直接观测的方法鉴定苔藓<sup>[18]</sup>。具体方法是用镊子取晾干的苔藓几株,在培养皿中用水泡开,待到叶片舒展时,放到解剖镜下,依照《中国苔藓志第四卷真藓目》鉴定到种。由于苔藓个体较大,鉴

定物种之后,直接数出它们在 9 cm 直径培养皿中的个体数,将大于 5 个/cm<sup>2</sup> 结皮的苔藓定为优势种。

### 1.3 氮添加试验

试验设置 8 个氮添加浓度梯度:0.1,0.2,0.3,0.6,1.0,1.5,2.5 及 0 g/(m<sup>2</sup>·a)(其中 0 为空白对

照)。实验室内用  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  白色晶体粉末与去离子水配置  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶液用于氮素添加处理,配置方法为:使用 1/10 000 分析天平(Mettler Toledo ME104)分别称取不同浓度需求的  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  晶体粉末的量于 8 只烧杯中,再分别加入对应浓度  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶液所需的去离子水,并全部震荡至粉末溶解。最后分别从烧杯中移出 5 ml 溶液至 5 ml 容量的小型喷雾器。上述 8 个处理下,每种处理设 4 个重复(即每 4 个样品分为一组,共 8 组)。采集的苔藓结皮样品在 2013 年 6 月至 9 月期间进行培养(光照为  $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,温度为  $22^\circ\text{C}$ )。培养期间,每隔 7 d 对每组样品分别进行相应的施氮处理:采用 5 ml 容量小型喷雾器将  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶液尽可能均匀的喷洒至样品,每次每个样品喷施 5 ml。每次施氮前按上述步骤重新配置  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶液。最后 1 次施氮处理 1 d 后,对测量的结皮样品喷洒去离子水至水分含量饱和后开始观测其净光合速率。

#### 1.4 苔藓结皮失水过程光合值、含水量测定及降雨量观测

试验仪器采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(Li-COR, Inc, USA)连接拟南芥叶室(Li-6400-17),使用 RGB-Li-6400-18 光源,光照强度为  $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,叶室  $\text{CO}_2$  浓度设置为  $400\ \mu\text{mol}/\text{mol}$ ,空气相对湿度为  $50\% \sim 70\%$ ,叶室温度控制在  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。将经过不同浓度氮处理并培养后的苔藓结皮喷去离子水至饱和状态,放入小圆托盘中(内径 5.9 cm、高 1 cm,保证样品填满托盘),打开光源,用  $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  光强照射样品,测定样品净光合速率  $P_n$  ( $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),当瞬时  $P_n$  稳定到小数点后一位时开始记录(15 s 记数 1 次,持续 1 min),记录结束,将结皮取出,称其湿重,然后将结皮放回叶室,1 h 后继续测定  $P_n$ ,直至  $P_n$  为  $0\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  为止,光合作用试验结束,取出样品。试验结束后将样品置于  $105^\circ\text{C}$  烘箱中 24 h,之后称量干重,每次测定中样品的含水量为:

$$W_c = (W_w - W_d) / S \times 100\% \quad (1)$$

式中: $W_c$ ——样品含水量(mm);  $W_w$ ——样品湿重(g);  $W_d$ ——样品干重(g);  $S$ ——样品面积( $\text{cm}^2$ )。

测定过程中大气  $\text{CO}_2$  浓度为  $(370 \pm 10)\text{mg}/\text{kg}$ ,叶室相对湿度(RH)为  $(65 \pm 5)\%$ 。为探寻苔藓结皮因自然降雨导致的光合固碳量对氮沉降变化的响应,采用翻斗式雨量计(TE525 MM, Campbell, USA)记录研究区样地全年降雨量。其中,观测到全年有效降雨 53 场,大于 3.5 mm 的降雨有 25 场。

#### 1.5 数据处理

利用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同浓度氮素添加处理下苔藓结皮的降雨拟合光合固碳速率进行差异显著性分析。采用 Quadratic Polynomial<sup>[19]</sup>对失水过程光合值进行二次拟合。试验数据统计分析均采用 SPSS(V18.0)软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 苔藓结皮物种鉴定结果

经鉴定所研究苔藓结皮为拟双色真藓(*Bryum pachytheca*),隶属真藓目,真藓亚目,真藓科,真藓属,为较耐旱藓类<sup>[18]</sup>。苔藓个体发育较成熟,出现较多个体附着在土壤表面,基部与土壤结合紧密。藓体呈深绿色,茎高约 5 mm,叶腋常伴有具叶原基的无性芽孢。本种近同于双色真藓(*Bryum dichotomum*),区别点在于本种无性芽孢为卵球形,上部无叶原基,孢囊台部通常成熟后具褶皱,无芽孢时难于辨认。叶干时紧贴而不扭曲,湿时直立展开,长圆状披针形,渐尖。基部无下延,兜状。边缘平展。上部全缘具细齿,下部微外弯。叶中部稍厚。雌雄异株。

### 2.2 不同浓度梯度氮添加对苔藓结皮失水过程中净光合速率的影响

由图 1 可以看出,除了 1.5 与  $2.5\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理外,在其他氮添加处理下苔藓结皮净光合速率都表现出随着水分散失先增大后减小的趋势。在 0.1 与  $0.2\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理下,苔藓结皮净光合速率在整个失水过程中都受到促进,在 0.3 与  $0.6\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理下,苔藓结皮的净光合速率随着水分含量的自然流失出现先受促进后被抑制的显著变化,在 1.0, 1.5,  $2.5\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理下,其净光合速率在整个失水过程中相对于对照组都受到抑制,其中 1.5,  $2.5\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  处理下,结皮净光合速率在整个失水过程中已没有明显的变化,始终接近于零值。

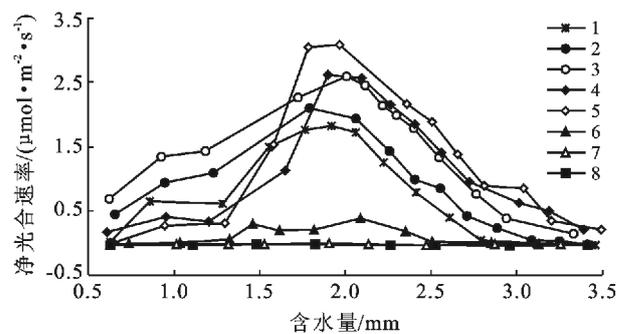


图 1 自然失水过程中苔藓结皮净光合速率对不同氮素浓度的响应

注:1—8 分别表示 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.6, 1.0, 1.5,  $2.5\ \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  这 8 个氮添加浓度梯度。下同。

对失水过程中的苔藓结皮净光合速率曲线进行二次函数拟合,结果显示,在低浓度氮[0.1 g/(m<sup>2</sup>·a)]处理时,苔藓结皮的水分最适点和水分补偿点都较对照有所降低;而在 0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)处理下,其水分最适点虽仍小于对照组,但水分补偿点却明显升高(升高 0.17 mm);大于 0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)的氮素处理,会导致苔藓结皮水分补偿点与水分最适点均明显升高(表 2),说明

在较低水分条件下,微量添加氮素可能会对荒漠生态系统苔藓结皮应对干旱胁迫具有一定的生理补偿作用。这种补偿作用可能是由营养和水分之间存在互补机制,即一种因子量上的不足可以通过另一种因子量的增加来获得相似的生理效应所导致的<sup>[20]</sup>。在荒漠生态系统中维管束植物光合作用对水分与氮素响应的研究中,也发现了相似的补偿机制<sup>[13]</sup>。

表 2 不同氮添加量下苔藓结皮自然失水过程净光合速率拟合值

拟合方程	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	RMSE	氮添加浓度/ (g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	最适水分 点/mm	最大净光合速率/ (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	水分补偿 点/mm
$y=ax^2+bx+c$	-0.76	2.82	-1.29	0.68	0.45	0	1.85	1.34	0.32
	-0.76	2.70	-0.91	0.78	0.36	0.1	1.78	1.51	0.23
	-1.10	4.00	-1.42	0.86	0.33	0.2	1.81	1.89	0.49
	-1.06	4.36	-2.58	0.71	0.52	0.3	2.05	2.14	0.81
	-1.23	5.12	-3.20	0.68	0.65	0.6	2.08	2.20	1.16
	-0.20	0.77	-0.51	0.59	0.10	1.0	1.93	0.23	1.17
	-0.002	0.007	-0.03	0.05	0.01	1.5			
	-0.002	0.007	-0.04	0.15	0.01	2.5			

注:*y*为光合速率,*x*为结皮含水量,*a*,*b*和*c*为回归参数;*R*<sup>2</sup>为决定系数;RMSE为均方根误差。

值得注意的是,本研究所设置的 8 个氮素添加处理中,0.6 g/(m<sup>2</sup>·a)处理时,苔藓结皮的净光合速率在失水过程中最快出现了最大值。这可能是由于在苔藓结皮启动光合作用后,氮素的添加(至少不大于 1.0 g/(m<sup>2</sup>·a))会迅速刺激其叶绿素等蛋白质的含量与活性来迅速积累光合产物,类似于一些旱生维管束植物会因周围环境氮素增加而迅速增加叶片中的叶绿素与光合酶等的含量与活性<sup>[21]</sup>。然而随着水分继续流失,其净光合速率迅速的下降,减小的速度也大于相邻的氮添加组(0.3 g/(m<sup>2</sup>·a))与对照组。可能是由于苔藓结皮对较高氮素的响应需要充足的水分所致,即从最适含水量到水分饱和点的水分含量对于苔藓结皮响应氮素增加是充足的,而随着水分的流失,苔藓结皮含水量已不再充足,所以其净光合速率迅速下降。当氮添加浓度更大时(1.0, 1.5, 2.5 g/(m<sup>2</sup>·a)),苔藓结皮净光合速率在整个失水过程中都很低,似乎正验证了高氮素添加需要高含水量的补偿这一推测。

### 2.3 不同浓度梯度氮添加对苔藓结皮光合固碳量的影响

根据全年实测降雨量与不同氮添加量下苔藓结皮净光合速率拟合方程(表 2),推算得出在不同氮添加处理下,苔藓结皮自然失水过程中的光合固碳速率变化如图 2 所示(设定将降雨量大于苔藓结皮饱和含水量 3.5 mm 的降雨当做 3.5 mm 处理)。苔藓结皮对自然降雨的响应大部分表现为光合固碳,只有当生

理活动启动但降雨量未达到光合水分补偿点的情况下(0.1~1.1 mm)表现为呼吸排碳。这一现象与 Feng 等<sup>[22]</sup>在毛乌素沙地研究发现的生物结皮的光合水分补偿点高于呼吸水分补偿点一致。根据上述拟合值,苔藓结皮累积固碳量如图 3 所示。从全年尺度上看,氮素添加在不高于 0.6 g/(m<sup>2</sup>·a)时,自然状态下苔藓结皮光合固碳量均会受到不同程度的促进;0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)氮素添加水平为苔藓结皮生理活动的最适氮素需求,当高于该添加量时[0.3 和 0.6 g/(m<sup>2</sup>·a)],自然状态下苔藓结皮光合固碳量促进作用已经不显著[0~0.3 g/(m<sup>2</sup>·a)氮素添加: $F=0.306$ ,  $d_f=1$ ,  $p=0.582$ ;0~0.6 g/(m<sup>2</sup>·a)氮素添加: $F=0.178$ ,  $d_f=1$ ,  $p=0.674$ ]。

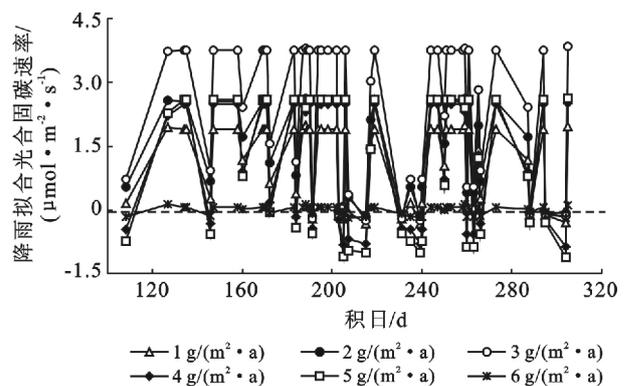


图 2 次降雨后,不同氮素添加浓度下苔藓结皮光合固碳速率估算值

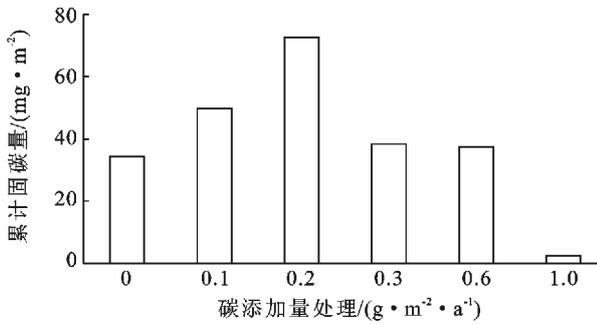


图 3 不同浓度氮素添加下累积拟合苔藓结皮光合固碳量

自然状态下〔氮素添加为 0 g/(m<sup>2</sup>·a)〕,苔藓结皮野外独立失水过程平均时间约 12 h<sup>[22]</sup>。与试验中对照条件〔0 g/(m<sup>2</sup>·a)〕下所观测的失水时间(13 h)接近(表 3)。因此根据所实测的失水时间,推算对照条件下,苔藓结皮 2013 年光合固碳量为 34.5 g/m<sup>2</sup>,而最适氮素浓度〔0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)〕添加下的年光合固碳量约为对照的 2 倍(图 3)。这一最适氮素添加量较为接近中国西北部荒漠生态系统自然条件氮沉降量<sup>[23]</sup>,说明就目前的干旱、半干旱区氮沉降对于当地植物需求已经较大,虽没有达到最适需求,但因过度人为活动等引起的快速持续的氮沉降增加可能很快会导致本就脆弱的荒漠生态系统的退化,因为过量的氮素添加使苔藓结皮年光合固碳值明显减少,例如当氮素添加为 1.0 g/(m<sup>2</sup>·a)时,苔藓结皮年光合固碳值仅约为对照的 7%(图 3)。Elbert 等<sup>[24]</sup>估算全球生物结皮年固碳量约为 3.6 Pg/a,其中处于干旱、半干旱区生物结皮的年固碳量约为 1 Pg/a。如果未来这些区域的氮沉降能够少量增加,这些区域的生物结皮光合固碳量会有显著的提高,这也可能是荒漠生态系统生物土壤结皮对气候变化的反馈作用之一。然而我们对不同浓度氮添加条件下,苔藓结皮光合固碳总量的估算可能稍微高估,因为不同浓度氮添加条件下,苔藓结皮失水过程的观测是在实验室条件下进行的,观测耗时与野外条件下相比较长,由于野外土壤蒸发等因素,耗时可能会更短,更准确地观测研究仍亟待进行。

表 3 不同浓度氮素处理下苔藓结皮失水过程耗时

氮素添加梯度/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	苔藓结皮失水过程耗时/h
0	13
0.1	13
0.2	13
0.3	13
0.6	13
1.0	11

### 3 结论

水分和氮素对苔藓结皮光合作用在一定条件下具有一定的生理补偿调节作用,在本研究区低于 0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)的氮素添加量会促进苔藓结皮净光合速率;在高于 0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)的氮素添加量下,苔藓结皮净光合速率在低水分含量时受到抑制,在高水分含量时会得到促进;而在最优含水量时,低于 0.6 g/(m<sup>2</sup>·a)的氮素添加都会使苔藓结皮净光合速率升高。另外,0.2 g/(m<sup>2</sup>·a)是苔藓结皮能承受的最优氮素添加量,与其他浓度相比,此时苔藓结皮的光合固碳能力最强。

#### [参 考 文 献]

- [1] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1):30-59.
- [2] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets[J]. *Biogeochemistry*, 1999,46(1):7-43.
- [3] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecological applications*, 1997,7(3):737-750.
- [4] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004,70(2):153-226.
- [5] Emanuel W R, Shugart H H, Stevenson M P. Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes [J]. *Climatic Change*, 1985, 7(1): 29-43.
- [6] 李守中,肖洪浪,罗芳,等. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J]. *中国沙漠*,2005,25(2): 228-233.
- [7] Li Xinrong, Zhang Zhishan, Wang Xiaoping, et al. The ecohydrology of the soil-vegetation system restoration in arid zones: A review[J]. *Journal of Desert Research*, 2009,29(5):845-852.
- [8] Lange O L. Photosynthesis of Soil-crust Biota as Dependent on Environmental Factors[M]// *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2003:217-240.
- [9] Evans R D, Lange O L. Biological Soil Crusts and Ecosystem Nitrogen and Carbon Dynamics[M]// *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2003:263-279.
- [10] Lange O L, Kidron G J, Budel B, et al. Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the

- biological soil crusts' covering sand dunes in the western Negev Desert[J]. *Functional Ecology*, 1992, 13(6):519-527.
- [11] Britton A J, Fisher J M. Interactive effects of nitrogen deposition, fire and grazing on diversity and composition of low-alpine prostrate *Calluna vulgaris* heathland[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(1):125-135.
- [12] Mäkipää R, Heikkinen J. Large-scale changes in abundance of terricolous bryophytes and macrolichens in Finland[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(4):497-508.
- [13] 周晓兵, 张元明, 王莎莎, 等. 模拟氮沉降和干旱对荒漠尔盆地两种一年生荒漠植物生长和光合生理的影响[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(12):1394-1403.
- [14] Su Jie, Li Xinrong, Li Xiaojun, et al. Effects of additional N on herbaceous species of desertified steppe in arid regions of China: A four-year field study[J]. *Ecological research*, 2013, 28(1):21-28.
- [15] 明姣, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮固氮活性及对水热因子的响应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7):1849-1855.
- [16] Zaady E, Groffman P, Shachak M. Nitrogen fixation in macro- and microphytic patches in the Negev desert[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(4):449-454.
- [17] Bates B C, Kundzewicz Z W, Wu S, et al. *Climate Change and Water*[C]. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Secretariat: Geneva, Switzerland, 2008.
- [18] 黎兴江. 中国苔藓志: 第四卷·真藓目[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 甲荣亮. 腾格里沙漠人工植被区苔藓类结皮光和生理生态学研[D]. 甘肃 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2009.
- [20] 吴福忠, 包维楷, 吴宁. 外源施 N 对干旱河谷白刺花 (*Sophora davidii*) 幼苗生长、生物量及 C, N, P 积累与分配的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(8):3817-3824.
- [21] Andrews M, Sprent J I, Raven J A, et al. Relationships between shoot to root ratio, growth and leaf soluble protein concentration of *Pisum sativum*, *Phaseolus vulgaris* and *Triticum aestivum* under different nutrient deficiencies[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22(8):949-958.
- [22] Feng Wei, Zhang Yuqing, Wu Bing, et al. Influence of environmental factors on carbon dioxide exchange in biological soil crusts in desert areas[J]. *Arid Land Research and Management*, 2014, 28(2):186-196.
- [23] 张颖. 中国不同区域大气氮沉降的监测及华北大气氮沉降的模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- [24] Lange O L, Kidron G J, Budel B, et al. Taxonomic composition and photosynthetic characteristics of the 'biological soil crusts' covering sand dunes in the Western Negev Desert[J]. *Functional Ecology*, 1992, 6(5):519-527.

(上接第 74 页)

- [17] 姜灿烂, 何园球, 刘晓丽, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4):715-722.
- [18] 李江涛, 钟晓兰, 赵其国. 耕作和施肥扰动下土壤团聚体稳定性影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6):2354-2359.
- [19] Pikul J L, Chilom J G, Rice J, et al. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(1):197-206.
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(2):1367-1377.
- [21] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3):759-768.
- [22] Alagoz Z, Yilmaz E. Effects of different sources of organic matter on soil aggregate formation and stability: A laboratory study on a Lithic Rhodoxeralf from Turkey[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2):419-429.
- [23] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2):412-418.
- [24] 闫靖华, 张风华, 谭斌, 等. 不同恢复年限对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6):1183-1190.