



降水模式变化和添加海藻肥对植物性状和生物土壤结皮的影响

袁慕田¹ & 肖慧洁¹ & 王若水¹ & 段远军¹ & 曹启琦¹

收到: 2019年1月26日/修订并接受: 2019年5月27日

#施普林格自然BV 2019

摘要

在干旱地区, 降水模式和土壤养分决定了植物的生存。为了研究不同降雨间隔下肥料添加对植物性状和生物土壤结皮的影响, 我们从中国毛乌素沙漠的一个自然群落中收集并播种了三种典型的沙生植物的种子, 并在盆中培育了幼苗。在生长季节, 我们向盆中添加了商业海藻肥料, 并以不同的间隔灌溉植物。经过一个生长季节后, 我们测量了植物的性状和生物结皮的生物量以及土壤养分含量。海藻肥料增加了生物量的生产。海藻肥料和降雨间隔的综合效应与该物种的生活史属性有关。对于给定的肥料添加量, 将降雨间隔从3天更改为15天会增加西米草和Ac草的生物量, 但减少甘草的生物量。海藻肥料显著影响植物性状, 但降雨间隔对植物性状的影响并不显著。施肥增加了土壤有机碳和总氮。肥料的添加还促进了生物土壤结皮, 并丰富了它们的总氮含量。结构方程模型表明, 生物结皮中有机碳, 总氮和叶绿素a的含量在这三个物种的生物量生产中起着不同的作用。土壤碳和氮对生物土壤结皮的影响大于对植物生物量生产的影响。我们的结果表明, 紫菜肥料可以促进植物生长和生物结皮的发育, 使其在干旱和半干旱地区的生态系统恢复中很有用。

生物量生产·植物性状·生物土壤结皮·土壤有机碳·土壤总氮·结构方程模型

介绍

干旱和半干旱地区占地球表面的三分之一以上, 并且在气候变化和人类活动的共同影响下正在迅速扩大 (Liu等人, 2006)。2016c)。在干旱和半干旱地区, 由于恶劣的非生物条件, 例如低土壤水分, 养分和有机碳含量, 土地退化是对人类生存和生物多样性的主要威胁 (Sun et al. 2016)。其中一些不利条件是全球气候变化引起的 (van der Molen et al. 2011)。

全球气候模型预测更大的气候变化和更频繁的极端事件 (例如干旱, 暴风雨, 高温)

未来) (Dong等2011)。降水模式的变化以及地表温度的升高将直接影响植物的需水量和用水量 (纳普和史密斯2001), 而其他全球变化驱动因素 (例如CO₂和N水平的增加) 将具有间接影响 (Shaw等。2002)。不断变化的降水模式将加剧干旱的严重程度和频率, 对生态系统的结构和功能产生深远的影响 (Jongen等人。2011; Biederman等。2016)。高度干旱的降水系统是干旱地区的特征 (Heisler-White et al. 2008) 降水事件占主导地位, 但规模较小, 但通常间隔相对较短。例如, 在科罗拉多州东北部, 日降水量的65%

事件小于5毫米 (Sala等1992) 的90% 时间间隔少于15天 (Wythers等人, 1999)。

频繁但小事件的这种历史降水模式与预测的全球气候变化情景有很大不同, 后者强调了向具有较长干间隔的较大事件的转变 (Groisman等。1999; Heisler-White等。2008)。

肖慧洁

soilandwater2006@hotmail.com

¹ 北京林业大学水土保持学院盐池研究站, 北京清华东路35号, 北京100083

即使给定系统的总降水量输入保持不变,降水事件分布的预测变化(季节内或季节之间)也会影响可用于植物吸收和生物地球化学过程的土壤水的时间和数量(Weltzin等,2003).先前的研究表明,降水模式的变化可能对物种性状,特别是对生物量的产生具有完全不同的影响。例如,在奇瓦瓦沙漠中,三种优势物种对年降水量和降水模式变化的响应差异很大(Robertson et al.,2009):对于灌木*Dasyliirion leiophyllum*,在频繁发生较大降雨事件时生物量产量最高,而仙人掌*Opuntia phaeacantha*在降雨较小事件和干旱间隔短时生产力最高。同样,内蒙古草原的两种优势种对季节性降水机制的变化表现出不同的反应。随着降雨时间间隔的增加,羊草的生物量产量显著下降,而大针茅没有受到影响(Liu et al.,2012)。

除了干旱和半干旱生态系统中的水分限制外,养分也是重要的限制因素(Chamizo等人,2012)。在这些地区,来自大气和人为活动的氮输入速率非常低,这些系统中的植被强烈依赖于生物土壤结皮中微生物固定的氮(Zhuang et al.,2015)。这是因为这些地壳中存在许多土壤微生物,并且这些土壤微生物与植物之间的相互作用可以控制生态系统中的氮循环(Knops等,2002)。此外,生物土壤结皮在稳定土壤,减少侵蚀和保留土壤养分方面起着关键作用,因此,它们的损失被认为是土地退化的主要原因(Belnap2006)。

生物土壤结皮可分为不同的继发阶段。演替通常从藻类开始,然后是地衣,然后是苔藓(Wu等,2011;Lan等,2011;Lan等,2013)。由于藻类能够在裸露的土壤表面定殖并改善表面微环境,因此通常代表了主要的演替阶段,从而增加了后来演替物种的定殖和生存可能性(Lan等,2011)。因此,已经提出了人工加速藻类结壳形成的方法,作为恢复退化的土壤生态系统功能的一种方法(Bowker2007)。Chen等。(2006)通过将不稳定的沙丘与两种蓝细菌的混合物接种,在中国内蒙古产生了人工藻壳。Wang等。(2009)还测试了在使用草编棋盘控制风蚀的沙漠地区接种蓝细菌的可行性,发现蓝细菌在草之间形成了稳定的土壤结皮。已经提出了其他加速藻类结壳形成的实验,包括用结壳浆料和干碎结壳接种土壤(Belnap1993),但由于接种量有限,这些技术尚未得到广泛使用

供应。为了解决这些问题,提高土壤养分含量,促进藻类结皮的恢复,我们设计了一个实验,以测试海藻施肥对结皮发育的影响。

海藻(俗称Bseaweed)及其生物活性提取物作为叶面肥被广泛使用了数十年。作物生产系统中的土壤处理。他们已经在植物产量和质量方面显示出许多好处,尤其是在沿海地区和丘陵地区(Illera-Vives等人,2017;Layek等,2017;Pramanick等,2017;Mzibra等,2018)。与传统肥料相比,海藻衍生的肥料具有生物可降解性,并且由于其分解速度较慢,因此可以降低过量使用肥料的风险(Sathya等人,2010)。以前许多关于海藻成分的研究已经证明了其提取物的有益效果,包括藻类多糖,甜菜碱,多胺,低聚糖,氨基酸和维生素(Kumari等人,2011;Stirk等,2013;辛格等,2015;洛茨和霍夫曼2015)。其他研究人员已经研究了海藻提取物对植物抗逆性(包括抗病性)的作用和机理(Arioli等人,2015),耐盐性(Rouphael等,2016)和缺水耐受性(Mansori et al.,2014)。很少有研究关注海藻肥料对土壤改良的影响(Kumari等人,2012;Layek等,2017)。特别是,尚未研究海藻肥料对土壤生物结皮的影响。

为了支持改善干旱和半干旱地区脆弱的沙漠环境并增加可持续发展潜力的努力,我们研究了降雨方式和海藻肥料添加量变化对沙生植物生长和生物土壤结皮的影响。

我们试图回答以下问题:(1)添加海藻肥料和降雨间隔的变化如何影响沙生植物物种的生物量生产和其他特征?(2)添加海藻肥料和降雨间隔的变化是否会促进生物土壤结皮的发育?(3)在植物,生物结皮和土壤养分之间的相互作用的背景下,结皮中总氮,有机碳和叶绿素a的含量在确定这三种物种的生物量生产中的相对作用是什么?我们假设海藻肥料和降雨间隔会相互作用,从而对不同的沙生植物种类和生物结皮的发育产生不同的影响。

材料和方法

研究地点和物种选择

该实验在盐池研究站(北纬37°04'至北纬38°10'和东经106°30'至107°47')进行

E, 海拔1550 m), 位于中国宁夏回族自治区Mu Us沙漠的西南边缘。该地区属温带干旱至半干旱气候。年平均降雨量为287毫米, 其中80%在7月至9月之间下降 (Feng等, 2013; 贾等, 2016)。年平均温度 (1954–2004年) 为

8.1°C, 平均月气温在

-1月为8.7°C至7月为22.4°C (Bai等, 2018), 而无霜季节平均会持续165天 (Jia等, 2014)。该地区现在由沙丘和干燥的稀疏岛屿组成, 这些植被主要由于过度放牧而从其原始状态退化了 (Sun等人, 2016)。

实验设计和现场操作

我们用钢制框架建造了一个2米高的庇护所, 占地面积为72 m² (6 m×12 m)。在雨天, 庇护所被防水油布覆盖, 以便我们控制降水量和频率。除雨天外, 避难所内外的空气温度, 相对湿度和光照均无显著差异 (Beier等, 2012)。我们使用双向因子设计来控制2017年6月1日至9月25日的肥料添加和降水模式 (这里是降雨事件之间的间隔)。海藻肥料 (En-Green PLUS; Shidai Marine Biotechnology Co.) 将其溶解在水中, 并在避难所下同时进行肥料添加和降水频率试验。糖精海带被用作海藻肥料的原料。为了制备肥料, 制造商使用专有方法对海带进行了低温酶促水解。在天然酶和微生物的复合作用的共同作用下, 该过程降解了海带细胞的纤维素和藻胶, 释放出养分。表1显示了这项研究中海藻肥料的组成。该海藻肥料的施用量由美国土壤肥料农场顾问公司 (美国华盛顿州摩西湖) 推荐, 后者根据苜蓿的使用情况对肥料进行了营养分析。我们使用了两个降雨间隔: 3天和15天。我们还使用了两种肥料水平: 添加225 L ha⁻¹的海藻肥料和不添加任何肥料的对照。我们根据该地区的降雨统计数据设计了降水量和降雨间隔。总降水量控制在198毫米, 等于6月1日至9月30日的长期平均降水量 (2004–2014年)。先前的统计分析表明,

大于或等于2 mm的降水事件是有效的; 也就是说, 水到达生根区并可以被根部吸收 (Zhang et al. 2017)。3天的降雨间隔 (此后称为D3处理) 代表两次降雨事件之间最频繁的间隔 (2004–2014年), 而15天的降雨间隔 (此后称为D15处理) 代表了该地区的极端干旱。

对于我们三个研究物种中的每一个 (本节后面将介绍), 我们使用40个塑料盆 (每次处理10个), 容积为5.7 L, 总共120个盆。将盆放置在距避难所边缘至少0.5 m处, 以防止自然降雨。根据不同物种的降雨间隔, 将所有盆分为6个块, 每个块之间相距1 m。在实验期间, 将处理D3和D15分别浇水25次和5次, 每次分别浇水4.95和24.75 mm。

灌溉水来自附近的一口井, 其氮, 磷和钾的浓度低于可检测的水平。盆栽土壤是从研究站附近的沙丘中收集的, 具有壤质砂质质地, 其中99.5%的土壤颗粒小于0.5毫米 (Liu等人, 2006年)。2016b)。表2总结了土壤的特征。在开始我们的实验之前, 我们使用带有0.5毫米筛孔的金属筛去除土壤上的种子和粗糙碎片。结果, 在实验过程中, 我们没有观察到除我们三个研究物种之外的其他植物。每个盆的底部有八个排水孔, 并用尼龙网覆盖, 以防止盆土外的土壤和根系流失。

对于我们的研究物种, 我们选择了三种具有不同生活史的本地先驱植物种: 一年生草本植物 (*Agriophyllum squarrosum*), 多年生根茎豆科草 (*Glycyrrhiza uralensis*) 和多年生束草 (*Achnatherum splendens*)。对于每种物种, 我们在2016年从车站附近的自然社区收集了种子。这些种子于2017年5月1日以每盆15的密度播种在盆中。播种时, 土壤没有生物结皮。每天使用带有喷雾嘴的软管向所有处理中的植物提供等量的水。播种后第20天, 我们将盆苗减薄至每盆5棵健康的幼苗。

土壤测量和植物采样

9月25日, 播种后147天, 将所有存活的植物从茎基切下并收集在纸袋中。然后我们

表1我们研究中的海藻肥料的典型成分

B	钙	铁	K	镁	娜	P	S	N	海藻酸盐	甘露醇
g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹	g L ⁻¹
0.01	0.42	0.02	37.43	0.40	1.63	12.54	4.74	0.43	4.50	1.50

表2我们研究的盆中使用的壤土砂的基本特征。SOC, TN和TP分别代表土壤有机碳, 总氮和总磷含量。值是平均值 ± SD (n = 3)

pH值	社会 克kg ⁻¹	n 克/千克 ⁻¹	p 克/千克 ⁻¹	K 克kg ⁻¹
8.64 ± 0.08	0.66 ± 0.26	0.08 ± 0.02	0.15 ± 0.00	0.01 ± 0.00

从每个花盆中收集生物土壤结皮, 并获得一个土壤芯 (直径9厘米), 该土壤核心距下面的土壤深10厘米。将来自三个锅的同一层的土壤样品 (生物土壤地壳和地壳下的土壤) 轻轻混合并通过2毫米筛孔筛分, 以创建一个用于测量有机碳 (OC) 和总有机碳含量的单一复合样品。氮 (TN) 含量。将其余的土壤样品通过2毫米筛孔筛, 以提取植物根, 将其轻轻冲洗以除去任何土壤, 然后放入纸袋中。幼苗的叶面积是通过使用Epson扫描仪 (Epson, 东京, 日本) 扫描叶片并使用Matlab软件 (<https://www.mathworks.com/>)。然后将收获的植物材料在75°C的烘箱中干燥48小时, 分类并称重至0.001 g的精度。我们将比叶面积 (SLA) 计算为每单位干重的单侧叶面积 (Herrera et al. 2008)。使用Walkley和Black方法测量OC (Nelson等1996), 并使用凯氏定氮法 (Sparks et al. 1996)。

生物壳的生物量由叶绿素a的含量表示。为了确定该含量, 我们向风干的2.40 cm²地壳样品 (在土壤中2至5 mm的深度) 中加入10 mL 95% w / w的热乙醇 (80 ° C)。用研钵和研棒对样品进行采样, 直到样品的叶绿素完全溶解到酒精中为止, 我们确定何时溶液颜色不再改变。我们通过滤纸用乙醇溶液提取叶绿素, 然后将提取物在黑暗中于4 ° C冷冻6 h。然后将样品离心 (Techcomp, CT15RT, 中国香港, 2365.7 × g, 10分钟), 我们使用分光光度计在665 nm和750 nm波长下测量上清液的吸光度值。然后我们加入0.5 mL 1 mol L⁻¹HCl, 并再次测量吸光度值 (Liu等。2016a):

$$\text{Chl a} = \frac{V}{S} \times \frac{E_{665} - A_{750}}{E_{665} - E_{750}} \quad \delta \text{p}$$

其中Chla是叶绿素a的含量 (μg cm⁻²); A₆₆₅是酸化前上清液的吸光度值。E₆₆₅和E₇₅₀是酸化后上清液的吸光度值。V是

上清液 (mL); S是地壳样品的面积 (cm²)。

统计分析

我们使用双向方差分析评估肥料添加和降雨间隔以及肥料×降雨相互作用对地上生物量, 根系生物量, 根与茎比和比叶面积 (SLA) 的影响。我们还根据叶绿素a含量以及土壤和地壳的OC和TN含量对生物地壳生物量进行了分析。当方差分析结果显著时, 我们使用Tukey的HSD事后检验来确定一个因素水平之间的显著差异 (p < 0.05)。使用R软件 (3.2.4版) 对每个实验分别进行统计分析 (<https://www.r-project.org/>)。我们使用了结构方程模型 (Shipley 2000; 恩典 2006) 评估TN和OC在土壤和生物外壳中的相对作用, 以及外壳中叶绿素含量对它们对本研生物量的影响。为此, 我们使用了17.0版的AMOS软件 (<https://www.ibm.com/us-en/marketplace/structural-> 方程建模)。

结果

地上生物量和根系生物量

与对照相比, 海藻肥料的添加显著影响了所有物种的地上生物量和根系生物量 (所有p < 0.01; 表3)。

对于所有物种, 三天降雨间隔 (D3) 下的地上生物量均比对照增加 (图2)。1), 对于A. squarrosus是25.6%, 对于G. uralensis是259.5%, 对于A. splendens是825.4%。但是, 对于A. squarrosus, 差异并不显著。与对照相比, 根部生物量也增加了27.1%, 146.1%和227.6%。

A. squarrosus, G. uralensis和A. splendens。然而, 在D3处理中, 对于A. squarrosus而言, 差异并不显著。在15天的降雨间隔 (D15) 下, 与对照相比, 增加幅度更大

A. 方形地上植物和根的生物量

A. squarrosus和A. splendens, 对所有物种均显著

(图1): 地上生物量为177.4%

A. squarrosus, G. uralensis和A. squarrosus占408.5%

A. splendens, 而119.5%, 88.5%和704.3%

A. squarrosus, G. uralensis和A. splendens分别用于根生物量。

在给定的肥料添加量下, 将降雨间隔从3天更改为15天, 分别会使方球菌和sp草的地上生物量分别增加120.8%和94.2% (图. 1)。而且, 根的生物量

表3双向ANOVA对海藻肥料添加量 (F) 和降雨间隔 (D) 的影响及其相互作用 (F×D) 对地上生物量, 根系生物量, 根与芽比率, 特定叶片的影响的结果

面积和叶绿素a含量三种。显著性: ns, 不显著; *和**分别在p <0.05和p <0.01时显著

种类	治疗	方差分析F值和意义				
		地上生物量	根生物量	根/射比	比叶面积	叶绿素a
沙枣	F	33.115**	16.000**	1.038ns	14.871**	85.784**
	D	18.490**	10.716**	0.532ns	0.862ns	0.070ns
	F × D	18.506**	7.054*	0.817ns	2.755ns	1.235ns
甘草	F	25.378**	25.302**	6.121*	1.746ns	48.113**
	D	1.195ns	3.434ns	6.153*	0.252ns	4.837ns
	F × D	2.414ns	2.114ns	1.081ns	21.436**	0.58ns
hn草	F	64.722**	27.646**	8.994**	16.533**	59.394**
	D	8.083**	2.852ns	1.983ns	1.308ns	1.310ns
	F × D	1.831ns	0.978ns	0.470ns	1.476ns	2.818ns

磷球菌和脾脏草分别增加了55.9%和60.1%。对于G. uralensis, 除了肥料+ D15处理的根系生物量显著减少外, 没有显著差异。

降水方式对这三个物种的生物量有不同的影响。对于A. squarrosus, 降雨间隔也显著影响生物量的生产, 降雨间隔和肥料添加之间的相互作用对生物量的生产也很重要。但是, 对于G. uralensis, 降雨间隔并不明显

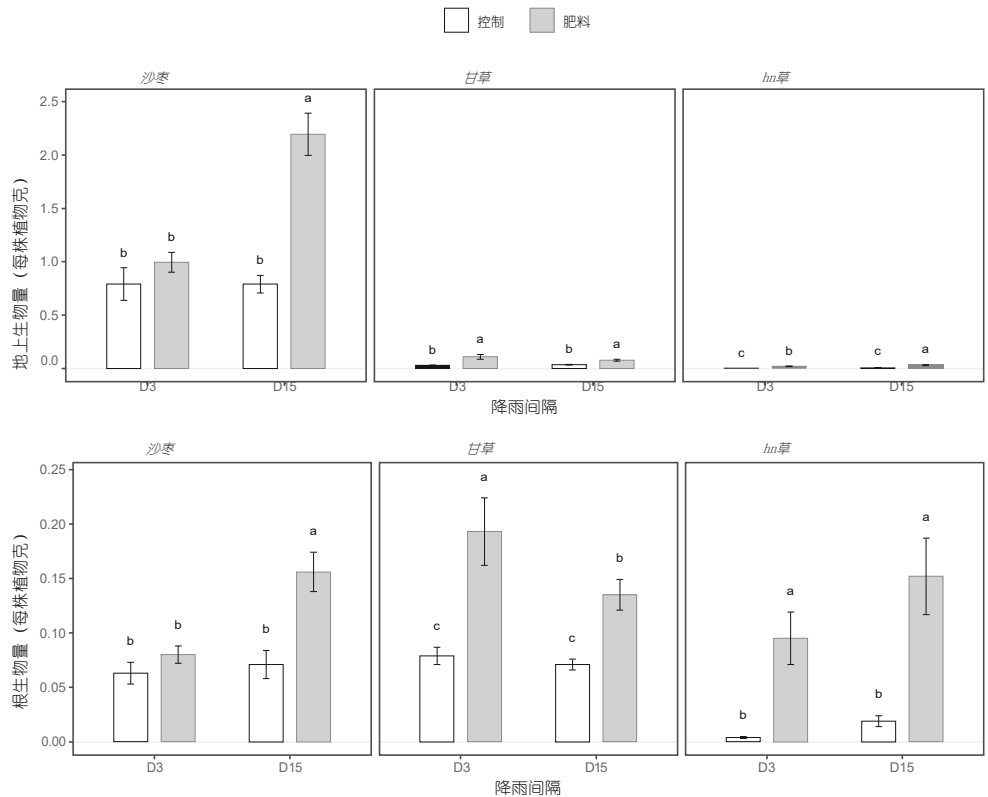
除施用化肥和D15处理外, 其他影响生物量的生产; 对于A草, 降雨间隔仅显著影响地上生物量, 而肥料与降雨之间没有显著相互作用 (表3)。

根茎比和比叶面积

施肥显著影响G. uralensis和A. splendens (多年生植物) 的根冠比 (R / S比), 但不影响一年生草本植物A. squarrosus (表A) 3)。

图1海藻肥料添加和降雨的影响

三个物种的地上生物量和根系生物量之间的间隔。D3和D15分别表示3天和15天的降雨间隔。值是平均值±SE。标有不同字母的物种的值存在显著差异 (方差分析, 然后采用Tukey的HSD测试, p <0.05)



降雨间隔的变化仅显著影响*G. uralensis*的R / S比 (图. 2). R / S比

由于在第3天添加了肥料, 而在第15天没有添加*G. uralensis*。另外, 在D3中, sp草的R / S比显著增加, 而在D15中则没有。

除多年生根瘤菌豆科植物*G. uralensis*外, 肥料添加对所有物种的比叶面积 (SLA) 有显著影响 (表1)。然而, 肥料添加与降雨间隔之间的相互作用仅显著影响了*G. uralensis*的SLA。

的SLA 球菌在D3中显著增加, 但在D15中没有显著增加 (图. 2)。在D3和D15中, sp草的SLA显著增加。对于没有添加肥料的*G. uralensis*, 随着降雨间隔从3天增加到15天, SLA显著增加 (40.3%), 但是随着肥料添加, 随着降雨间隔的增加, SLA显著减少 (25.7%)。

生物土壤结皮中叶绿素a的含量

对于所有物种, 肥料添加均显著影响生物土壤结皮中叶绿素a含量 ($p < 0.01$), 但降雨间隔以及肥料添加与降雨间隔之间的相互作用没有显著影响 (表3)。与所有物种相比, 较短的降雨间隔 (D3) 显著增加了叶绿素a含量

与控制 (图. 3), 对于*A. squarrosus*来说是334.8%, 对于*G. uralensis*, 对于*A. splendens*来说是329.2%。在更长的降雨间隔 (D15) 下, 所有物种的叶绿素a含量也显著增加, 并且增加幅度更大 (*A. squarrosus*为653.3%, *A. squarrosus*为403.0%)。

G. uralensis, 和*A. splendens*的723.5%。对于所有物种, 地壳内的叶绿素a含量随降雨间隔的变化而变化, 但差异无统计学意义 ($p > 0.05$)。在所有条件下, *G. uralensis*生物土壤外壳中的叶绿素a含量均高于其他两个物种 (图2b)。

有机碳和总氮含量

生物土壤结皮的营养状况

这三个物种的生物土壤结皮中的OC和TN含量均比添加肥料后的对照显著增加 (表4)。将这三个物种的降雨间隔从3天更改为15天, 会显著降低生物土壤地壳的总氮含量。随着降水间隔的增加, 生物土壤结皮中的OC含量显著下降。

G. uralensis, 但显著增加了*A. splendens*。

图2施肥和降雨间隔对肥料的影响

根冠比和比叶面积三种。D3和D15分别表示3天和15天的降雨间隔。

值是平均值±SE。的值 标有不同字母的物种差异很大

(ANOVA之后是Tukey's HSD测试, $p < 0.05$)

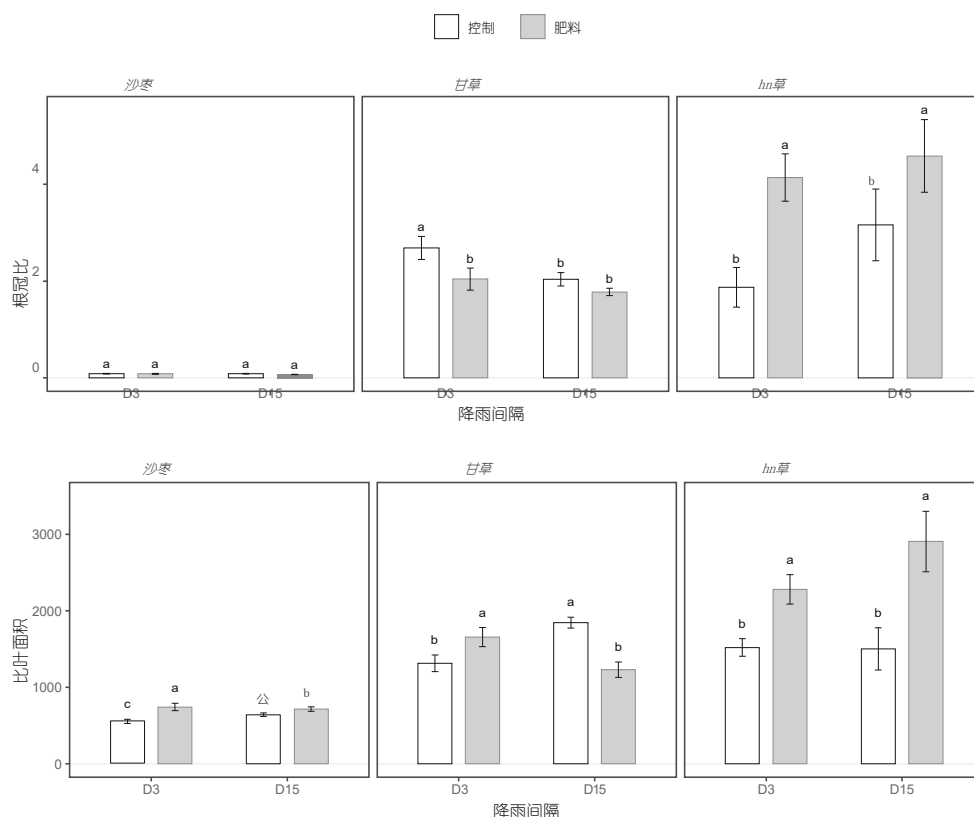
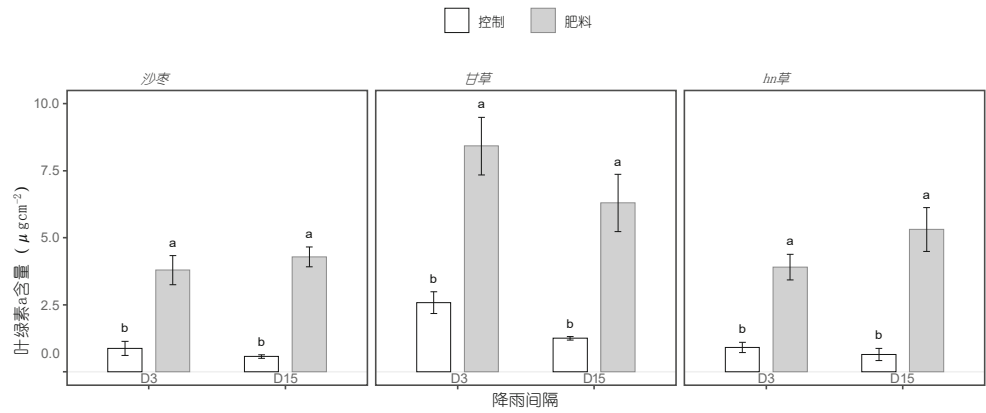


图3施肥和降雨间隔对肥料的影响

与这三个物种相关的生物外壳中的叶绿素a含量。D3和D15分别表示3天和15天的降雨间隔。值是平均值±SE。标有不同字母的物种的值存在显著差异(方差分析,然后采用Tukey的HSD测试, $p < 0.05$)



土壤营养状况

肥料添加后,土壤中的OC含量显著下降,除了sp草(*A. splendens*)显著增加外。降雨间隔从3天增加到15天,土壤的OC含量显著下降。

*A. squarrosus*和*A. splendens*,但不适用于*G. uralensis*。施肥或降雨间隔的变化对土壤总氮含量的影响均不显著,但施肥随施肥量的增加很小但显著增加。

A. 方球菌。

土壤和地壳之间的营养差异

与施肥处理后,土壤生物土壤中的OC显著增加,分别为25.5%和41.5%。但是,与土壤相比,sp草没有显著差异。在大多数处理中,生物土壤结皮的总氮含量显著高于土壤中的总氮(表4)。

营养变量对生物量的相对影响

结构方程模型表明,土壤和生物结皮的总氮(TN)和有机碳(OC)的变化以及生物结皮的叶绿素a含量的变化是由于降雨间隔的改变和海藻肥料的添加所致。但是,这些变化以不同的方式影响了这三个物种的生物量生产(图.4)。土壤总氮对土壤生物量产生负面影响*A. squarrosus*和*G. uralensis*,但对*A. splendens*,而OC对任何物种的生物量均无显著影响。叶绿素a含量对所有物种的生物量均显示出显著的正效应。对于一年生的*A. squarrosus*物种,最终模型解释了88%的生物量变化和50%的叶绿素a含量变化。高叶绿素a含量增加了生物量的产生,而高TN减少了生物量的产生。为了

在两个多年生植物中,最终模型解释了*G. uralensis*的87%的生物量变异和80%的叶绿素a变异,并解释了*G. uralensis*的65%的生物量变异和83%的叶绿素a变异。*A. 锦绣*。高叶绿素a含量增加了紫花苜蓿的生物量产量,而高TN则降低了紫花苜蓿的生物量产量,但高叶绿素a含量增加了sp草的生物量产量,并且不受OC的显著影响。

讨论区

施肥和降雨间隔对植物性状的影响

我们的结果提供了有力的证据,表明添加海藻肥料可改善具有不同生活史的三种植物的生长。在两个降雨间隔内,所有种类的地上和根系生物量产量均随着肥料的添加而显著增加(图2)。1)。

先前的研究还表明,将海藻或其提取物用作肥料有利于植物的生长和产量(Pramanick等人,2017)。例如,Khan等。(2013)发现,用结节菊提取物处理苜蓿根会增加根瘤的数量,从而增加苜蓿的生长。此外,一些研究发现,海藻或其提取物中所含的碳水化合物,植物激素,类激素的植物生长调节剂,微量元素,维生素和氨基酸,以及改善的土壤质地和持水能力,可增加植物生物量(粗谷2010;Khan等,2012)。

对于不施肥的控制,降雨间隔对所有物种地上和根系生物量的影响可以忽略不计。然而,添加肥料后,随着降雨间隔的增加,地上和根部土壤生物量显著增加。对于受精的*G. uralensis*,地上生物量不受

表4海藻肥料的添加和降雨间隔期对海藻中有机碳和总氮含量的影响

种类		有机碳含量 (%)		总氮含量 (%) 生物结		
		皮	泥	生物结皮	泥	
生物结皮和土壤这三种。F ₀ , 用不施肥F ₊ , 肥料加成;D3, 三天降雨间隔;D15, 15天降雨间隔。值是平均值±SD。在给定的样本中(生物外壳或土壤), 标有不同的字母明显不同在四种治疗中。(ANOVA之后是Tukey's HSD测试, p < 0.05)	沙枣	F ₀	0.317 ± 0.04b	0.392 ± 0.11a	0.030 ± 0.01b	0.007 ± 0.00b
		F ₊	0.335 ± 0.09a	0.267 ± 0.40b	0.041 ± 0.0a	0.008 ± 0.00a
		D3	0.380 ± 0.05a	0.364 ± 0.14a	0.045 ± 0.01a	0.007 ± 0.00a
	甘草	D15	0.272 ± 0.03b	0.296 ± 0.02b	0.027 ± 0.00b	0.007 ± 0.01a
		F ₀	0.216 ± 0.07b	0.279 ± 0.01a	0.019 ± 0.00b	0.007 ± 0.00a
		F ₊	0.300 ± 0.04a	0.212 ± 0.02b	0.037 ± 0.00a	0.007 ± 0.00a
	hn草	D3	0.298 ± 0.05a	0.245 ± 0.03a	0.030 ± 0.01a	0.007 ± 0.01a
		D15	0.221 ± 0.07b	0.246 ± 0.05a	0.026 ± 0.01b	0.007 ± 0.00a
		F ₀	0.405 ± 0.17b	0.410 ± 0.12b	0.014 ± 0.00b	0.007 ± 0.00a
		F ₊	0.567 ± 0.09a	0.576 ± 0.18a	0.053 ± 0.01a	0.007 ± 0.00a
		D3	0.382 ± 0.15b	0.638 ± 0.13a	0.041 ± 0.03a	0.007 ± 0.00a
		D15	0.590 ± 0.06a	0.348 ± 0.06b	0.026 ± 0.02b	0.007 ± 0.00a

增加降雨间隔, 但根生物量显著减少。

刘等。(2012)在中国内蒙古自治区中部地区进行了类似的实验, 发现与3天间隔相比, 两个多年生禾本科牧草(中华绒螯蟹和羊茅)的土壤水分以15天间隔显著更高。

S. grandis). 也就是说, 较大的降雨事件(在15天的间隔中, 每个事件平均39.6毫米)将比多个小降雨事件(在3天的间隔中, 每个事件平均7.92毫米)保持土壤水分更长的时间。先前的研究发现, 每次事件低于5毫米的降雨通常会增加土壤表面上方空气的相对湿度, 这可能在抗旱方面发挥作用, 而超过5毫米的降水事件则会增加土壤湿度(Wei等。2008)。当降水事件很大时, 便开始快速的生物质生产并持续到消耗可用为止(Heisler-White等人。2008)。此外, 尽管小降雨事件更为频繁, 并且在生长季节对植物的生理活动有很大贡献, 但它们可能不如大降雨重要。对降水和地上净初级生产的长期数据的分析表明, 生产年际变化的最重要的解释性变量是大事件中收到的降水量, 降雨超过30毫米(Lauenroth和Sala1992)。

一年生植物往往具有较高的水利利用率, 并根据可用水量调节其生长周期。例如, *A. squarrosus*是一年生的沙生植物, 耗水量高, 因此对降水敏感(Zhu等。2015)。对于较小的降雨事件(D3), 大部分降雨将存储在易受侵蚀的近地表土壤中。

蒸发, 而较大的降雨事件(D15)将导致水更深地渗透到土壤中, 包括更多的生根区, 从而改善植物的生长(Didiano等。2016)。

此外, 只有*A. squarrosus*对降雨间隔和肥料添加之间的相互作用对生物量生产具有显著影响(表3)。相互作用表明, 海藻肥料的添加仅在大降雨事件(D15)下才显著增加了生物质产量(图15)。1)。也就是说, 在更适合的水分条件下, 施肥对植物生长的影响更加明显。肥料的添加为植物带来了更多的养分, 并大大提高了SLA(表3, 图。2), 表明它改善了植物的营养状况。但是, 对于*G. uralensis*, SLA仅在D3时显著增加; 在D15中, 它显著下降。结果, 这三个物种的植物生物量生产均显著高于对照植物(图。1)。

多年生植物*A. splendens*与内生夜蛾具有独特的共生关系, 可以帮助其抵抗干旱胁迫, 从而减少土壤水分不足对其生长的影响(Elmi和West1995;Wei等。2006)。与之前的研究一致, 我们还发现降水模式的变化对对照中该物种的地上和根系生物量影响不大, 但随着D15施肥的增加, 两者都大大增加(图5)。1)。肥料的添加会影响植物的生长和生物量的分配(Bai等。2010)。我们发现肥料的添加对*A. squarrosus*和*A.*

A. splendens, 并显著影响*G. uralensis*和*A. splendens*的根/茎比(表3, 图。2)。根冠比的增加意味着地下的生长得到改善, 可以更好地利用土壤水分和养分。

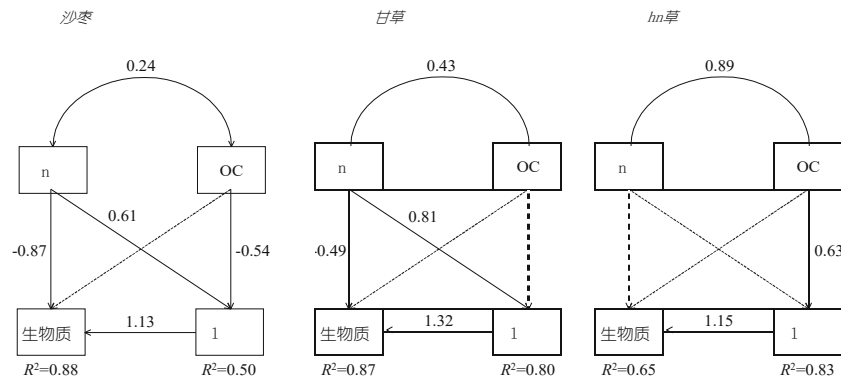


图4土壤和生物结皮中总氮 (TN) 和有机碳 (OC) 含量以及生物土壤结皮中叶绿素a含量 (Chl a) 对土壤和土壤的影响的结构方程模型结果这三个物种的生物量。实线和虚线表示显著 ($p < 0.05$) 和非显著效果 ($p > 0.05$) ,

分别。与响应变量关联的 R^2 值指示通过与这些变量之间的关系解释的变化比例。与实线箭头关联的数字表示标准化的路径系数。正值和负值分别表示正效应和负效应

施肥和降雨间隔对生物结皮的影响

在两个降雨间隔内, 所有物种的生物土壤结皮中的叶绿素a, OC和TN含量均随着肥料的添加而显著增加 (表4, 图. 3). 这表明合适的养分改良剂可以促进生物土壤结皮的生长。这与以前的研究相吻合, 先前的研究发现在适当的营养条件下蓝细菌的定殖相对较快 (Belnap和Eldridge2003). 此外, Maestre等。(2006) 发现有机肥料可促进土壤中自养微生物群落的多样性, 从而增加叶绿素a的含量。

海藻肥料是一种有机肥料, 其营养质量可以通过微生物发酵来改善, 该过程保持了大量具有细胞分裂素和生长素样活性的藻类多糖。先前的研究发现, 海藻的鞘具有很高的机械强度, 藻类以细胞外多糖的形式产生的粘合剂可以促进藻类与土壤颗粒的结合 (Lan等人。2011). 这两种特性都促进了生物土壤结皮的形成。但是, 由于我们没有评估海藻肥料的微生物含量, 因此无法确定海藻肥料是否是形成土壤生物结皮的生物的潜在来源。这些可能已经存在于结皮形成的土壤中, 或者可能被风吹到研究地点。

土壤含水量在具有生物土壤结皮的生境的稳定性中起着重要作用 (Kidron等。2009). 但是, 与添加肥料的结果相比, 我们发现改变降雨间隔并不会显著影响三种物种中任何一种的生物土壤c中叶绿素a含量 (图. 3). 先前的研究发现, 生物土壤处理后, 土壤表面的吸收率, 土壤团聚体的存在和土壤微孔的数量增加

地壳的形成, 导致土壤保水力提高, 更多降雨被渗透 (Lan等。2011). 此外, 改善的土壤水分可以抵消降雨变化的影响, 减少降雨间隔对生物土壤结皮的影响。

在所有处理中, 与*G. uralensis*相关的生物壳中叶绿素a的含量均高于其他两个物种 (图2b)。3). 由于*G. uralensis*是一种豆科植物, 它可以与根瘤细菌建立共生关系, 由于这些内生菌固氮, 它将增加土壤微生物的生物量并改善土壤的养分状况 (Hurek等人。2002; Sun等。2009). 改良的土壤养分和增加的土壤微生物种群数量将进一步加速土壤中的氮循环 (Knops等。2002)结果, 生物土壤结皮的生长更好, 叶绿素a更高。

植物, 生物结皮和土壤养分之间的相互作用

我们发现TN和OC对与不同植物物种相关的生物土壤结皮的不同影响。海藻肥料将为土壤提供养分。由于快速生长的微生物会消耗大量的氮, 这为生物土壤结皮的发展创造了更有利的条件。Kidron等。(2009) 发现, 土壤有机质和养分都能改善形成生物土壤结皮的生物的土壤微环境。在生物土壤结皮形成后, 土壤氮增加。我们发现在所有处理中, 与三种物种的土壤相比, 生物土壤结皮中的总氮增加。这有力的证据表明生物土壤结皮可以改善表土养分环境。先前的研究发现, 生物土壤结皮的存在使周围土壤的氮含量增加了200% (Harper和Belnap2001). 其他研究还发现, 丘陵地带的生物土壤结皮

黄土高原地区显著增加了土壤有机质和总氮含量（陈和段2014;赵等。2006）。

我们的结果表明，对于这三个物种，生物土壤结皮可能都改善了植物的生物量生产。这可能是由于，一方面，生物土壤结皮改善了近地表土壤的水分和养分状况，并增加了土壤细颗粒的含量和孔隙率（Lan等，2002）。2011。另一方面，生物土壤结皮可以增加土壤微生物的生物量和土壤酶的活性（Pietrasiak等人。2013），导致植物根部更好地吸收养分。换句话说，生物土壤结皮通过提高土壤微生物活性和植物根系与微生物群落的相互作用的能力，可以间接改善植物的生长。

我们发现，土壤总氮对除sp草以外的所有物种的植物生物量产量均产生负面影响，并且土壤OC对这三个物种的植物生物量产量均无显著影响（图2）。4。我们使用的原始土壤的TN和OC含量较低。添加海藻肥料可以改善这两种含量，但是随着植物的生长和地壳的发展，这两种过程都会逐渐耗尽土壤中的氮和碳，而土壤中的氮和碳将被固定在植物和微型作物中。这些营养物质在地壳中比在土壤中更为丰富，这一事实表明，大部分吸收已转移到地壳中，这可能是由于地壳中生物的快速代谢和生长所致。植物也吸收了大量的土壤N，尽管土壤OC仅会对植物产生间接影响（通过其对土壤环境的影响），因为一旦植物成年后，植物就会通过光合作用从大气中获取几乎所有的碳。叶（Voronin和黑2005）。先前的研究（Zhang et al。2017）表明氮对植物生长的重要性可能取决于植物的生长阶段（例如生殖生长与营养生长）和植物的年龄。肥料中的高总氮也可能抑制了豆科植物根瘤菌的生长，这有可能降低其生长（Salvagiotti等人。2008）。另外一个因素是，随着植物和土壤微生物都吸收氮，碳氮比增加。较高的碳氮比使其更难分解和矿化有机物（Watt和Palmer2012）。

结论

我们的实验提供了一个清晰的图景：对于三种生活史不同的沙生植物而言，添加海藻肥料和改变降水模式既影响植物性状，又影响生物土壤结皮的发育，尽管变化的细节因物种而异。这些结果证实了我们的研究假设。施肥和降雨间隔对植物性状的影响为

在一定程度上与他们的生活史有关。例如，添加肥料通常可以显著改善植物性状（例如，改善地上和地下生物量），但降雨间隔对植物性状的影响并不总是那么显著，并且两个因素之间的相互作用仅对植物的性状有显著影响。地上和根系生物量

*A. squarrosus*和*G. uralensis*的特定叶面积。肥料的添加对三种树的根冠比和比叶面积有不同的影响。肥料的添加增加了土壤中的OC和TN含量，并促进了生物土壤结皮的发育，进而增加了近表层土壤的氮含量。结构方程模型表明，土壤OC和TN以及生物土壤结皮中的叶绿素a含量在植物生物量生产中发挥不同的作用，并且其途径，方向（正向或负向），统计显著性和影响程度（ R^2 ）取决于物种。总体而言，我们的结果表明，海藻肥料可以促进植物和地壳的生长和发育，这表明它可能是干旱和半干旱地区生态系统恢复的宝贵工具。

致谢我们感谢Yanchi研究站的工作人员在现场工作中的帮助，并感谢Geoff Hart（加拿大Pointe-Claire）对本手稿早期版本的语言编辑。这项研究得到了中央大学基础研究基金（NO. 2015ZCQ-SB-03）的支持。

参考文献

- Arioli T, Mattner SW, Winberg PC (2015) 海藻提取物在澳大利亚农业中的应用：过去，现在和未来。J Appl Phycol 27:2007–2015
- Bai Y, Wu J, Clark CM, Naeem S, Pan Q, Huang J, Zhang L, Han X (2010) 氮添加对生物多样性和生态系统功能的影响的权衡和阈值：来自内蒙古草原的证据。Glob Chang传记16: 358–372
- Bai Y, She W, Michalet R, Zheng J, Qin S, Zhang Y, Ohlemuller R (2018) 捐助者的便利化和受益人的反馈效应在半干旱沙丘生态系统中驱动灌木为主的群落演替。应用蔬菜科学21: 595–606
- Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, Penuelas J, Emmett B, Korner C, de Boeck H, Christensen JH, Leuzinger S, Janssens IA, Hansen K (2012) 降水操纵实验一挑战和对未来的建议。Ecol Lett 15:899–911
- Belnap J (1993) 隐生皮的回收率：接种剂的使用和评估方法。大盆地博物学家53: 89–95
- Belnap J (2006) 生物土壤结皮在旱地水文循环中的潜在作用。液压过程20: 3159–3178
- Belnap J, Eldridge D (2003) 生物土壤结皮的扰动和恢复。柏林施普林格出版社
- Biederman JA, Scott RL, Goulden ML, Vargas R, Litvak ME, Kolb TE, Yezpe EA, Oechel WC, Blanken PD, Bell TW, Garatuza-Payan J, Maurer GE, Dore S, Burns SP (2016) 陆地碳平衡较干燥的世界：北美西南部水资源的供应。Glob Chang生物学22: 1867–1879
- Bowker MA (2007) 理论和实践中的生物土壤结皮修复：尚未得到充分利用的机会。恢复埃科尔15: 13–23

- Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, Domingo F (2012) 生物土壤结皮的发育影响半干旱生态系统中土壤表面的理化特性. 土壤生物化学 49: 96–105
- Chen X, Duan Z (2014) 结皮对中国北方干旱半干旱沙漠地区不同降雨区土壤理化特性的影响. 环境科学 73: 3335–3347
- Chen L, Xie Z, Hu C, Li D, Wang G, Liu Y (2006) 内蒙古受环境因素影响的人造沙漠藻壳, 中国. 干旱环境 67: 521–527
- Craigie JS (2010) 植物科学和农业中的海藻提取物刺激物. J Appl Phycol 23:371–393
- Didiano TJ, Johnson MT, Duval TP (2016) 阐明了降水量和频率对14种草地物种性能的影响. PLoS 11: e0162310
- 董刚, 郭健, 陈健, 孙刚, 高升, 胡丽, 王Wang (2011) 春季干旱对东北松嫩草原草原碳汇, 蒸散及水利用效率的影响. 生态水文学 4: 211–224
- Elmi AA, West CP (1995) 内生菌感染对高羊茅气孔导度, 渗透调节和干旱恢复的影响. 新植物 131: 61–67
- 冯伟, 张永庆, 吴兵, 查察社, 贾新, 秦国兴, 邵长贤, 刘建波, 赖中瑞, 法奎勇 (2013) 干旱季节生物结皮土壤扰动对土壤呼吸的影响. Sci World J 2013: 408560
- Grace JB (2006) 结构方程建模和自然系统. 剑桥大学出版社, 剑桥
- Groisman PY, Karl TR, Easterling DR, Knight RW, Jamason PF, Hennessy KJ, Suppiah R, Page CM, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev VN, Douglas A, Førland E, Zhai PM (1999) 降水: 气候变化的重要指标. 语法变化 42: 243–283
- Harper KT, Belnap J (2001) 生物土壤结皮对相关维管植物吸收矿物质的影响. 干旱环境 47: 347–357
- Heisler-White JL, Knapp AK, Kelly EF (2008) 增加降雨事件的规模会增加半干旱草原地上净初级生产力. 语音 158: 129–140
- 埃雷拉 (Herrera F), 卡斯蒂略 (Castillo) JE, 奇卡 (Chica) AF, 洛佩兹 (López) BL (2008) 在垃圾堆肥番茄生产中使用城市固体废物堆肥 (MSWC) 作为生长培养基. 生物资源技术 99: 287–296
- Hurek T, Handley LL, Reinhold-Hurek B, Piche Y (2002年) 固氮菌草内生菌以不可培养的状态为植物提供了固定的氮. 摩尔植物-微生物相互作用 15: 233–242
- Illera-Vives M, Seoane Labandeira S, Iglesias Loureiro L, López-Mosquera ME (2017) 对由紫菜和鱼渣组成的堆肥进行农艺学评估, 作为有机马铃薯作物的有机肥料. J Appl Phycol 29:1663–1671
- Jia X, Zha TS, Wu B, Zhang YQ, Gong JN, Qin SG, Chen GP, Qian D, Kellomäki S, Peltola H (2014) 西北半干旱灌木林净生态系统CO₂交换的生物物理控制. 中国. 生物地球科学 11: 4679–4693
- Jia X, Zha T, Gong J, Wang B, Zhang Y, Wu B, Qin S, Peltola H (2016) 在三年的降水和土壤湿度模式对比期间, 温带半干旱灌丛的碳和水交换. 农业用陨石 228–229: 120–129
- Jongen M, Pereira JS, Aires LMI, Pio CA (2011), 干旱和降水时间对地中海草原生态系统-大气交换的年度变化的影响. 农业用陨石 151: 595–606
- Khan W, Zhai R, Souleimanov A, Critchley AT, Smith DL, Prithiviraj B (2012) 结皮藻的商业提取物通过其细菌共生菌 *Melinohizobium meliloti* 改善苜蓿的根定植. 共同土壤科学植物学 43: 2425–2436
- 可汗 W, 帕拉尼萨米 R, 克里奇利 AT, 史密斯 DL, 帕帕多普洛斯 Y, 普里西维拉 B (2013) 夜蛾提取物及其有机物的级分会刺激根瘤菌根瘤菌和紫花苜蓿 (苜蓿) 的生长. 共同土壤科学植物学 44: 900–908
- Kidron GJ, Vonshak A, Abeliovich A (2009) 微生物结皮作为内盖夫沙漠表面稳定性和湿润持续时间的生物标记. Earth Surf Process Landf 34:1594–1604
- 纳普 (Knapp) AK, 史密斯 (Smith) 医学博士 (2001) 地上初级生产时间动态中生物群落之间的差异. 科学 291: 481–484
- 诺普斯 J, 布拉德利 K, 韦丁 D (2002) 植物物种内在机理关于生态系统氮循环的公约. Ecol Lett 5:454–466
- Kumari R, Kaur I, Bhatnagar AK (2011) 羊栖菜 (*Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner) 的水提取物对番茄番茄生长, 产量和品质的影响. J Appl Phycol 23:623–633
- Kumari R, Kaur I, Bhatnagar AK (2012) 增强番茄番茄的土壤健康性和生产力. 使用 *Sargassum johnstonii* Setchell & Gardner 作为土壤改良剂和肥料. J Appl Phycol 25:1225–1235
- Lan S, Wu L, Zhang D, Hu C (2011) Shapotou region (China) 生物土壤结皮的演替阶段及其微观结构变异性. 环境科学 65: 77–88
- Lan S, Wu L, Zhang D, Hu C (2013) 评估具有生物指标的生物土壤结皮的发育水平和演替阶段. 微生物 Ecol 66: 394–403
- Lauenroth WK, Sala OE (1992) 北美短草草原的长期牧草生产. Ecol Appl 2:397–403
- Layek J, Das A, Idapuganti RG, Sarkar D, Ghosh A, Zodape ST, Lal R, Yadav GS, Panwar AS, Ngachan S, Meena RS (2017) 海藻提取物作为有机生物刺激剂可改善东部水稻的生产力和稻米质量喜马拉雅山. J Appl Phycol 30:547–558
- 刘燕, 潘琦, 郑胜, 白燕, 汉霞 (2012) 季内降水量和格局对内蒙古两种优势种的初级生产力产生差异影响. 埃科·埃科尔 44: 2–10
- 刘建, 张 Y, 冯伟, 秦胜, 王凌, 余薇 (2016a) 外源性添加剂对土壤生物结皮培养的影响 (中文, 英文摘要). 北京大学学报 38: 100–107
- 刘 J, 张 Y, 秦 S, 冯 W, 孙 Y, 王 L, 白 Y (2016b) 沙蒿 (*Artemisia sphaerocephala* Krasch) 的固沙实验. 不同浓度的口香糖 (中文, 英文摘要). Trans Chin Soc Agric Eng 32:149–155
- Liu P, Zha T, Jia X, Wang B, Guo X, Zhang Y, Wu B, Yang Q, Peltola H (2016c) 日冻融循环改变了沙漠灌丛生态系统的冬季土壤呼吸. 森林 7: 161
- Lötze E, Hoffman EW (2015) 三种基于南非的商业海藻生物刺激剂的各种生物活性化合物的营养成分和含量. J Appl Phycol 28:1379–1386
- Maestre FT, Martin N, Diez B, Lopez-Poma R, Santos F, Luque I, Cortina J (2006) 浇水, 施肥和接种泥浆促进退化土壤中生物结皮功能的恢复. 微生物 Ecol 52: 365–377
- Mansori M, Chernane H, Latique S, Benaliat A, Hsissou D, El Kaoua M (2014) 海藻提取物对豆类植物水分缺乏和抗氧化机制的影响 (菜豆). J Appl Phycol 27:1689–1698
- Mzibra A, Aasfar A, El Arroussi H, Khouloud M, Dhiba D, Kadmiri IM, Bamouh A (2018) 从摩洛哥海藻中提取的多糖: 番茄植物生长促进剂的有希望来源. J Appl Phycol 30:2953–2962
- Nelson DW, Sommers LE, Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME (1996) 总碳, 有机碳和有机物. 方法土壤学 9: 961–1010
- Pietrasiak N, Regus JU, Johansen JR, Lam D, Sachs JL, 圣地亚哥 LS (2013) 生物土壤地壳群落类型在关键生态功能上有所不同. 土壤生物化学 65: 168–171

Pramanick B, Brahmachari K, Mahapatra BS,
Ghosh A, Ghosh D, Kar S (2017) 马铃薯块
茎的生长, 产量和质量提高

- 通过应用海藻衍生的海藻汁
Kappaphycus alvarezii. *J Appl Phycol* 29:3253–3260
- Robertson TR, Bell CW, Zak JC, Tissue DT (2009) 在奇瓦瓦沙漠草原上, 降水时间和强度差异影响三种多年生树种的地上年净初级生产力. *新植物* 181: 230–242
- Rouphael Y, De Micco V, Arena C, Raimondi G, Colla G, De Pascale S (2016) 大盐海藻提取物对在盐渍条件下生长的西葫芦南瓜的产量, 矿物质组成, 气体交换和叶片解剖的影响. *J Appl Phycol* 29:459–470
- Sala O, Lawenroth W, Parton W (1992) 短草草原的长期土壤水分动力学. *生态学* 73: 1175–1181
- Salviagioti F, Cassman KG, Specht JE, Walters DT, Weiss A, Dobermann A (2008) 大豆中氮的吸收, 固着和对氮肥的响应: 综述. *田间作物水库* 108: 1–13
- Sathya B, Indu H, Seenivasan R, Geetha S (2010) 海藻液体肥料对Le-gume作物的生长和生化成分的影响, *Cajanus cajan* (L.) Mill sp. *J植物学* 2: 50–63
- Shaw MR, Zavaleta ES, Chiariello NR, Cleland EE, Mooney HA, Field CB (2002) 草原对全球环境变化的反应被CO₂升高所抑制. *科学* 298: 1987–1990
- Shipley B (2000) 生物学中的原因和相关性: 生物学中的相关性: 路径分析, 结构方程式和因果推断的用户指南. *Q传记* 82: 646–649
- Singh S, Singh MK, Pal SK, Trivedi K, Yesuraj D, Singh CS, Anand KGV, Chandramohan M, Patidar R, Kubavat D, Zodape ST, Ghosh A (2015) 通过雨养玉米的产量和质量的可持续提高紫心*Jcil*和*Kappaphycus alvarezii*海藻汁. *J Appl Phycol* 28:2099–2112
- Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, Soltanpour PN, Tabatabai MA, Johnston CT, Sumner ME (1996) 土壤分析方法. 第3部分—化学方法. 麦迪逊美国农艺学会
- 华盛顿州斯特尔克 (Stirk WA), 塔尔科斯卡 (Tarkowskád), 图雷佐夫 (TurečováV), 斯特拉纳德 (Strnad M), 范·斯塔登J (van Staden J) (2013) *Kelpak*®中的脱落酸, 赤霉素和油菜素甾体, 这是一种从海参中提取的商业海藻提取物. *J Appl Phycol* 26:561–567
- 孙永明, 张NN, 王恩特, 袁红莲, 杨建胜, 陈文兴 (2009) 间作和间作加根瘤菌接种对苜蓿和西伯利亚苜蓿根际微生物活性和群落组成的影响野生黑麦 (*Elymus sibiricus* L.)。 *FEMS微生物Ecol* 70: 62–70
- 孙燕, 张燕, 冯伟, 秦胜, 刘Z, 白燕, 严荣, Fa K (2016) 干旱灌木对中国北方沙漠土壤微生物群落的影响. *植物土壤* 414: 281
- 范德莫伦MK, 多尔曼·阿杰, Ciais P, Eglin T, Gobron N, Law BE, Meir P, Peters W, Phillips OL, Reichstein M, Chen T, Dekker SC, DoubkováM, Friedl MA, Jung M, van den Hurk BJM, de Jeu RAM, Kruijt B, Ohta T, Rebel KT, Plummer S, Seneviratne SI, Sitch S, Teuling AJ, van der Werf GR, Wang G (2011) 干旱和生态系统的碳循环. *农业用陨石* 151: 765–773
- Voronin PY, Black CC (2005) 在其全球循环的有机分支中, 光合碳固存的重要性和位置. *拉斯J植物生理* 52: 69–76
- Wang W, Liu Y, Li D, Hu C, Rao B (2009) 蓝细菌接种在荒漠地区生物土壤结皮形成中的可行性. *土壤生物化学* 41: 926–929
- Watt MS, Palmer DJ (2012) 使用回归克里格法开发了新西兰的碳氮比表面. *Geoderma* 183–184: 49–57
- 魏永科, 高永宝, 徐辉, 苏丹, 张X, 王玉华, 林芳, 陈丽, 聂丽丽, 任亚珍 (2006) 中国北方草丛中内生菌的发生. *草料科学* 61: 422–429
- 魏Y, 郭康, 陈健 (2008) 降水方式对西北部库布其沙漠土壤水分补充的影响. *J植物生态学报* 32: 1346–1355
- Weltzin JF, Loik ME, Schwinning S, Williams DG, Fay PA, Haddad BM, Harte J, Huxman TE, Knapp AK, Lin G (2003) 评估陆地生态系统对降水潜在变化的响应. *AIBS公牛* 53: 941–952
- 武力, 兰升, 张东, 胡昌 (2011) 藻类的小尺度垂直分布和地衣土壤结壳的结构. *微生物学* 62: 715–724
- Wythers K, Lauenroth W, Paruelo J (1999) 在半干旱田间条件下的裸土蒸发. *《美国土壤科学杂志》* 63: 1341–1349
- 张兵, 朱健, 潘Q, 刘燕, 陈珊, 陈丹, 严燕, 窦珊, 汉信 (2017) 草原物种对降水量和格局变化的响应不同. *环专家* 137: 166–176
- 赵燕, 徐明, 王青, 邵明 (2006) 生物土壤结皮对黄土丘陵区退耕还草草地土壤理化性质的影响. *自然资源杂志* 21: 441–448
- 朱荣全, 张中生, 刘丽香, 惠润, 张红, 包建堂 (2015) 中国沙坡头干旱荒漠边缘的7种沙生植物的适应机制. *中华医学杂志* 34: 2749–2756
- 庄伟, 唐宁A, 张Y (2015) 西北温带沙漠地区生物土壤结皮对土壤和维管束植物15N迁移的影响. *植物生态学报* 8: 420–428
- 发行人的注释Springer Nature对于已发布地图和机构隶属关系中的管辖权主张保持中立。