

贾鸿飞,贾荣亮,吴秀丽,等.干旱沙区生物结皮对土壤膨胀的影响[J].中国沙漠,2023,43(2):28-36.

干旱沙区生物结皮对土壤膨胀的影响

贾鸿飞^{1,2},贾荣亮¹,吴秀丽³,赵芸¹,刘立超¹,
高艳红¹,杨昊天¹,张甜¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙坡头沙漠研究试验站,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.银川知微生物科技有限公司,宁夏 银川 750200)

摘要:土壤膨胀通过改变土壤结构和水文过程影响土壤系统抵抗力和恢复力。生物结皮可以加速土壤形成,改变土壤理化性质,但生物结皮的形成和发育过程如何影响土壤膨胀还不清楚。本文借助空间取样替代时间的方法和模拟降水(0、1、3、5、10 mm)法,以腾格里沙漠南缘4个年代的固沙植被带(64、39、33、0年)的5种演替阶段的生物结皮(蓝藻、藻-地衣混生、真藓、土生对齿藓和齿肋赤藓)及其土壤为研究对象,旨在阐明生物结皮的形成和发育过程对土壤膨胀的影响及其对降水的响应。结果表明:(1)生物结皮的形成增加了土壤膨胀高度,结皮后土壤的平均膨胀高度是流沙的94倍,平均0.939 mm;(2)不同演替阶段生物结皮均随着其发育年龄的增加显著增加土壤膨胀高度($P<0.05$),主要体现在两个方面,在同一植被区,从初级阶段到高级阶段生物结皮的膨胀高度逐渐增加($P<0.05$),其中土生对齿藓结皮最显著,同一种结皮在不同植被区,随植被年龄的增加,发育39年的生物结皮膨胀高度增加最显著,其中以藻-地衣混生结皮最显著($P<0.05$);(3)降水量增加显著增加生物结皮覆盖下土壤的膨胀高度($P<0.05$),藓类结皮对降水量的敏感性最强,特别是对3 mm以内的降水;(4)冗余分析表明生物结皮演替阶段是干旱沙区土壤膨胀的最关键因子(RDA 1:88.21%,RDA 2:6.49%)。

关键词:土壤膨胀;生物结皮;结皮演替;腾格里沙漠

文章编号: 1000-694X(2023)02-028-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00111

中图分类号: S152.9

文献标志码: A

0 引言

胀缩性是土壤的重要物理性质,即土壤在干湿交替中表现出的土壤容积变化的现象^[1]。土壤膨胀会引起土壤总孔隙度增加、孔径减小、膨胀压增大,显著影响生态水文过程,如影响土壤的水分入渗和保水能力及工程建设、生态保护和农业种植^[2-4]。当前,土壤膨胀的研究集中于土壤膨胀影响因素^[5]、胀缩特性^[6-9]、膨胀曲线的分析^[10]。涉及到的土壤类型以分布于东南沿海地区及高寒草原地区的黏土和壤土为主^[11-14],对于干旱沙区的风沙土土壤膨胀研究较少。干旱沙区的土壤高度变化会明显改变干旱沙区土壤的微地貌,可能造成土壤侵蚀的发生、生态水文过程和植物群落分布格局的改变^[15]。在干

旱沙区引起土壤膨胀的原因包括环境、生物以及土壤自身的结构、组成等因素,其中降雨使土壤中黏粒吸收水分,体积变大,而成为土壤膨胀的主导因素^[5]。生物因素方面主要受到植物、动物和微生物等影响。土壤动物的运动可以明显改变土壤结构,植物通过根系分泌物对土壤膨胀也具有一定影响。植物固沙是建立以旱生灌木为主的植被恢复体系来进行沙区生态重建和沙害防治的方法,植物固沙可改变土壤结构与性质,如增加土壤电导率、有机碳含量、碳氮比以及恢复能力,促进生物结皮的形成和发育^[16-18]。

生物结皮是由藻类、真菌、地衣和苔藓等生物组成的复合体,是旱地生态系统的重要组成部分,在全球70%的干旱和半干旱环境均有分布,对于旱

收稿日期:2022-05-11; 改回日期:2022-07-30

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目(2019GG008);国家自然科学基金项目(41971142);宁夏回族自治区农业科技自主创新资金项目(NGSB-2021-14-04)

作者简介:贾鸿飞(1998—),天津人,硕士研究生,研究方向为环境科学、生态学。E-mail: 575389060@qq.com

通信作者:贾荣亮(E-mail: rongliangjia@163.com)

半干旱生态环境有着重要作用^[19-20]。在干旱沙区,生物结皮改变了土壤表面粗糙度、孔隙度以及土壤质地,能防风固沙,并有效地增强土壤抗侵蚀的能力^[21-22]。王国鹏等^[1]发现,生物结皮对风沙土膨胀产生促进作用,对黄绵土膨胀存在抑制作用;Wang等^[23]的研究表明土壤膨胀明显受生物结皮的演替阶段影响,藓类结皮的膨胀性要明显大于蓝藻结皮。生物结皮作为干旱沙区地表重要的生态系统工程师,同一演替阶段的生物结皮,发育时间的长短会有差异,它在形成和发育过程如何影响土壤膨胀,是否可以通过土壤膨胀影响生态系统还不清楚,因此需要了解不同发育时间下生物结皮层及其下层的土壤膨胀的变化及影响因素^[2-3,16]。

宁夏沙坡头地区从20世纪50年代开始致力于固沙工作,在腾格里沙漠东南缘不同演替阶段的植被区分布有完整演替序列的生物结皮,各种生物结皮也随着固沙植被的演替生长发育,是研究生物结皮影响土壤膨胀的理想试验场^[16]。本文对腾格里沙漠不同年代的固沙植被下发育的生物结皮进行采样,以代替生物结皮的发育时间,分析了64年来不同发育时间下、5种演替阶段的生物结皮在不同降水条件下对土壤膨胀的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域

试验区域为沙坡头沙漠研究试验站的荒漠生态系统综合观测场的人工植被固沙区^[24]。研究区域地处腾格里沙漠东南缘的宁夏回族自治区中卫市境内(37°27'N、104°57'E,海拔1 250 m),多年平均降雨量186 mm,集中在6—8月,年蒸发量3 000 mm,年平均气温9.6 °C,年平均风速2.8 m·s⁻¹,属于草原化荒漠地带^[16]。该区主要的景观类型是高大密集的格状沙丘,沙丘多以流动沙丘形式存在,沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布。土壤以钙积正常干旱土与砂质新成土为主^[16]。天然植被以花棒(*Corethroedendron scoparium*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和百花蒿(*Stilpnolepis centiflora*)为主。人工固沙植被以柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)为主,最终形成人工-自然混合固沙植被生态系统^[21]。

由于人工固沙的开展,土壤表面被盖度高达90%以上的结皮覆盖,主要物种类型中,藻类包括

鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、双尖菱板藻(*Hantzschia amphioxys*)、隐头舟形藻(*Navicula cryptocephala*)等藻类,藓类包括真藓(*Bryum argenteum*)、土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)、齿肋赤藓(*Syntrichia caninervis*)等,地衣类包括球胶衣(*Collema cocophorum*)、坚韧胶衣(*Collema tenax*)、石果衣(*Endocarpon pusillum*)等^[21]。以区域内人工植被固沙区的生物结皮层及其下覆盖土壤作为研究对象进行试验。

1.2 试验方法

2020年8月,以发育了64、39、33年的人工固沙植被区和流沙作为研究样地,代表生物结皮的发育时间,在每个植被区分别选择的蓝藻、藻-地衣混生、真藓、土生对齿藓和齿肋赤藓以及下层土壤为研究对象进行试验。沿3个植被演替阶段在植被区随机设置3条样线,每条样线包含3个年代的人工固沙植被区样点和流沙区样点,每条样带延伸至附近流沙区各1个流沙样地,在样点内调查结皮类型、盖度和厚度。

土壤膨胀高度变化可以较好地反映干旱沙区土壤的微地貌^[15],参考Kirby等^[25]的方法,本文以土壤膨胀高度作为测量指标。在野外直接测量,以还原生物结皮在野外生长的最佳状态,样点内每种结皮分别选取3个样方进行试验(10 cm×10 cm,样方内结皮盖度为100%,且结皮处于发育良好、未受到破坏的自然状态),试验都选在坡度和高度相近的迎风坡取样(结皮发育好,种类多,具有较好的代表性)^[26]。将一根细长铁丝插入生物结皮内部,标记模拟降水前的结皮位置。每种演替阶段生物结皮分别模拟降水量为0、1、3、5、10 mm的5种降水量(分别相当于0、10、30、50、100 mL)。模拟降水在10 cm×10 cm的样方内均匀进行。模拟降水后,5~15 min内在铁丝上标记生物结皮膨胀的最大高度,测量膨胀前后标记的高度差即为膨胀高度^[25,27]。测量时选择在风速较小、地面完全干燥的条件下进行。

1.3 数据处理与分析

使用SPSS Statistics 24(SPSS, Chicago, LI, 美国)软件分析数据,分析各个年代的每个生物结皮类型的土壤膨胀高度(H)与降水量(P)之间的线性关系,得到普遍规律。采用单因素方差(ANOVA)中的最小显著性差异法(LSD)分析不同演替年代、

不同种类结皮的土壤膨胀高度(H)的差异,并进行绘图。

使用 Origin 2021 (Origin Lab, 美国) 软件, 将各个年代的每个生物结皮类型的土壤膨胀高度与降水量采用对数函数进行回归分析并绘图, 得到土壤膨胀高度与降水量之间呈对数函数的关系, 符合如下公式:

$$H = a - b \ln(P + c) \quad (1)$$

使用 MATLAB R2018b (MathWorks, USA) 对拟合方程(1)进行求导, 并求出导数在不同降水量下的取值, 即为拟合方程(1)的切线斜率 K , 通过对斜率的比较, 判断土壤膨胀高度对降水量的敏感性大小。

使用 Origin 2021 (Origin Lab, USA) 软件下的 Redundancy Analysis 软件包对土壤膨胀高度数据根据生物结皮演替阶段、结皮厚度、结皮盖度和植被年龄进行冗余分析并绘图。将每个发育阶段生物结皮的土壤膨胀数据, 以不同发育时间的生物结皮盖度为权重进行加权计算, 得到不同年代下生物结皮土壤膨胀的综合结果。腾格里沙漠地区的生物结皮类型与盖度如表1所示^[28-29]。

表1 沙坡头人工固沙植被不同演替阶段生物结皮盖度
Table 1 Biocrust coverages of different succession years at Shapotou Desert ecosystem comprehensive observation site

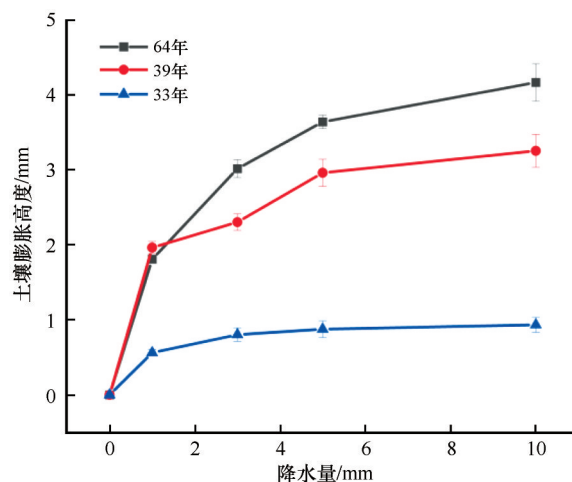
生物结皮 发育时间 /a	盖度/%				
	蓝藻 结皮	藻-地衣 结皮	真藓 结皮	土生对齿 藓结皮	齿肋赤 藓结皮
0	0	0	0	0	0
33	16	23.9	50.9	0	0
39	1.3	32.5	58.4	2.5	1.2
64	0	29.3	63.1	1.9	0.9

2 结果

2.1 不同年龄固沙植被区生物结皮对土壤膨胀高度的影响

将土壤膨胀高度根据不同发育时间的结皮盖度作为权重进行计算得到图1, 结皮发育时间越久, 土壤膨胀高度变化越显著。以真藓为例, 发育64年的真藓结皮在10 mm降水量的条件下的土壤膨胀高度可达1.373 mm, 发育39年和33年的真藓结皮在相同条件下的土壤膨胀高度分别为1.113 mm和

1.000 mm。根据经权重计算下的曲线(图1), 发育33年的结皮比发育39年和64年的结皮膨胀高度在同一降水量下有明显的降低。



图中值为平均值±标准误差(SE), 均值以不同年代植被区生物结皮盖度为权重对土壤膨胀高度进行加权计算所得

图1 生物结皮作用下不同发育时间固沙植被区土壤膨胀高度随降水量变化的曲线

Fig.1 Curves of soil swelling height with precipitation in the sand-fixing vegetation area at different development times under the action of biocrusts

生物结皮对土壤膨胀高度的增加程度随着固沙植被的发育年龄而愈加显著($P < 0.05$, 图2)。主要体现在两个方面, 在同一植被区, 生物结皮的膨胀高度从初级阶段到高级阶段逐渐增加($P < 0.05$), 土生对齿藓结皮最显著, 在3个植被区中, 土生对齿藓结皮的平均土壤膨胀高度均是最高分别为1.327、1.304、1.316 mm。同一种结皮在不同植被年龄, 随

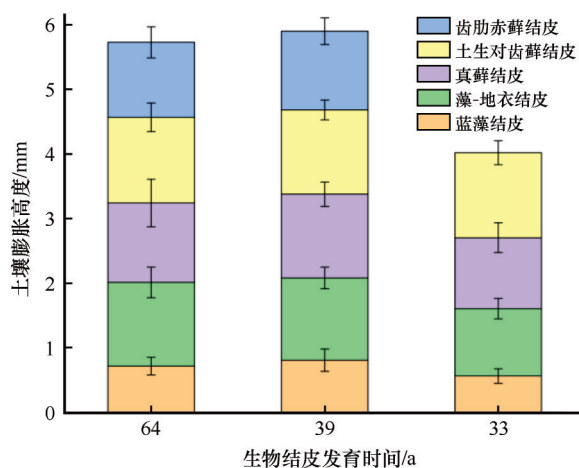


图2 不同发育时间固沙植被区生物结皮对土壤膨胀高度的影响

Fig.2 Influence in mean soil swelling height of biocrusts in the sand-fixing vegetation area at different development times

植被年龄的增加,发育39年的生物结皮膨胀效果最显著,这种增加藻-地衣混生结皮最显著,其膨胀高度较发育33年增加了0.198 mm。

2.2 不同类型生物结皮覆盖土壤膨胀高度变化特征

土壤膨胀高度变化随降水量的增加而增加,线性拟合的 R^2 大于0.85,拟合程度较高(图3)。其中蓝藻结皮的斜率为 0.055 ± 0.021 ,截距为 $0.229\pm$

0.029 ;藻-地衣混生结皮的斜率为 0.107 ± 0.026 ,截距为 0.325 ± 0.009 ;真藓结皮的斜率为 0.095 ± 0.026 ,截距为 0.380 ± 0.131 ;土生对齿藓的斜率为 0.102 ± 0.014 ,截距为 0.400 ± 0.052 ;齿肋赤藓的斜率为 0.081 ± 0.009 ,截距为 0.408 ± 0.011 。蓝藻相较于其他4种结皮类型的斜率和截距偏低,演替64年的固沙植被区的生物结皮线性拟合方程的斜率比其他年代线性拟合方程普遍较高。

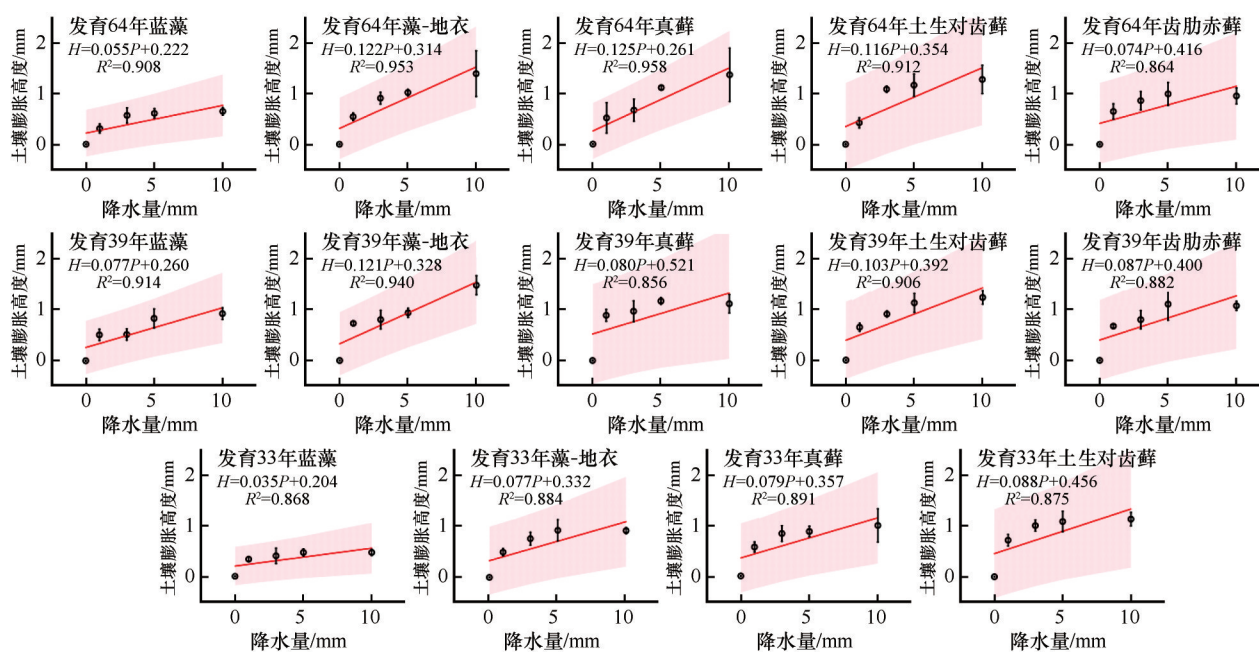


图3 土壤膨胀高度与降水量的线性拟合

Fig.3 Linear fitting between soil swelling height and precipitation

5种生物结皮的土壤膨胀高度随降水量呈对数变化关系(图4),拟合方程的 R^2 都大于0.87,方程拟合度较高。随着固沙植被的演替,5种生物结皮的土壤膨胀高度增加速率随着降水量的增加而降低,藓类、地衣类结皮较藻类结皮的土壤膨胀对降水的响应更敏感,低降水量时(小于3 mm),土壤膨胀高度的变化更敏感。

土壤膨胀高度随降水量变化的拟合曲线的一阶导数递减(表2),说明当土壤水分含量越高时,土壤膨胀高度对降水量变化的响应越弱。在雨后或者湿润的土壤中重复上述试验,土壤膨胀高度明显比上述试验中干燥土地状态下的土壤膨胀高度低。在降雨后的土壤中,即土壤水分接近饱和时,土壤膨胀高度随降水量几乎没有明显的对应关系。

2.3 干旱沙区土壤膨胀高度影响因素

根据冗余分析结果可知(图5),生物结皮演替

阶段、结皮厚度、结皮盖度和结皮发育时间与土壤膨胀性之间都具有明显的正相关性($P<0.05$),生物结皮演替阶段的影响最明显、结皮盖度的影响其次,结皮厚度和结皮发育时间的影响最小。4个环境因子之间是正相关关系,生物结皮演替阶段、结皮厚度、结皮盖度和结皮发育时间都可以明显增加土壤膨胀的高度。

3 讨论

3.1 生物结皮对干旱沙区土壤膨胀的影响

本研究结果表明,生物结皮覆盖的土壤在不同降水条件下都有着一定程度的膨胀,膨胀高度与降水量呈对数函数关系。蓝藻、藻-地衣混生、真藓、土生对齿藓和齿肋赤藓5种生物结皮都可以明显增加土壤膨胀的高度,藻类结皮的土壤膨胀高度较低,地衣类、藓类结皮较藻类结皮膨胀高度增加显

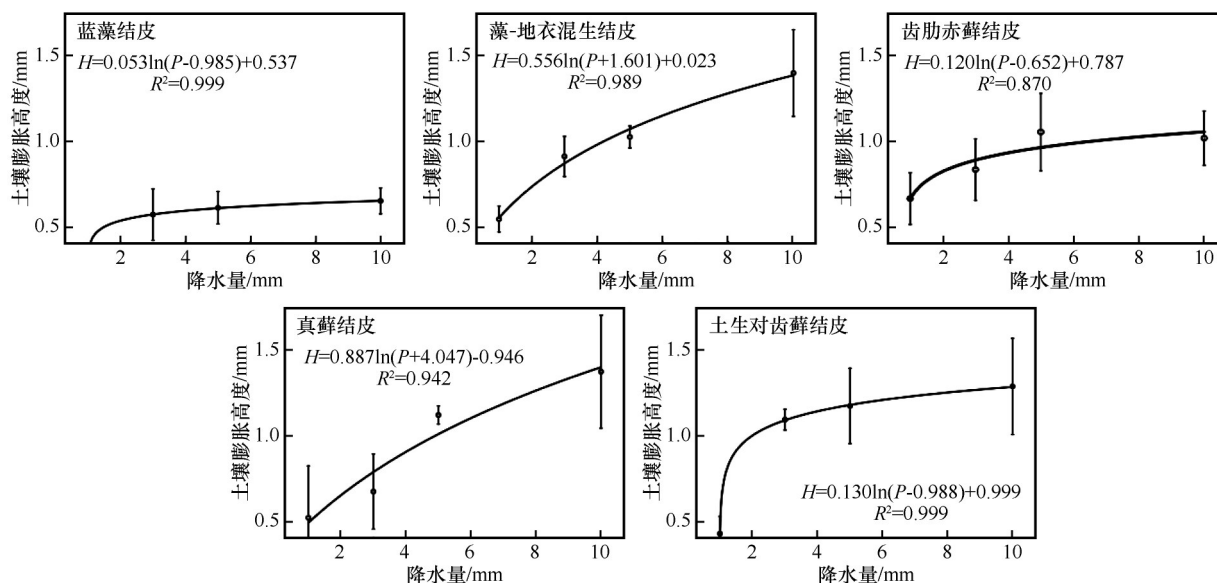


图4 不同生物结皮类型的土壤膨胀高度随降水量变化的曲线对比

Fig.4 Comparison of curves of soil swelling height with precipitation for different biocrust types

表2 拟合曲线斜率在不同降水量下的取值

Table 2 The value of the slope of the fitted curve under different precipitation

结皮类型	固沙植被发育 时间/a	降水量/mm				
		1	2	3	5	10
蓝藻结皮	64	3.533	0.052	0.026	0.013	0.005
	39	0.080	0.070	0.062	0.051	0.035
	33	0.120	0.032	0.019	0.010	0.005
藻-地衣混生结皮	64	0.214	0.154	0.121	0.084	0.048
	39	0.087	0.087	0.087	0.086	0.085
	33	0.904	0.093	0.049	0.025	0.011
真藓结皮	64	0.176	0.147	0.126	0.098	0.063
	39	0.167	0.060	0.036	0.020	0.010
	33	0.460	0.093	0.052	0.027	0.013
土生对齿藓结皮	64	10.833	0.129	0.065	0.032	0.014
	39	0.289	0.134	0.087	0.051	0.025
	33	1.377	0.079	0.041	0.021	0.009
齿肋赤藓结皮	64	1.933	0.056	0.029	0.014	0.006
	33	0.211	0.100	0.065	0.038	0.019

著。这与王国鹏等^[1]研究结果大致相同,他们发现风沙土上藓结皮的膨胀率为1.93%,较无结皮增加了8.65倍。本研究中土壤膨胀高度受生物结皮覆盖的影响明显,在不同降水条件下结皮形成后较结皮形成前(流沙)的平均膨胀高度提高了94倍。蓝藻结皮的土壤膨胀高度对降水量变化的响应明显低于其他4种生物结皮。在模拟降水的过程中,蓝

藻结皮表面的降水难以下渗,容易形成径流流向地势低洼处。有些黏质蓝藻在降雨后其体积可以迅速膨胀,表层土壤孔隙度迅速减小,关闭了土壤表面水分的下渗通道^[19]。沙坡头地区人工固沙植被的建立促进了生物结皮的形成和发育,增加了表层的土壤肥力和持水能力^[19]。另一方面,蓝藻结皮是植被演替初期的地表覆盖物,随着结皮发育时间的

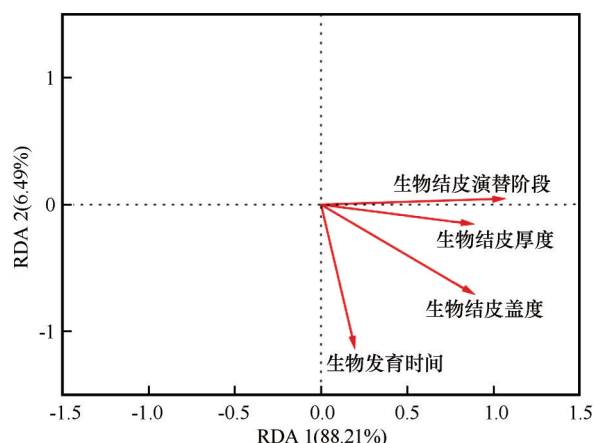


图5 影响土壤膨胀因素的冗余分析

Fig.5 Redundant analysis of factors affecting soil swelling

增加,土壤中可吸水膨胀的黏粒含量逐年增加,表层土壤的持水能力随着植被发育时间的增加而逐年增加,蓝藻结皮相较于地衣及藓类结皮的发育时间短,土壤黏粒含量较少,土壤持水能力较弱,土壤膨胀能力远低于地衣及藓类结皮。这与 Kidron 等^[30]关于蓝藻的研究结果大致相同。

土壤膨胀过程随降水量的变化大致可分为3个阶段:快速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段、膨胀稳定阶段^[31]。在快速膨胀阶段,膨胀高度随降水量变化的响应较敏感。土壤膨胀高度的增加在快速膨胀阶段最为明显,造成这种现象的主要原因是干旱沙区年降雨量较低且集中在夏季,生物结皮对降水极为敏感。在腾格里沙漠地区,地表长时间处于干旱状态,生物结皮处于一种耐旱的生长状态。结皮对3 mm以下的降水事件较为敏感,土壤吸水能力强膨胀迅速。同时生物结皮中的黏土颗粒在湿润状态下膨胀后会降低土壤的孔隙度,抑制土壤水分的入渗^[19]。在5 mm以上的降水条件下土壤膨胀高度趋于稳定,最终保持在1.400 mm的高度以内。

3.2 生物结皮影响干旱沙区土壤膨胀的可能机理

干旱沙区的土壤以钙积正常干旱土与砂质新成土为主,土壤黏粒含量低,且土壤颗粒松散、流动性强,自然条件下无法聚集形成土壤结构,膨胀性极弱^[1]。土壤膨胀的能力随着黏粒含量的增加而提升,高黏粒含量的土壤具有较低的通气、透水性能,保水保肥性能强,具有较高的土壤胀缩性^[32]。生物结皮是干旱沙区生态系统的重要组成成分,土壤黏粒的含量随生物结皮发育时间的增加而逐年增加,在发育64年的生物结皮土壤中,黏粒含量的增加可

以明显增加土壤的膨胀性能^[33]。同时生物结皮产生大分子的胞外聚合物以及多糖等,这些大分子的物质改变了土壤的组成和结构,进而改变土壤膨胀的能力。Toledo等^[26]的研究表明,土壤有机碳含量越高,土壤膨胀的能力越强,生物结皮可以明显增加土壤有机碳的含量^[34],从而增加土壤膨胀的能力。沙坡头地区人工固沙植被经历了64年的演替,土壤中植物残体含量随年代显著增加,土壤微生物的分解作用将植物残体分解为小分子有机质,土壤中有有机质的含量随年代显著增加。

土壤膨胀还与土壤中阳离子的含量有关,当 Na^+ 、 K^+ 含量较高时,土壤膨胀较为明显。不同演替阶段生物结皮在土壤表层富集 Cl^- 、 K^+ 等土壤养分存在差异,因此探究生物结皮土壤中阳离子含量对土壤膨胀的影响是今后研究的重点^[35]。此外,季节变化、温度变化、全球气候变暖、降水格局等外界条件也会改变土壤膨胀的能力。增温和减雨的叠加效应会降低藓类结皮的生物量,同时土壤团聚体类型不同的土壤类型的温度敏感性不同^[36-37]。另一方面,全球 CO_2 水平的升高会导致土壤中有机质含量的增加,土壤中有有机质的增加可以提高土壤膨胀的能力^[18,26,38]。

土壤的沙埋程度也会一定程度上影响土壤膨胀的变化。沙埋的厚度会影响生物结皮对降水的吸收与利用,沙埋本身对降水的吸收作用会减少生物结皮直接接触的降水,同时沙埋的存在是否对土壤中黏粒和有机质等含量存在一定的影响,在一定程度上会改变对土壤膨胀高度随降水量的变化关系,因此沙埋对土壤膨胀高度的影响是今后的潜在研究方向。本研究在模拟降水的过程中,仅考虑了土壤膨胀高度对降水量的响应,并未考虑降水强度的影响。在不同的降水强度条件下,5种生物结皮土壤膨胀对于降水量的响应机制也可能会发生变化。

3.3 生物结皮影响干旱沙区土壤膨胀的生态学意义

土壤的胀缩性与土壤结构的形成发育及土壤的吸水性、导水性相关。土壤中含有特定类型的膨胀性黏土颗粒,在润湿时膨胀,在干燥时收缩,结构变化明显,容易造成土壤的结构破坏^[9]。干旱沙区的土壤高度变化会明显改变干旱沙区土壤的微地貌,微地貌的改变会造成生态水文过程和植物群落分布格局的改变^[15]。土壤膨胀时土壤颗粒之间

的孔隙度下降,土壤中的养分、水分等物质在土壤膨胀时的传输速度变慢,降水无法下渗,汇聚在地表形成径流,深层土壤无法得到充足的水分。在干旱沙区,土壤含水量对生物结皮的发育起决定性的作用,土壤的胀缩性影响着土壤中水分的再分配,间接影响植被的演替过程,植被演替又在一定程度上影响着土壤的胀缩性。

生物结皮影响土壤膨胀是生物结皮发挥其生态系统功能的途径。腾格里沙漠生物结皮覆盖下土壤膨胀高度对降水量变化的响应敏感度表明,生物结皮可以有效地黏化土壤,使水分固定在土壤的表层。生物结皮通过对土壤膨胀的影响可以改变地表的土壤环境,为土壤中的微生物等提供充足的资源与生存环境^[39]。生物结皮的形成可以改变降水入渗的过程,也势必会影响土壤生物在降水时的生活习惯,对于干旱沙区生态环境的改变存在可能,对于干旱沙区的生态管理与生态重建具有重要意义。

4 结论

与流沙地表的土壤膨胀相比较,生物结皮覆盖的土壤在不同降水条件下都有着一定程度的膨胀,膨胀高度随降水量的变化大致呈对数函数的关系。但是这种膨胀与生物结皮的发育时间与发育阶段相关。

生物结皮的形成增加了土壤膨胀高度,生物结皮的发育时间增加了土壤膨胀的敏感性,并且在生物结皮覆盖下土壤膨胀高度随降水量的增加而增加,其中藓类结皮的敏感性最强。在3 mm降水量以内,土壤膨胀高度的变化更敏感。

在同一植被区,生物结皮的膨胀高度从初级阶段到高级阶段逐渐增加。

冗余分析的结果表明生物结皮对于干旱沙区土壤膨胀的影响程度由大到小分别是生物结皮演替阶段、结皮厚度、结皮盖度、固沙植被年龄。

参考文献:

- [1] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.生物土壤结皮对风沙土和黄绵土膨胀特性的影响[J].中国沙漠,2020,40(1):97-104.
- [2] 赵诚斋.土壤膨胀及其研究方法[J].土壤学进展,1982(2):1-12.
- [3] 邵丽媛,甘永德,苏辉东,等.土壤膨胀性对降雨入渗产流影响试验[J].中国农村水利水电,2018(11):42-47.
- [4] 王益.黄土高原土壤结构性状及影响因素分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2005.
- [5] 王益,王益权,刘军,等.黄土地区影响土壤膨胀因素的研究[J].干旱地区农业研究,2005(5):93-97.
- [6] 徐卫明,胡文奎,周阳,等.合徐合安高速公路膨胀土的胀缩特性[J].岩土工程界,2008(5):34-36.
- [7] 丁述理,贾东亮,杜海金,等.邯郸击实膨胀土的胀缩特性研究[J].建井技术,2005(增刊1):46-49.
- [8] 黄传琴.干湿交替过程中土壤胀缩特征的试验研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [9] Stell E, Guevara M, Vargas R. Soil swelling potential across Colorado: a digital soil mapping assessment[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 190: 103599.
- [10] 刘代全,李献民,胡伟.击实膨胀粘土变形曲线特征的研究[J].公路,2003(1):25-30.
- [11] 林敬兰.花岗岩崩岗红土层土体胀缩特性研究[J].水土保持学报,2019,33(2):87-92.
- [12] Guerra A M, Cui Y J, He Y, et al. Characterization of water retention, compressibility and swelling properties of a pellet/powder bentonite mixture [J]. Engineering Geology, 2018, 248: 14-21.
- [13] Li J S, Xue Q, Wang P, et al. Effect of lead (II) on the mechanical behavior and microstructure development of a Chinese clay [J]. Applied Clay Science, 2015, 105-106: 192-199.
- [14] 张同娟.黄土地区表层土壤结构状况与效应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
- [15] 司梦可,曹建生,阳辉.微地形变化对地表水文过程影响的研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(10):1587-1595.
- [16] 李新荣,周海燕,王新平,等.中国干旱沙区的生态重建与恢复:沙坡头站60年重要研究进展综述[J].中国沙漠,2016,36(2):247-264.
- [17] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
- [18] Terrer C, Phillips R P, Hungate B A, et al. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂ [J]. Nature, 2021, 591(7851):599-603.
- [19] 李新荣,谭会娟,回嵘,等.中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J].科学通报,2018,63(23):2320-2334.
- [20] 李新荣,张元明,赵允格.生物土壤结皮研究:进展、前沿与展望[J].地球科学进展,2009,24(1):11-24.
- [21] 赵芸,贾荣亮,滕嘉玲,等.腾格里沙漠人工固沙植被演替生物土壤结皮盖度对沙埋的响应[J].生态学报,2017,37(18):6138-6148.
- [22] 李金峰,孟杰,叶菁,等.陕北水蚀风蚀交错区生物结皮的形成过程与发育特征[J].自然资源学报,2014,29(1):67-79.
- [23] Wang L J, Zhang G H, Zhu L J, et al. Biocrust wetting induced change in soil surface roughness as influenced by biocrust type, coverage and wetting patterns [J]. Geoderma, 2017, 306: 1-9.
- [24] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J].中国科学院院刊,2017,32(7):790-797.

- [25] Kirby J M, Bernardi A L, Ringrose-Voase A J, et al. Field swelling, shrinking, and water content change in a heavy clay soil [J]. *Soil Research*, 2003, 41(5): 963–978.
- [26] Toledo M P S, Rolim M M, de Lima R P, et al. Strength, swelling and compressibility of unsaturated sugarcane soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 212: 105072.
- [27] Qi Wei, Wang C, Zhang Z Y, et al. Experimental investigation on the impact of drying-wetting cycles on the shrink-swell behavior of Clay Loam in Farmland [J]. *Agriculture*, 2022, 12(2): 245.
- [28] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 72–92.
- [29] 李新荣. 中国沙区生态重建与恢复的生态水文学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 502–508.
- [30] Kidron G J, Tal S Y. The effect of biocrusts on evaporation from sand dunes in the Negev Desert [J]. *Geoderma*, 2012, 179–180: 104–112.
- [31] 常帅斌, 陈明, 张虎元, 等. 陇东地区旱胜塬古土壤膨胀特性研究[J]. *铁道建筑技术*, 2020(9): 7–11.
- [32] 张永旺. 黄土丘陵区不同恢复植被下土壤蓄持水分能力及其调控[D]. 陕西杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [33] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(8): 1316–1326.
- [34] Kramarenko V V, El-Shinawi A, Matveenko I A, et al. Clay swelling of Quaternary and Paleogene deposits in the south-eastern flanks of West Siberian iron ore basin [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, 33(1): 012041.
- [35] 王芳芳, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(9): 1592–1602.
- [36] Li X R, Hui R, Zhang P, et al. Divergent responses of moss-and lichen-dominated biocrusts to warming and increased drought in arid desert regions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108387.
- [37] Bhattacharyya R, Ghosh A, Zhang Y, et al. Land use affects temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition in macroaggregates but not in bulk soils in subtropical Oxisols of Queensland, Australia [J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 198: 104566.
- [38] Nong X F. Effects of organic content on soil-water characteristic curve and soil shrinkage [J]. *Environmental Geotechnics*, 2019, 8(7): 442–451.
- [39] Chen Y W, Li X R. Spatio-temporal distribution of nests and influence of ant (*Formica cunicularia* Lat.) activity on soil property and seed bank after revegetation in the Tengger Desert [J]. *Arid Land Research and Management*, 2012, 26(4): 365–378.

Effects of biocrust on soil swelling in arid desert

Jia Hongfei^{1,2}, Jia Rongliang¹, Wu Xiuli³, Zhao Yun¹, Liu Lichao¹,
Gao Yanhong¹, Yang Haotian¹, Zhang Tian¹

(1. Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yinchuan Zhiwei Microbiology Technology Co., Ltd., Yinchuan 750200, China)

Abstract: Soil swelling affects soil system resistance and resilience by altering soil structure and hydrological processes. Biocrusts are important ecosystem engineers on the surface of arid sandy areas, which can accelerate soil formation and change soil physicochemical properties. But how the formation and development of biocrusts affect soil swelling is unclear. Our study use the method of spatial sampling instead of biocrusts' development time. Experiments were carried out on the biocrusts developed under the sand-fixing vegetation of different ages on the southern edge of the Tengger Desert. The sequence of the formation and succession of biocrusts was constructed (64, 39, 33 years and mobile sand dunes (0 years), the method of simulating precipitation (0, 1, 3, 5, 10 mm) was used to measure the biocrusts (*cyanobacteria*, algal-lichen mixed crust, *Bryum argenteum*, *Didymodon vinealis*, and *Syntrichia caninervis*) Variation in swell height under different precipitation conditions. The sequence of biocrust formation and succession was constructed to elucidate the expansion changes of biocrusts in five succession stages at different developmental times under different precipitation conditions. The results showed that: (1) the formation of biocrusts increased the soil swelling height, and the average swelling height of the soil after crusting was 94 times that of quicksand, with an average of 0.939 mm. (2) the biocrusts and the succession stages of the biocrusts were both With the increase of its developmental age, the soil swelling height increased significantly ($P < 0.05$), which was mainly reflected in two aspects. Among them, *D. vinealis* are the most significant. The same crust is in different vegetation areas. With the increase of vegetation age, the effect of increasing the expansion of biocrusts after 39 years of development is the most significant, and the increase of algal-lichen mixed crusts is the most significant. ($P < 0.05$). (3) The increase of precipitation significantly increased the swelling height of soil under the cover of biocrusts ($P < 0.05$). The biocrusts (moss crusts) in the high succession stage were most sensitive to precipitation, especially within 3 mm. (4) Redundancy analysis showed that the biocrust succession stage was the most critical factor for soil swelling in arid sandy regions (RDA 1: 88.21%, RDA 2: 6.49%). Our study revealed the changing trend of soil swelling under different successional stages of biological crusts and their developmental years, and explored the ways that biocrusts affect ecosystems by affecting soil swelling. It provides an important reference for a comprehensive understanding of the function of biocrusts to play an ecosystem.

Key words: soil swelling; biocrust; biocrust succession; Tengger Desert