

降雨对荒漠草原生物土壤结皮化学计量的影响

吴旭东, 俞鸿千, 蒋 齐, 王占军, 何建龙, 季 波, 许 浩

(宁夏农林科学院荒漠化防治研究所, 银川 750002)

摘 要: 生物土壤结皮是干旱地区地表景观的基本组成部分, 对生物地球化学循环具有重要影响。在中国北方荒漠化地区, 生物土壤结皮化学计量在很大程度上是未知的, 特别是降雨如何影响荒漠草原生物土壤结皮化学计量仍然不确定。该研究以自然降雨为对照, 通过使用遮雨棚和喷灌系统控制降水输入, 开展增水和减水处理野外控制性试验, 研究降雨量对荒漠草原生物土壤结皮化学计量的影响。试验结果表明: 1) 减水处理增加了结皮层 C:N、C:P 和 N:P 的比率, 增水处理增加了结皮层下垫面 C:N、C:P 和 N:P 比率; 2) 减水处理增大了结皮层与下垫面之间 C 含量的差异, 同时减小了 N 和 P 含量的差异, 增水处理增大了结皮层与下垫面之间 N 和 P 含量的差异, 减水处理有利于结皮层 C 的积累, 而增水后结皮层中磷的有效性降低; 3) 适宜的土壤水分条件促进了结皮层及下垫面土壤微生物生物量碳 (Soil Microbial Biomass Carbon, SMBC) 和土壤微生物生物量氮 (Soil Microbial Biomass Nitrogen, SMBN) 的积累, 而过高的降雨量导致土壤养分损失, 不利于 SMBC 和 SMBN 的积累。相对干旱的土壤环境有利于结皮层土壤 C、N 的富集, 为土壤微生物呼吸提供较多的营养物质, 有利于 SMBC 和 SMBN 的积累。总之, 在中国北方荒漠化地区, 生物土壤结皮和下垫面的 C:N:P 化学计量对降雨量有不同的响应。

关键词: 降雨; 土壤; 生物结皮; 化学计量; 荒漠草原

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.015

中图分类号: S153.6+21; S155.4+7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0118-07

吴旭东, 俞鸿千, 蒋齐, 等. 降雨对荒漠草原生物土壤结皮化学计量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 118-124.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.015 <http://www.tcsae.org>

Wu Xudong, Yu Hongqian, Jiang Qi, et al. Effects of precipitation on stoichiometry of biological soil crusts in a desert steppe of Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 118-124. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.015 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

由于自身的脆弱性, 广泛分布在中国干旱和半干旱地区的荒漠草原生态系统对极端干旱气候条件异常敏感^[1]。由苔藓、蓝细菌和地衣组成的生物土壤结皮(生物结皮)覆盖了整个干旱和半干旱地区地表景观的 35%^[2-3]。生物土壤结皮的发育和演替是干旱和半干旱生态系统土壤形成过程和土壤质量演变的关键因素^[4]。与此同时, 水分是干旱和半干旱地区生态过程的主要限制因素, 降水可以通过改变土壤的干湿条件直接影响土壤的生态过程^[2,5-7]。研究表明, 干旱和半干旱地区生物土壤结皮物种组成与降水变化之间存在紧密联系^[8]。生物土壤结皮可以适应和快速响应有限的土壤水分和低养分条件, 从而局部调节水文、土壤碳和氮的循环^[9-10]。生物土壤结皮容易受到气候变化的影响^[11], 考虑到生物土壤结皮对生态系统过程的重大影响, 认识生物土壤结皮应对气候变化的响应, 对预测干旱地区的生态状态变化至关重要。

21 世纪初, 国内外开展了针对热带沙漠、寒冷沙漠以及欧洲草原生物结皮的系列研究^[10,12-13], 但在温带荒漠

生态系统中广泛分布的生物土壤结皮的研究报道不足。近年来, 中国学者针对生物土壤结皮领域开展了一系列创新性研究, 涉及生物土壤结皮的形成、群落组成、时空分布、演替, 以及对环境胁迫的生理生态学响应^[8,14-18]。李新荣等^[19-22]针对生物土壤结皮与土壤生态、水文过程, 与维管植物和土壤动物关系, 对干扰响应和人工培养及在生态恢复中的应用开展了大量的研究, 补充和完善了生物土壤结皮在温性荒漠草原区的研究不足, 填补了相关认知空白, 促进了中国荒漠生态系统生态学和干旱区生态水文学的发展。

C:N:P 化学计量学是研究全球气候变化下植物-土壤相互作用的一种新方法, 也是一门基于元素比率研究生态过程和生态功能的学科^[10,18-19]。迄今为止, 人们对植物叶片元素之间的耦合协同作用关系的关注度很高^[10,21], 但针对生物土壤结皮化学计量特性的研究仍然缺乏明确的解释。生物土壤结皮可以固定碳、氮, 并影响养分循环, 这可能导致土壤化学计量的变化^[22]。从化学计量学的角度看, 干旱和半干旱地区生物土壤结皮对土壤养分的贡献可能更能揭示生物土壤结皮在生态系统中的作用。但这种推测尚未在陆地生态系统中, 特别是在荒漠草原生态系统中得到广泛验证。

随着全球环境变化和干旱区可持续发展研究的不断深入, 生物土壤结皮对全球干旱区生物地球化学循环的驱动机理是未来研究的重点^[10,19,23]。荒漠草原区降雨稀

收稿日期: 2019-12-31 修订日期: 2020-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400305); 宁夏回族自治区重点研发计划(引才专项)(2018BEB04016)

作者简介: 吴旭东, 博士, 副研究员, 主要从事退化草地生态恢复方面的研究。Email: wxd2008lovejz@126.com

少、分布不均匀、极端降雨频发，而生物土壤结皮能够改变降水入渗过程和土壤水分的再分配，地表生物土壤结皮可能受降水的影响限制土层间的养分交换。基于此，通过人为措施增加和减少降雨，开展降雨对生物土壤结皮及其下垫面土壤养分、C:N:P 化学计量及其驱动因素的相关研究，将有助于解析控制荒漠草原生态系统生物土壤结皮营养元素的动态机制和荒漠生态系统稳定性的维持机理。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘的宁夏回族自治区盐池县大水坑草原研究站（东经 106°58′，北纬 37°24′）。平均海拔 1 560 m，属于干旱和半干旱过渡带，典型的中温带大陆性气候，年平均气温为 7.5℃，降雨集中在 6—9 月，8 月份占总降雨量的 40% 以上，近 60 a 平均降雨量约为 298.3 mm，最大降雨量达到 582.8 mm，最小降雨量仅为 182 mm，蒸发量超过 2 700 mm，年平均无霜期是 164 d。土壤类型以易沙化的淡灰钙土和风沙土为主。自 2001 年以来，研究区一直处于围封状态。植被类型主要是沙生植被和荒漠植被。

1.2 试验设计

在试验站选取植被群落一致，地势平坦的地块，优势种有猪毛蒿（*Artemisia scoparia*）和蒙古冰草（*Agropyron mongolicum*），生物土壤结皮覆盖率为 30%~50%，主要由藻类和苔藓结皮组成，结皮层厚度为 3 cm，土壤类型为淡灰钙土（见表 1）。2018 年 3 月上旬，采用单因素完全随机试验，设置了 7 种处理：自然降雨（CK），减水处理（降雨量比自然降雨分别减少 1/2、1/3 和 1/4，用字母表示为 DW 1/2、DW 1/3 和 DW 1/4），增水处理（降雨量分别增加 1/2、1/3 和 1/4，用字母表示为 IW1/2、IW1/3 和 IW1/4），每种降雨处理设置 4 个 6 m×6 m 的重复小区，每个小区周围设置了 1 m 深隔水层，小区间设计 3 m 宽的缓冲区。减水处理小区上面采用不锈钢结构和带凹槽的透明塑料板对 1/2、1/3 和 1/4 的雨水进行遮雨处理形成减水区（减水量根据塑料板间隔宽度设置），遮雨收集的雨水汇集于 1 000 L 的装置中，利用水泵和喷灌系统将收集的雨水均匀喷洒至对应的增水 1/2、1/3 和 1/4 增水区，水分控制时间为 2019 年 3 月中旬到 9 月中旬，控制试验期累计降雨量为 289 mm，接近 60 a 平均降雨量。

表 1 试验区土壤养分基本情况

Table 1 Basic conditions of soil nutrients in the experimental area

土层 Soil layer /cm	C/(g·kg ⁻¹)	N/(g·kg ⁻¹)	P/(g·kg ⁻¹)
0~5	5.43±0.59 ^a	0.38±0.04 ^a	0.35±0.02 ^a
>5~10	4.55±0.32 ^b	0.35±0.04 ^a	0.33±0.10 ^a

注：不同小写字母表示不同土层间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences under different soil layers ($P<0.05$).

1.3 土样采集和分析

经过 1 a 的降雨控制试验，于 2019 年 9 月中旬对生物土壤结皮层及其下垫面的土壤进行调查和采集。每个降雨处理区选取 5 个正方形方格（1 m×1 m），在每个方

格中，采集 3 份土壤样品：0~3 cm 深度的土壤为生物土壤结皮层样品；>3~10 cm 深度为生物土壤结皮下垫面样品；第 3 部分是 0~10 cm 深度的混合样品。每个降雨处理区同一土层的样品均匀混合，四分法取样，所取土壤样品剔除可见的植物残体和石块后风干过 2 mm 筛备用。0~3 cm 结皮层和>3~10 cm 结皮层下垫面深度土壤样品风干后分别测定土壤有机碳、总氮和总磷^[24]，采集的 0~10 cm 深度混合鲜土样品用于分析土壤微生物生物量碳和氮^[22]。

1.4 数据处理

使用 SAS 8.0 软件对不同降雨处理和不同土层数据进行单因素 ANOVA 统计分析，并在不同处理下对土壤 C、N、P 含量、化学计量比和土壤水分、微生物生物量进行 Pearson 相关性分析，使用 Origin 9.0 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 生物土壤结皮 C、N 和 P 对降雨的响应

由表 2 可知，不同降雨处理下，结皮层土壤 C、N、P 含量均高于其下垫面，呈明显的“表聚性”。在结皮层，DW1/4 处理土壤 C 含量显著高于其他降雨处理（ $P<0.05$ ），IW1/3 和 DW1/2 处理次之，IW1/2 和自然降雨（CK）较低，DW1/3 和 IW1/4 处理最低；减水处理结皮层土壤 N 含量显著低于自然降雨和增水处理（ $P<0.05$ ），但减水处理下结皮层土壤 N 含量无显著性差异，IW1/3 处理显著提高了结皮层 N 含量；DW1/3 处理下结皮层 P 含量显著降低，其他降雨处理下结皮层 P 含量没有显著性差异。在结皮层下垫面，IW1/3、DW1/4 与自然降雨处理下土壤 C 含量显著高于其他降雨处理，IW1/2 和 DW1/2 处理次之，DW1/3 处理最低；减水处理结皮层下垫面土壤 N 含量显著低于增水处理（ $P<0.05$ ），增水处理显著降低了结皮层下垫面土壤 P 的有效性。

2.2 生物土壤结皮 C:N:P 化学计量对降雨的响应

不同降雨处理对生物土壤结皮 C:N:P 化学计量学特征也产生一定的影响，从表 3 可以看出，与自然降雨（CK）相比较，减水处理显著提高了结皮层 C:N（ $P<0.05$ ），而增水处理对结皮层 C:N 影响不显著，不同降雨处理下结皮层土壤 C:N 最大值出现在 DW 1/4 处理（17.31±0.55），最小值出现在 IW 1/4 处理（11.08±0.44）。而下垫面 C:N 降雨增加 1/2 处理下最高，达到 19.95±0.31，其最小值出现在 DW 1/3（9.27±0.49）。减水处理（DW 1/2）和 DW 1/4 处理条件下结皮层与其下垫面土壤 C:N 在 0.05 水平上差异性不显著，而 DW 1/3 处理下结皮层 C:N 显著高于下垫面（ $P<0.05$ ）。自然降雨（CK）和增水处理下下垫面土壤 C:N 显著高于结皮层（ $P<0.05$ ）；结皮层 C:P 最大值出现在 DW 1/3（22.48±1.42），下垫面 C:P 最大值出现在 DW 1/4 处理条件。另外，DW 1/3 和 DW 1/2 处理下结皮层土壤 C:P 显著高于其下垫面（ $P<0.05$ ），其他处理下垫面土壤 C:P 均显著高于结皮层（ $P<0.05$ ）；与自然降雨处理（CK）相比较，增水处理对结皮层 N:P 影响不显著，而 DW 1/2 显著降低结皮层及其下垫面土壤 N:P（ $P<0.05$ ）。另外，IW1/2、DW1/2 和 DW1/3 处理下结皮层及其下垫面 N:P 差异性不显著。

表 2 不同降雨处理下生物土壤结皮中碳氮磷的含量
Table 2 C, N and P contents of biological soil crusts in different precipitation treatments

项目 Item		C/(g·kg ⁻¹)		N/(g·kg ⁻¹)		P/(g·kg ⁻¹)	
		结皮层	下垫面	结皮层	下垫面	结皮层	下垫面
		Crust layer	Underlying surface	Crust layer	Underlying surface	Crust layer	Underlying surface
降雨处理 Precipitation treatments	IW1/2	6.84±0.30 ^{Ac}	5.52±0.14 ^{Bb}	0.53±0.01 ^{Ac}	0.28±0.01 ^{Bc}	0.36±0.03 ^{Aa}	0.20±0.02 ^{Bc}
	IW1/3	7.77±0.20 ^{Ab}	6.18±0.26 ^{Ba}	0.61±0.01 ^{Aa}	0.33±0.01 ^{Bcd}	0.36±0.01 ^{Aa}	0.18±0.01 ^{Bc}
	IW1/4	6.35±0.11 ^{Ad}	3.99±0.11 ^{Bc}	0.57±0.02 ^{Ab}	0.32±0.02 ^{Bd}	0.36±0.02 ^{Aa}	0.16±0.01 ^{Bd}
	CK	6.75±0.13 ^{Ac}	6.27±0.26 ^{Ba}	0.57±0.01 ^{Ab}	0.32±0.01 ^{Bd}	0.36±0.01 ^{Aa}	0.24±0.02 ^{Bb}
	DW1/4	8.19±0.17 ^{Aa}	6.10±0.12 ^{Ba}	0.47±0.01 ^{Ad}	0.35±0.01 ^{Bbc}	0.38±0.03 ^{Aa}	0.18±0.01 ^{Bcd}
	DW1/3	6.51±0.22 ^{Ac}	3.65±0.16 ^{Bd}	0.47±0.02 ^{Ad}	0.39±0.02 ^{Ba}	0.29±0.01 ^{Ab}	0.23±0.01 ^{Bb}
	DW1/2	7.52±0.19 ^{Ab}	5.29±0.03 ^{Bb}	0.49±0.03 ^{Ad}	0.37±0.03 ^{Bab}	0.36±0.03 ^{Aa}	0.33±0.03 ^{Aa}
统计分析 Statistical analysis	变异系数 CV/%	2.76	3.29	2.90	4.08	5.35	5.57
	<i>P</i>	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
	<i>F</i>	37.32	113.90	36.49	22.98	6.84	64.42

注：不同大写字母表示结皮层与下垫面间差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示不同降水处理间差异显著 ($P<0.05$)。CK：对照（自然降雨）；IW1/2、IW1/3、IW1/4 表示降雨量在自然降雨的基础上增加 1/2、1/3、1/4；DW1/2、DW1/3、DW1/4 表示降雨量在自然降雨的基础上减少 1/2、1/3、1/4。下同。
Note: Different capital letters indicate significant differences between the crust and the underlying surface ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences under different precipitation treatments ($P<0.05$); CK: Contrast (natural precipitation); IW1/2, IW1/3, IW1/4 indicates precipitation increasing 1/2, 1/3 and 1/4 treatment, respectively; DW1/2, DW1/3, DW1/4 indicates precipitation decreasing 1/2, 1/3 and 1/4 treatment, respectively. The same as below.

表 3 不同降雨处理下生物土壤结皮化学计量特征
Table 3 Characteristics of soil crusts stoichiometry among different precipitation treatments

项目 Item		C : N		C : P		N : P	
		结皮层	下垫面	结皮层	下垫面	结皮层	下垫面
		Crust layer	Underlying surface	Crust layer	Underlying surface	Crust layer	Underlying surface
降雨处理 Precipitation treatments	IW ^{1/2}	12.83±0.70 ^{Bcd}	19.95±0.31 ^{Aa}	18.92±1.98 ^{Bbc}	27.74±2.48 ^{Ab}	1.47±0.09 ^{Abc}	1.39±0.10 ^{Ad}
	IW ^{1/3}	12.81±0.46 ^{Bcd}	18.55±0.17 ^{Ab}	21.60±1.10 ^{Ba}	33.73±1.22 ^{Aa}	1.69±0.03 ^{Ba}	1.82±0.06 ^{Abc}
	IW ^{1/4}	11.08±0.44 ^{Be}	12.47±0.48 ^{Ac}	17.66±0.61 ^{Bc}	24.95±0.92 ^{Ab}	1.60±0.13 ^{Bab}	2.00±0.11 ^{Aa}
	CK	11.85±0.43 ^{Bde}	19.60±0.24 ^{Aa}	18.78±0.87 ^{Bbc}	25.89±2.65 ^{Ab}	1.58±0.01 ^{Aab}	1.32±0.12 ^{Bd}
	DW ^{1/4}	17.31±0.55 ^{Aa}	17.31±0.93 ^{Ac}	21.80±1.39 ^{Ba}	33.91±0.65 ^{Aa}	1.26±0.08 ^{Bd}	1.96±0.12 ^{Aab}
	DW ^{1/3}	13.77±0.66 ^{Ac}	9.27±0.49 ^{Bf}	22.48±1.42 ^{Aa}	15.68±1.50 ^{Bc}	1.64±0.14 ^{Aa}	1.69±0.07 ^{Ac}
	DW ^{1/2}	15.38±1.09 ^{Ab}	14.33±0.80 ^{Ad}	20.75±1.16 ^{Aab}	16.22±0.69 ^{Bc}	1.35±0.11 ^{Ac}	1.13±0.09 ^{Ae}
统计分析 Statistical analysis	变异系数 CV/%	4.82	3.47	6.33	6.41	6.20	6.21
	<i>P</i>	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
	<i>F</i>	32.19	159.14	6.10	61.37	8.46	34.42

2.3 土壤水分、土壤微生物生物量碳和氮对降雨的响应

与自然降雨处理 (CK) 相比, IW1/2 处理下土壤水分增加了 21.9%, DW1/2 处理下土壤水分降低了 53.7%。与 CK 相比, 随降雨量增加, SMBC (土壤微生物生物量碳) 和 SMBN (土壤微生物生物量氮) 呈减少趋势。IW1/4 处理下 SMBC 和 SMBN 含量最高; DW1/4 处理下 SMBC 含量最小, 为 (127.38±6.37) mg/kg, 自然降雨处理下 SMBN 最小, 为 (21.87±0.38) mg/kg (表 4)。可以看出, 不同降雨处理下 SMBC 和 SMBN 对降雨的响应基本一致, 适宜的土壤水分条件促进了土壤微生物生物量碳、氮的积累, 而过高的降雨量不利于土壤微生物生物量碳、氮的积累, 较为干旱的土壤环境有利于土壤碳、氮的富集。

2.4 土壤养分与生物土壤结皮 C : N : P 化学计量关系

由表 5 可知, 在结皮层, SOC 与 C : N 呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 C : P 和 N : P 分别呈显著正相关和负相关 ($P<0.05$)。TN 与 C : N 和 N : P 分别呈极显著负相关和正相关 ($P<0.01$), 与 C : P 呈显著负相关 ($P<0.05$)。TP 与 C : P 和 N : P 分别呈显著负相关 ($P<0.05$) 和极显著负相关关系 ($P<0.01$), C : N 与 C : P 和 N : P 分别呈极显著正相关 ($P<0.01$) 和极显著负相

关系 ($P<0.01$)。

表 4 降雨量对土壤水分, 土壤微生物生物量碳和氮的影响
Table 4 Effects of precipitation on soil water content, soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen

项目 Item		SW/%	SMBC/(mg·kg ⁻¹)	SMBN/(mg·kg ⁻¹)
降雨处理 Precipitation treatments	IW1/2	10.90±1.11 ^a	162.33±3.80 ^c	27.57±0.51 ^f
	IW1/3	10.58±1.37 ^{ab}	168.76±6.49 ^c	29.50±0.44 ^e
	IW1/4	7.73±1.42 ^c	319.23±9.88 ^a	54.60±0.70 ^a
	CK	8.94±0.87 ^{bc}	149.95±3.71 ^d	21.87±0.38 ^g
	DW1/4	7.94±0.81 ^c	127.38±6.37 ^e	40.00±0.53 ^d
	DW1/3	7.77±0.61 ^c	225.11±3.68 ^b	42.90±0.72 ^c
	DW1/2	4.14±0.73 ^d	317.82±6.36 ^{ab}	44.17±0.64 ^b
统计分析 Statistical analysis	CV/%	12.43	2.91	1.54
	<i>F</i>	14.32	509.20	1185.16
	<i>P</i>	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001

注: SW: 土壤含水率; SMBC: 土壤微生物生物量碳; SMBN: 土壤微生物生物量氮。下同。
Note: SW: Soil water content; SMBC: soil microbial biomass carbon; SMBN: soil microbial biomass nitrogen. The same as below.

在结皮层下垫面, SW 与 C : N 及 C : P 分别呈显著正相关 ($P<0.05$) 和极显著正相关关系 ($P<0.01$), SOC 与 C : N 及 C : P 间呈极显著正相关关系 ($P<0.01$), 与 SMBC、SMBN 间呈极显著负相关关系 ($P<0.01$), TN 与 C : N 及

C : P 间分别呈极显著负相关 ($P<0.01$) 和显著负相关关系 ($P<0.05$) , TP 与 C : P 和 N : P 均呈极显著负相关关系 ($P<0.01$) , C : N 与 SMBC 和 SMBN 均呈极显著负相关关

系 ($P<0.01$) , 与 C : P 间呈极显著正相关关系 ($P<0.01$) , C : P 与 N : P 在 0.05 水平上显著正相关, 与 SMBC 在 0.01 水平上呈极显著负相关。

表 5 土壤养分与生物土壤结皮 C : N : P 化学计量关系

Table 5 Correlation coefficients among soil crusts stoichiometries and soil nutrients

土层 Soil layer	项目 Item	SW	SOC	TN	TP	C : N	C : P	N : P	SMBC
结皮层 Crust layer	SOC	-0.222	1.000						
	TN	0.524*	-0.194	1.000					
	TP	0.080	0.415	0.263	1.000				
	C : N	-0.426	0.768**	-0.775**	0.111	1.000			
	C : P	-0.195	0.535*	-0.438*	-0.544*	0.612**	1.000		
	N : P	0.383	-0.491*	0.631**	-0.577**	-0.738**	0.073	1.000	
	SMBC	-0.619**	-0.386	-0.049	-0.146	-0.208	-0.225	0.070	1.000
	SMBN	-0.579**	-0.158	-0.325	-0.163	0.133	0.008	-0.134	0.768**
下垫面 Underlying surface	SOC	0.270	1.000						
	TN	-0.609**	-0.330	1.000					
	TP	-0.612**	0.019	0.402	1.000				
	C : N	0.510*	0.896**	-0.704**	-0.144	1.000			
	C : P	0.574**	0.672**	-0.475*	-0.713**	0.693**	1.000		
	N : P	0.239	-0.207	0.108	-0.845**	-0.250	0.515*	1.000	
	SMBC	-0.619**	-0.660**	0.274	0.350	-0.664**	-0.662**	-0.100	1.000
	SMBN	-0.579**	-0.728**	0.434*	-0.055	-0.798**	-0.384	0.418	0.768**

注: * 和** 分别表示显著相关 ($P<0.05$) 和极显著相关 ($P<0.01$) 。SOC 为土壤有机碳。
Note: ** is significant correlation at the 0.01 level, and * is significant correlation at the 0.05 level. SOC: Soil Organic Carbon.

3 讨 论

土壤化学计量是确定土壤养分循环的重要指标。荒漠生态系统中生物土壤结皮的出现、演替和化学循环可以揭示生态环境的演化趋势和对气候变化的响应^[23-24]。本研究不同降雨处理下结皮层土壤 C、N、P 含量均高于其下垫面, 呈现明显的“表聚性”。这是因为在荒漠生态系统, 藻类、地衣和藓类组成的生物土壤结皮具有较强的光合固碳能力, 能显著增加结皮层土壤养分含量^[19,21]。同时, 生物土壤结皮促进了沙面土壤的形成, 土壤黏粉粒、大团聚体以及养分含量明显增加^[25], 这些因素综合导致结皮层与其下垫面土壤养分差异显著。然而, 降雨变化可以使生物结皮发生逆向演替, 生物结皮有机碳库将会逆转为碳源^[21]。本研究发现, 适宜的降雨会影响土壤微生物活性, 刺激结皮的碳释放, 当降雨量增加 1/3 时, 显著提高了结皮层藻类、地衣和藓类生物量, 从而固定更多的土壤有机质, 提高了结皮层 C 含量, 随着降雨进一步增加, 土壤含水率和有效湿润时间决定了结皮层的固碳量, 水分驱动结皮层碳释放。而减水处理下生物土壤结皮保持休眠状态, 生物土壤结皮基本不具备光合能力, 在有了适当的水分时并不能立即完全表现出其光合生理活性, 需要一定时间响应。同时由于长期的干旱, 土壤中活性碳累积以及微生物大量死亡, 呼吸底物数量增加, 导致结皮层 C 含量相对较高。降雨水平对结皮层有机碳的影响研究结果与肖波^[26]等基于土壤水分驱动的生物结皮固碳的结果一致。一般而言, 土壤 N 含量与降雨量正相关, 本研究增水处理下结皮层土壤 N 含量显著高于减水处理, 但增水 1/2 处理下结皮层 N 含量显著低于自然降雨处理, 这是由于研究区土壤为风沙土, 水分过多淋溶易引起土壤 N 损失, 导致土壤 N 含量降低, 同时,

受降雨淋溶作用, 增水处理下结皮层下垫面土壤 N 含量显著低于减水处理。与对照相比, 降雨处理对结皮层 P 含量的影响不明显, 但降水增加显著降低了结皮层下垫面 N 和 P 的有效性。这可能是由于增雨提高了土壤水分有效性, 从而促进了植物生长以及对土壤养分的消耗, 同时增水后淋溶损失增加, 进而导致下垫面 P 含量降低。

土壤化学计量比是反映土壤内部物质循环和衡量土壤养分平衡的重要参数, 是土壤 C、N、P 矿化作用和固持作用的重要评价指标。土壤 C : N 是土壤质量的敏感指标, 与有机质分解速率成反比关系。本研究减水处理显著提高了结皮层 C : N, 说明在减水处理下土壤 C 处于累积状态。降雨增加显著提高了结皮层下垫面 C : N, 这是因为受降雨淋溶作用, 增水处理下结皮层下垫面土壤 N 含量显著降低导致的。较高的 C : P 是 P 有效性低的一个指标, 减水 1/4 处理、自然降雨和增水处理下下垫面土壤 C : P 均显著高于结皮层, 说明水分条件好的情况下, 结皮层下垫面土壤中 P 有效性降低, 而减水 1/3 和 1/2 处理下结皮层 C 积累较多, 导致结皮层 C : P 增大。N : P 是衡量系统 N、P 养分限制的一个指标, 增水处理对结皮层 N : P 影响不显著, 说明增水条件下生物结皮土壤不受 P 的限制, 而 DW 1/2 处理下生物结皮土壤可能会受到 P 的限制, 另外, IW1/2、DW1/2 和 DW1/3 处理下结皮层及其下垫面 N : P 差异性不显著。是由于 IW1/2 和 DW1/2 和 DW1/3 处理下结皮层及其下垫面土壤 N、P 含量变化趋于一致导致的, 同时由于淋溶作用, IW 1/3 和 IW 1/4 处理下结皮层土壤 N 缺乏的程度远高于 P。本研究减水处理增加了生物土壤结皮层化学计量比和结皮层与下垫面之间 C 含量的差异, 缩小了结皮层与下垫面之间的 N 和 P 含量之间的差距。增水处理增大了结皮层下垫面化学计量比和结皮层和下垫面之间 N 和 P 含量的

差异。此外, DW1/2 和 DW1/4 处理导致结皮层及其下垫面的 C:N 趋于一致, IW1/2、DW1/2 和 DW1/3 处理导致结皮层与下垫面 N:P 趋于接近。基于此, 通过黄土高原区、毛乌素沙地、科尔沁沙地、盐池荒漠草原区、腾格里沙漠、古尔班通古特沙漠生物结皮层 C:N:P 对降雨量的响应对比分析发现(表 6), 不同研究区土壤生物结皮化学计量存在一定的差异^[2,16,21,25,28], 荒漠草原区土壤生物结皮 C:N、C:P 高于其他研究区, 说明在有限降水条件下, 荒漠草原区生物结皮能使土壤 C、N 迅速积累^[22,26], 说明不同生境生物土壤结皮层对土壤 C 的富集程度不一致, 结皮对降水的响应也存在地域性差异。

表 6 不同地区生物结皮的土壤生态化学计量特征

Table 6 Soil ecological stoichiometry characteristics of biocrusts in different areas

研究区域 Research region	降雨量 Precipitation /mm	C:N	C:P	N:P	参考文献 Reference
黄土高原区 Hilly loess plateau region	500	10.90	17.20	1.55	[21]
毛乌素沙地 Mu Us sandy land	400	10.15	17.20	1.65	[25]
科尔沁沙地 Horqin sandy land	364	10.10	37.3	3.8	[16]
盐池荒漠草原区 Desert steppe in Yanchi	298.3	13.58	20.28	1.51	
腾格里沙漠 Tengger desert	186	12.35	19.35	1.55	[2]
古尔班通古特沙漠 Gurbantunggut desert	79.5	7.80	13.90	1.75	[28]

相关分析表明, 生物结皮中的 C:N:P 化学计量与土壤有机碳和土壤含水率密切相关, 结皮层下垫面化学计量与土壤微生物量关系密切, 土壤 C、N、P 化学计量作为反映土壤质量和养分的重要指标, 能够很好的指示土壤对降雨变化的响应和土壤对微生物新陈代谢和发育繁衍所需要养分的供应情况。通常情况下, 土壤微生物量碳、氮与土壤含水率正相关。本研究土壤微生物量碳、氮随着降雨量增加而降低, 是由于适宜的土壤水分条件促进了土壤微生物生物量碳、氮的积累。而过高的降雨量导致土壤养分淋溶, 不利于土壤微生物生物量碳、氮的积累。因此 IW1/4 处理和 DW1/2 处理分别使微生物量碳、氮显著增加, 这可能是干旱处理抑制了微生物活性^[4,25,28], 相对干旱的土壤环境有利于土壤碳、氮的富集, 为土壤微生物呼吸提供较多的营养物质, 有利于微生物生物量碳、氮的积累。尽管如此, 对于植物-凋落物-生物结皮系统中 C:N:P 化学计量之间的相互作用清晰的解释需要长期控制试验研究^[29-32]。

4 结 论

本文通过野外模拟降雨控制试验, 初步揭示了降雨水平变化对荒漠草原生物土壤结皮 C:N:P 化学计量的影响规律, 主要结论包括:

1) 与自然降雨处理(CK)相比, 减水处理显著降低了结皮层 N 水平但提高了下垫面 N 水平; 减水处理 DW 1/3 下结皮层 P 含量最低, 其他降雨处理对结皮层 P 含量影响不显著, 下垫面土壤 P 含量在减水处理 DW 1/2 条件下达到峰值; 不同降雨水平下结皮层 C、N 水平均显著高

于其下垫面, 减水处理有利于结皮层对 C、N、P 的富集;

2) 结皮层 C:N 最大值和最小值分别在 DW 1/4 和 IW 1/4 处理, C:P 最大值在 DW 1/3 处理, 减水处理 DW 1/3 和 DW 1/2 可显著提高结皮层 C:P, 自然降雨和增水处理能显著提高下垫面 C:N 和 C:P, DW 1/2 处理显著降低结皮层及其下垫面 N:P, 另外, IW1/2、DW1/2 和 DW1/3 导致结皮层及其下垫面 N:P 趋于接近;

3) 适宜的土壤水分条件促进了结皮层及下垫面 SMBC 和 SMBN 的积累, 而过高的降雨量导致土壤养分损失, 不利于 SMBC 和 SMBN 的积累。相对干旱的土壤环境有利于结皮层土壤碳、氮的富集, 为土壤微生物呼吸提供较多的营养物质, 有利于 SMBC 和 SMBN 的积累。

[参 考 文 献]

- [1] Li X R, Zhang P, Su Y G, et al, Carbon fixation by biological soil crusts following revegetation of sand dunes in arid desert Regions of China: A four-year field study[J]. Catena, 2012, 97: 119-126.
- [2] Belnap J, Phillips S L, Miller M E, Response of desert biological soil crusts to alteration in precipitation frequency[J]. Oecologia, 2004, 141(2): 306-316.
- [3] 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.
Li Xinrong, Zhang Yuanming, Zhao Yunge, A study of biological soil crusts: Recent development, trend and prospect[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(1): 11-24. (in Chinese with English abstract)
- [4] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al, Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49(6): 96-105.
- [5] Khalili B, Ogunseitan O A, Goulden M L, et al, Interactive effects of precipitation manipulation and nitrogen addition on soil properties in California grassland and shrub land[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 107: 144-153.
- [6] Právělie R, Drylands extent and environmental issues. A global approach[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 161: 259-278.
- [7] Townshend J R G, Justice C O, Analysis of dynamics of African vegetation using the normalized difference vegetation index[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 11: 1435-1445.
- [8] 吴林, 苏延桂, 张元明. 模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4103-4113.
Wu Lin, Su Yanguai, Zhang Yuanming. Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4103-4113. (in Chinese with English abstract)
- [9] Cable J M, Huxman T E, Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crusts[J]. Oecologia, 2004, 141(2): 317-324.

- [10] Kuske C R, Carney T D, Housman D C, et al, Increased temperature and altered summer precipitation have differential effects on biological soil crusts in a dryland ecosystem[J]. *Glob Change Biology*, 2012, 18(8): 2583-2593.
- [11] 杨晓晖, 张克斌, 赵云杰. 生物土壤结皮: 荒漠化地区研究的热点问题[J]. *生态学报*, 2001, 21(3): 474-480.
Yang Xiaohui, Zhang Kebin, Zhao Yunjie. Microbiotic soil crust: A research forefront in desertification prone areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(3): 474-480. (in Chinese with English abstract)
- [12] Bragazza L. A decade of plant species changes on a mire in the Italian Alps: vegetation-controlled or climate-driven mechanisms?[J]. *Climatic Change*, 2006, 77(3/4): 415-429.
- [13] Rodriguez-Caballero E, Belnap J, Büdel B, et al. Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(3): 185-189.
- [14] Liu Y, Cui Z, Huang Z, et al. The influence of litter crusts on soil properties and hydrological processes in a sandy ecosystem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(5): 2481-2490.
- [15] 尹瑞平, 吴永胜, 张欣, 等. 毛乌素沙地南缘沙丘生物结皮对凝结水形成和蒸发的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(19): 6173-6180.
Yin Ruiping, Wu Yongsheng, Zhang Xin, et al. Effects of biological crusts on dew deposition and evaporation in the Southern Edge of the Mu Us Sandy Land, Northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19): 6173-6180. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al, Biological soil crust and surface soil properties in different vegetation types of Horqin Sand Land[J]. *China. Catena*, 2010, 82(2): 70-76.
- [17] 路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 141-146.
Lu Pei, Wang Linhua, Wu Faqi. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 141-146. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张建国, 李红伟, 李雅菲, 等. 土壤盐结皮人工培育及其破损程度对土壤蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 138-144.
Zhang Jianguo, Li Hongwei, Li Yafei, et al. Artificial cultivation of soil salt crust and effects of its damage rate on soil evaporation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(13): 138-144. (in Chinese with English abstract)
- [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: 2320-2334.
Li Xinrong, Tan Huijuan, Hui Rong, et al. Researches in biological soil crust of China: A review (in Chinese)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63: 2320-2334. (in Chinese with English abstract)
- [20] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2-6.
He Jinsheng, Han Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 2-6. (in Chinese with English abstract)
- [21] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 678-688.
Gao Liqian, Zhao Yunge, Xu Mingxiang, et al. The effects of biological soil crust succession on soil ecological stoichiometry characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 678-688. (in Chinese with English abstract)
- [22] Delgado-Baquerizo M, Castillo-Monroy A P, Maestre F T, et al. Plants and biological soil crusts modulate the dominance of N forms in a semi-arid grassland[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2010, 42(2): 376-378.
- [23] Su Y Z, Zhou Z B, Liu Y B, et al, Carbon flux in deserts depends on soil cover type: A case study in the Gurbantunggute desert, North China[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2013, 58: 332-340.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 徐杰, 白学良, 杨持, 等. 固定沙丘结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 545-551.
Xu Jie, Bai Xueliang, Yang Chi, et al. Study on diversity and binding-sand effect of moss on biotic crusts of fixed dunes[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(4): 545-551. (in Chinese with English abstract)
- [26] 肖波, 赵允格, 许明祥, 等. 陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1019-1026.
Xiao Bo, Zhao Yunge, Xu Mingxiang, et al. Soil nutrients accumulation and their loss risk under effects of biological soil crust in Loess Plateau of northern Shaanxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2008, 19(5): 1019-1026. (in Chinese with English abstract)
- [27] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [28] Xiang S R, Doyle A, Holden P A, et al. Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9): 2281-2289.
- [29] 庄伟伟, 张元明. 生物结皮对荒漠草本植物群落结构的影响[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(6): 1338-1344.
Zhuang Weiwei, Zhang Yuanming. Effect of soil microbiotic crust on plant community in the Gurbantunggut desert[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 34(6): 1338-1344. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhang B C, Zhou X B, Zang Z M. Responses of microbial activities and soil physical - chemical properties to the

- successional process of biological soil crusts in the Gurbantunggut Desert, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 101-109.
- [31] Chen Y, Chen L, Peng Y, et al. Linking microbial C: N: P stoichiometry to microbial community and abiotic factors along a 3500-km grassland transect on the Tibetan plateau[J]. Global Ecology and Biogeography. 2016, 25: 1416-1427.
- [32] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaves nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist. 2005, 168: 377-385.
- [33] Zeng Q, Li X, Dong Y, et al. Soil and plant components ecological stoichiometry in four steppe communities in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2016, 147: 481-488.

Effects of precipitation on stoichiometry of biological soil crusts in a desert steppe of Northern China

Wu Xudong, Yu Hongqian, Jiang Qi, Wang Zhanjun, He Jianlong, Ji Bo, Xu Hao

(Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan, 750002, China)

Abstract: Biological soil crusts are fundamental components and surface landscape in arid regions, and biogeochemical process also depends on them. However, biological soil crusts stoichiometry remains largely unknown in the desert region of Northern China. The influences of precipitation on biological soil crusts stoichiometry is also lacking in desert steppe. This paper aims to investigate the effects of precipitation on the stoichiometry of biological soil crusts in desert steppe. This field study was conducted at Dashuikeng Grassland Research Station, Yanchi County (106°58'E, 37°24'N, average elevation, 1 560 m), Ningxia Hui Autonomous Region, China. This region covers a large ecosystem of desert steppe that characterized by low rainfall and uneven precipitation, along the southwest edge of the Mu Us Sandy Land. In the study desert steppe area on the southeastern margin of the Tengger Desert, the average annual precipitation was only 298.3 mm during the 60 years from 1959 to 2019. The precipitation was regulated by the measurement of artificial rain using rainwater shed and sprinkler irrigation technologies, in order to evaluate precipitation effects on the biological soil crusts in desert steppe compared with natural precipitation. 28 precipitation treatments (6 m×6 m) were set up at the test station in early March 2018, where 3 m wide buffer zone was designed between each time. Control conditions of precipitation were designed via the shelter and sprinkler irrigation system, including 7 precipitation treatments, natural precipitation (CK), drought (1/2 reduction in precipitation, DW1/2 treatment, 1/3 reduction in natural precipitation, DW1/3 treatment, 1/4 reduction in precipitation, DW1/4 treatment), and increasing precipitation (1/2 increase in natural precipitation, IW1/2 treatment, 1/3 increase in natural precipitation, IW1/3 treatment, 1/4 increase in natural precipitation, IW1/4 treatment). Each treatment has 4 spares for the reproductivity. In the same period, small weather stations were set up in the test area. TRIME-PICO TDR Portable Soil Moisture Meter (made in Germany) was used for the data collection of precipitation in the soil water depth of 10 cm. Carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents of biological soil crusts were measured to examine the C: N: P stoichiometry and its driving factors. Three findings can be achieved: 1) Water-reducing treatment was beneficial to the enrichment of C, N and P in the crust. DW1/4 treatment and natural precipitation treatment posed significant effects on the C content in the crust layer and underlying soil. The water-reducing treatment can reduce the N level of the crust, while increase the N level of the underlying surface. The content of P in the crust layer was the lowest under DW 1/3 treatment, whereas the content of P in the underlying surface reached the peak under DW 1/2 treatment; 2) Natural rainfall and increased precipitation can significantly improve the underlying surface C: N and C: P. There was a reduction of N: P in the crust layer and its underlying surface; 3) Suitable soil moisture conditions promoted the accumulation of SMBC (Soil Microbial Biomass Carbon) and SMBN (Soil Microbial Biomass Nitrogen) on the crust layer and underlying surface, while excessive rainfall caused the loss of soil nutrients, which was not conducive to the accumulation of SMBC and SMBN. The relatively dry soil environment was conducive to the enrichment of soil carbon and nitrogen in the crust layer, provided more nutrients for soil microbial respiration, and was conducive to the accumulation of SMBC and SMBN. In short, the C: N: P stoichiometry of biological soil crusts and underlying surfaces had different responses to precipitation in the desertification areas of northern China.

Keywords: stoichiometry; soils; biological crusts; precipitation; desert steppe