

王怀海, 黄文达, 何远政, 等. 短期增温和降水减少对沙质草地土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. 中国沙漠, 2022, 42(3): 274–281.

# 短期增温和降水减少对沙质草地土壤微生物量碳氮和酶活性的影响

王怀海<sup>1,2</sup>, 黄文达<sup>1</sup>, 何远政<sup>1,2</sup>, 牛亚毅<sup>1,2</sup>, 朱远忠<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 通过模拟气候变化, 探究短期增温和降水减少对沙质草地土壤微生物量碳氮及酶活性的影响, 揭示沙质草地土壤微生物量碳氮和酶活性对短期气候变化的响应规律。结果表明: (1) 短期增温和降水减少对土壤微生物量碳氮和酶活性均产生显著影响。(2) 在自然温度下, 与自然降水相比, 降水减少40%时土壤微生物量碳(MBC)和微生物氮(MBN)含量最高, 增幅分别为87.9%和98.8%; 降水减少60%时土壤碱性蛋白酶(S-ALPT)活性最低, 降幅达32.8%。(3) 在增温条件下, 与自然降水相比, 降水减少40%时土壤MBC和MBN含量最低, 降幅分别为25.67%和48.16%, 土壤脲酶(S-UE)活性最高, 增幅20.42%。(4) 土壤pH与3种土壤酶活性正相关, 与土壤微生物量碳氮负相关。土壤微生物量碳氮与土壤纤维素酶(S-CL)活性负相关, 与S-UE、S-ALPT活性正相关。

**关键词:** 增温; 降水减少; 沙质草地; 土壤微生物量碳氮; 土壤酶活性

**文章编号:** 1000-694X(2022)03-274-08

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00135

**中图分类号:** Q938.1

**文献标志码:** A

## 0 引言

土壤微生物量(soil microbial biomass, SMB)和特定功能胞外酶活性(extracellular enzyme activity, EEA)是生物地球化学过程及其驱动因素的重要特征因子, 也是陆地生态系统生物地球化学循环的重要驱动力<sup>[1-3]</sup>。土壤微生物量碳氮可以表征土壤质量、反映土壤养分的循环机制<sup>[4]</sup>, 往往受植被和土壤类型<sup>[5]</sup>、微生物群落组成和结构<sup>[6]</sup>、大气氮沉降<sup>[7]</sup>、温度和降水<sup>[8-9]</sup>等因素以及土地利用方式<sup>[10]</sup>的综合影响, 在时间、空间上表现出复杂和多样化的特征<sup>[11]</sup>。土壤酶作为微生物分解代谢的重要信息指标, 通过参与凋落物和土壤有机质的分解过程, 驱动土壤养分循环<sup>[12-13]</sup>, 受气候变化、土壤养分水平、植被组成和土地利用方式等影响<sup>[13-17]</sup>。荒漠土壤中较低的胞外酶活性可以在植被恢复过程中得到有效恢复<sup>[18]</sup>; 植被重建会显著改善沙质土壤的化学性质, 从而提高相关土壤酶的活性和催化性能<sup>[19]</sup>。

全球气候持续变暖导致极端天气和气候事件显著增加<sup>[20]</sup>, 引起的短期气候变化对植被-土壤影响显著。短期降水减少会影响土壤有机碳输入和土壤微生物丰度<sup>[21]</sup>、增加凋落物氮磷滞留<sup>[22]</sup>。同时, 短期气候变化会对土壤微生物量碳氮和酶活性产生直接或间接的影响<sup>[8, 13]</sup>。水分胁迫不仅影响土壤胞外酶生产, 还会影响其半衰期, 继而影响其活性<sup>[22]</sup>; 沙漠化土壤中较低的胞外酶活性可以在植被恢复过程中得到有效恢复, 植被重建会显著改善沙质土壤的化学性质, 提升土壤持水量从而提高相关土壤酶的活性和催化性能<sup>[15]</sup>。时间尺度方面短期内降水量变化尤其是降水减少处理对荒漠草原土壤酶的影响较小, 而降水量增加对土壤酶活性的影响显著<sup>[5]</sup>。土壤环境条件的变化可能会影响不同的土壤微生物群落, 进一步重塑土壤生态系统的过程和功能<sup>[21]</sup>。增温对土壤微生物生物量有直接和间接的影响<sup>[23]</sup>, 进而对陆地生态系统的碳氮养分循环产生深刻影响<sup>[24]</sup>。温带地区气候变暖显著降低了高山草

收稿日期: 2021-07-02; 改回日期: 2021-10-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(41971144); 国家重点研发计划项目(2017FY100205, 2016YFC0500-907)

作者简介: 王怀海(1995—), 男, 甘肃民乐人, 硕士研究生, 研究方向为生态学。E-mail: 1464190715@qq.com

通信作者: 黄文达(E-mail: huangwenda2008@163.com)

原、荒漠和典型草原土壤微生物量碳氮储量<sup>[23]</sup>。

中国北方半干旱农牧交错带生态环境脆弱<sup>[25-26]</sup>。近年来,由于气候变化和人类活动的影响,该地区沙漠化发展严重,植被-土壤遭受严重威胁。虽然已有许多研究关注土壤微生物量碳氮和胞外酶活性,但基本用于推断土壤微生物功能和土壤质量特征等方面<sup>[27]</sup>。针对短期气候变化条件下中国北方半干旱农牧交错带沙质草地土壤微生物量碳氮和胞外酶活性水平及变化规律的研究甚少。因此,本研究以中国北方农牧交错带科尔沁沙质草地为研究对象,通过模拟增温和降水减少,探究短期气候变化对北方农牧交错带沙质草地土壤微生物量碳氮和酶活性的影响,揭示其对短期增温与降水减少的响应机制,为中国北方农牧交错带土壤碳氮循环与沙质草地土壤治理提供科学依据和理论支撑。

## 1 研究材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗,地处中国北方农牧交错带东南部的科尔沁沙地腹地(42°55′—42°57′N、120°41′—120°45′E,海拔340—370 m)。该区域属于温带大陆性半干旱气候,年降水量350—500 mm,集中在6—8月,年蒸发量1 500—2 500 mm,年均气温4—7℃。土壤多为风沙土。该区地处不同地形、气候条件与不同生产方式的过渡交汇处,沙地、草地、农田多种生态系统并存,地上-地下生态系统水热条件梯度变化明显,是中国农牧交错

带特征最为典型的区域。研究区域优势灌木以小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和杠柳(*Periploca sepium*)为主,优势半灌木以盐蒿(*Artemisia halo-dendron*)为主,优势草本植物以糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、芦苇(*Phragmites australis*)、和白草(*Pennisetum centrasiticum*)为主。

### 1.2 试验设计

2019年9月将试验布设于中国科学院奈曼沙漠化研究站长期围封样地内,全年增温样地利用OTC增温设施(图1)。OTC为正六边形圆台结构,底部直径2.0 m,顶部直径1.8 m,高0.5 m,材料为白钢骨架和高透光性、低泛黄度指数、高UV穿透的透明丙烯酸塑料板,增温效果良好,0—10 cm土壤全年平均增温1.3℃。无增温样地利用与增温OTC一样的白钢骨架和不锈钢窗纱制作另外一种OTC,无增温效果,属于自然温度样地。全年降水减少设施利用奈曼站自主研发的减雨装置。试验采用双因素全因子随机区组设计。试验包括8个处理,48个试验样方。每块样地降水减少区面积为2.5 m×2.5 m,样地间隔2 m,每块样地的正中放置增温或者无增温OTC,OTC中央2 m<sup>2</sup>的区域作为主要研究区域。试验处理如下:①自然温度下减少降水0(对照,  $T_0 \times W_0$ )、减少降水20% ( $T_0 \times W_{20}$ )、减少降水40% ( $T_0 \times W_{40}$ )、减少降水60% ( $T_0 \times W_{60}$ );②增温条件下减少降水0 ( $T \times W_0$ , 对照)、减少降水20% ( $T \times W_{20}$ )、减少降水40% ( $T \times W_{40}$ )、减少降水60% ( $T \times W_{60}$ )。试验样地周围使用围栏进行保护,以防止放牧破坏。



图1 模拟气候变化装置

Fig.1 The experimental apparatus to simulate climate change

### 1.3 样品采集与指标测定

2020年8月在试验样地进行植被调查和土壤随机混合取样。用直径2.8 cm土钻于0—10 cm和10—20 cm分别获取土样,每个样方7钻,充分混合后,迅速放入冷藏箱中,带回实验室进行测定。其中一部

分样品剔除动植物残体后置于0—4℃冰箱中,用于土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)测定(氯仿熏蒸硫酸钾浸提法:0.5 mol·L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液浸提,水土比为2:1);另一部分样品自然风干后,过孔径2 mm筛去除杂质,用于测定土壤理化性质和酶

活性,包括土壤机械组成(ISSCAS 干筛法)、pH (Multiline P4 pH 仪测定)、土壤脲酶(S-UE)活性(使用靛酚蓝微量比色法测定,Solarbio BC0120)、土壤纤维素酶(S-CL)活性(使用 3,5-二硝基水杨酸微量比色法测定,Solarbio BC0150)和土壤碱性蛋白酶(S-ALPT)活性(使用福林酚微量比色法测定,Solarbio BC0880)。

1.4 数据处理

试验数据经过 Excel 2013 处理后,采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析,方差分析与相关性分析之前数据均进行了正态性检验,确保数据符合正态分布;使用单因素方差分析(one-way ANOVA)分别检

验增温和降水减少梯度处理对土壤 MBC、MBN 及酶活性的显著性差异,差异显著性水平为  $\alpha=0.05$ ,用双因素方差分析(two-way ANOVA)研究增温与降水减少处理之间是否存在对土壤 MBC、MBN 及酶活性的交互作用,差异显著性水平为  $\alpha=0.05$ ;使用 Pearson 相关系数分析土壤微生物生物量与酶活性之间的相关性;最后使用 SigmaPlot 14.0 进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 土壤机械组成和 pH

增温、降水减少和二者的交互作用下所有植物群落土壤均以细砂含量占优势(表 1)。

表 1 短期增温和降水减少对沙质草地土壤理化性质的影响  
Table 1 Effects of short-term warming and precipitation reduction on soil physical and chemical properties in sandy grassland

处理	土层 /cm	土壤机械组成/%						pH
		2—1 mm	1—0.5 mm	0.5—0.25 mm	0.25—0.1 mm	0.1—0.05 mm	<0.05 mm	
$T_0 \times W_0$	0—10	0.21 ±0.14	0.34±0.11	28.47±1.22	55.68±2.85	10.14±1.69 <sup>a</sup>	4.78±1.38 <sup>a</sup>	8.04±0.25 <sup>a</sup>
	10—20	0.19±0.04 <sup>a</sup>	0.36±0.07 <sup>a</sup>	28.44±1.16 <sup>a</sup>	55.92±3.58	10.32±2.90	4.50±1.06 <sup>a</sup>	7.78±0.22
$T_0 \times W_{20}$	0—10	0.21 ±0.06	0.38±0.92	27.30±0.91	56.58±0.93	12.31±1.39 <sup>b</sup>	3.26±0.87 <sup>b</sup>	7.74±0.27 <sup>b</sup>
	10—20	0.06±0.01 <sup>b</sup>	0.25±0.05 <sup>bc</sup>	26.86±0.63 <sup>b</sup>	57.59±2.33	12.09±2.19	3.15±0.61 <sup>b</sup>	8.06±0.44
$T_0 \times W_{40}$	0—10	0.19±0.03	0.37±0.11	27.29±1.49	57.28±1.68	10.51±1.00 <sup>ac</sup>	4.25±0.65 <sup>abc</sup>	7.84±0.15 <sup>ab</sup>
	10—20	0.07±0.03 <sup>b</sup>	0.31±0.07 <sup>ac</sup>	27.68±0.75 <sup>abc</sup>	57.53±1.67	11.21±0.73	3.33±0.39 <sup>b</sup>	8.13±0.34
$T_0 \times W_{60}$	0—10	0.20±0.05	0.42±0.10	27.83±1.63	56.21±1.25	10.58±1.11 <sup>abc</sup>	4.85±1.02 <sup>ac</sup>	7.69±0.11 <sup>bc</sup>
	10—20	0.05±0.02 <sup>b</sup>	0.31±0.09 <sup>ac</sup>	28.61±1.47 <sup>ac</sup>	56.29±1.82	10.07±1.45	4.95±0.76 <sup>a</sup>	8.08±0.25
$T \times W_0$	0—10	0.23±0.04 <sup>a</sup>	0.40±0.08 <sup>a</sup>	28.77±2.14 <sup>a</sup>	54.60±2.25	11.26±0.30 <sup>a</sup>	4.38±0.29 <sup>a</sup>	7.90±0.19
	10—20	0.66±0.03	0.29±0.07	29.06±1.45 <sup>a</sup>	55.77±1.59	10.77±0.90	3.92±0.14 <sup>a</sup>	8.21±0.29
$T \times W_{20}$	0—10	0.39±0.08 <sup>ac</sup>	0.33±0.09 <sup>ac</sup>	26.83±3.21 <sup>ac</sup>	54.69±2.43	13.20±1.07 <sup>ac</sup>	4.21±1.13 <sup>a</sup>	7.95±0.26
	10—20	0.18±0.05	0.32±0.08	26.61±2.44 <sup>ac</sup>	56.15±1.48	12.78±1.99	3.78±0.71 <sup>a</sup>	8.19±0.33
$T \times W_{40}$	0—10	0.47±0.24 <sup>bc</sup>	0.25±0.51 <sup>bc</sup>	24.50±0.38 <sup>bc</sup>	54.55±4.09	11.80±2.27 <sup>ac</sup>	8.28±2.06 <sup>b</sup>	7.98±0.36
	10—20	0.12±0.07	0.30±0.06	26.63±1.55 <sup>ac</sup>	54.78±2.86	12.65±2.54	5.12±0.64 <sup>b</sup>	8.20±0.32
$T \times W_{60}$	0—10	0.34±0.06 <sup>abc</sup>	0.31±0.04 <sup>abc</sup>	26.59±1.77 <sup>abc</sup>	54.52±2.06	14.11±3.08 <sup>bc</sup>	3.94±0.51 <sup>a</sup>	8.01±0.30
	10—20	0.17±0.04	0.25±0.03	26.46±1.91 <sup>bc</sup>	56.38±1.16	13.12±2.09	3.28±0.31 <sup>a</sup>	8.16±0.40

$T_0$ 表示自然温度;T表示增温; $W_0$ ,  $W_{20}$ ,  $W_{40}$ 和  $W_{60}$ 分别表示降水减少 0, 20%, 40% 和 60%。同列不同字母表示相同土层不同处理间的差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

在自然温度下,降水减少对沙质草地土壤细砂含量没有显著影响,两层土壤机械组成变化一致,均为处理高于对照。增温和降水减少的交互作用对 0—10 cm 土壤细砂含量没有显著影响,但对同层极细砂和黏粉粒的影响达到显著水平;对 10—20 cm 土壤的粗砂、

细砂和极细砂含量没有显著影响,只对黏粉粒含量的影响达到显著水平,并在降水减少 40% 时达到最高。

所有植物群落的土壤均显弱碱性,在自然温度下,降水减少降低了 0—10 cm 土壤 pH,却增加了 10—20 cm 的 pH,其中降水减少 20% 时土壤 pH 显



著低于对照。增温和降水减少的交互作用使得 0—10 cm 土壤 pH 增加、10—20 cm 降低,但是所有处理下两层土壤 pH 差异均未达到显著水平。

2.2 土壤微生物量碳氮的变化特征

短期增温和降水减少对土壤 MBC、MBN 和 MBC/MBN 均产生影响(表 2)。增温显著影响了沙质草地土壤 MBC( $P<0.05$ )、MBN( $P<0.05$ )和 MBC/MBN( $P<0.01$ );降水减少显著影响了土壤 MBN( $P<0.01$ )和 MBC/MBN( $P<0.05$ );增温和降水减少的交

互作用极显著地影响了土壤 MBC 和 MBN( $P<0.01$ )。在自然温度下,沙质草地土壤 MBC 和 MBN 对降水减少梯度的响应一致,其含量的变化趋势为降水减少 40%>降水减少 20%>降水减少 60%,与对照相比,增幅分别达到 87.9%和 98.8%。土壤 MBC、MBN 和 MBC/MBN 对增温和降水减少交互作用的响应不一致,中度干旱胁迫时植物群落土壤 MBC 和 MBN 含量最低,其中土壤 MBC 显著低于对照,降幅达 25.67%,土壤 MBN 显著低于重度干旱胁迫时,差异幅度达 48.16%(图 2)。

表 2 短期增温和降水减少对沙质草地土壤微生物生物量碳 MBC、微生物生物量氮 MBN 和 MBC/MBN 的影响

Table 2 The effects of short-term warming and precipitation reduction on soil MBC, MBN and MBC/MBN in sandy grassland							
处理	df	MBC/(mg·kg <sup>-1</sup> )		MBN/(mg·kg <sup>-1</sup> )		MBC/MBN	
		<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
T	1	9.040	<b>0.008</b>	5.033	<b>0.039</b>	16.713	<b>0.001</b>
W	3	1.597	0.229	6.398	<b>0.005</b>	4.576	<b>0.017</b>
T×W	3	13.521	<b>&lt;0.001</b>	14.336	<b>&lt;0.001</b>	0.627	0.068

表中加粗的数字表示  $P<0.05$ ;T 和 W 分别表示增温和降水减少处理。

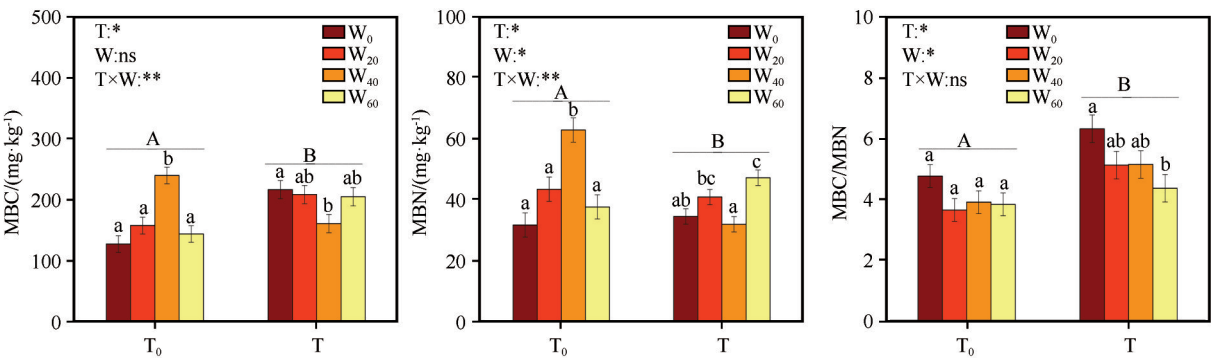


图 2 短期增温和降水减少对沙质草地土壤微生物量碳氮的影响(T<sub>0</sub>表示自然温度;T 表示增温;W<sub>0</sub>、W<sub>20</sub>、W<sub>40</sub>、W<sub>60</sub> 分别表示降水减少 0、20%、40%、60%。不同大写字母表示相同降水减少条件下增温处理之间的差异显著,

小写字母表示相同温度条件下降水减少处理之间的差异显著, $P<0.05$ ;\* ,处理效应显著, $P<0.05$ ;

\*\* ,处理效应极显著, $P<0.01$ ;ns,处理效应不显著)

Fig.2 Effects of short-term warming and precipitation reduction on soil MBC, MBN and MBC/MBN in sandy grassland (T<sub>0</sub>, natural temperature; T, warming; W<sub>0</sub>, W<sub>20</sub>, W<sub>40</sub> and W<sub>60</sub>, precipitation decreased by 0, 20%, 40% and 60%,

Different capital letters indicate a significant difference between temperature treatments at the same precipitation conditions, and small letters show a significant differencebetween precipitation reduction treatments at the same temperature conditions,  $P<0.05$ )

2.3 土壤酶活性的变化特征

增温极显著地影响了 S-UE、S-CL 和 S-ALPT 活性( $P<0.01$ )。降水减少极显著地影响了 S-UE 和 S-ALPT 活性( $P<0.01$ ,表 3)。增温和降水减少的交互作用极显著地影响了 S-ALPT 活性( $P<0.01$ )。在自然温度下,降水减少变化降低了 S-ALPT 活性,并在

重度干旱胁迫时达到最低,与对照相比减幅达 32.8%;增加了 S-UE 活性,并在轻度干旱胁迫时其值达最高。增温和降水减少的交互作用提高了 S-UE 含量,而且处理>对照,增幅达到 20.42%;对 S-ALPT 活性的影响达显著水平,在中度干旱胁迫时达最高,并显著高于对照(图 3)。

表 3 短期增温和降水减少对沙质草地土壤脲酶 S-UE、纤维素酶 S-CL 和碱性蛋白酶 S-ALPT 的影响

Table 3 The effects of short-term warming and precipitation reduction on S-UE, S-CL and S-ALPT in sandy grassland							
处理	df	S-UE/(U·g <sup>-1</sup> )		S-CL/(U·g <sup>-1</sup> )		S-ALPT/(U·g <sup>-1</sup> )	
		F	P	F	P	F	P
T	1	13.981	0.001	7.539	0.001	8.205	0.007
W	3	9.972	<0.001	0.701	0.558	13.309	<0.001
T×W	3	1.962	0.139	1.231	0.315	16.432	<0.001

T 和 W 分别代表增温和降水减少处理。

2.4 土壤 pH、微生物量碳氮与酶活性的相关性

土壤 pH 与 3 种土壤酶(S-CL、S-UE 和 S-ALPT) 活性正相关(表 4);与土壤 MBC、MBN 和 MBC/MBN 负相关,并且与 MBC 的相关性达显著水平( $P$

<0.05)。土壤 MBC 和 MBN 与土壤酶活性的相关性表现一致,即都与 S-CL 负相关,与 S-UE 和 S-ALPT 正相关,其中 MBN 与 S-ALPT 的相关性达显著水平( $P$ <0.05)。土壤 MBC/MBN 与土壤 MBC 呈显著正相关( $P$ <0.05),与其余参数均呈负相关关系。

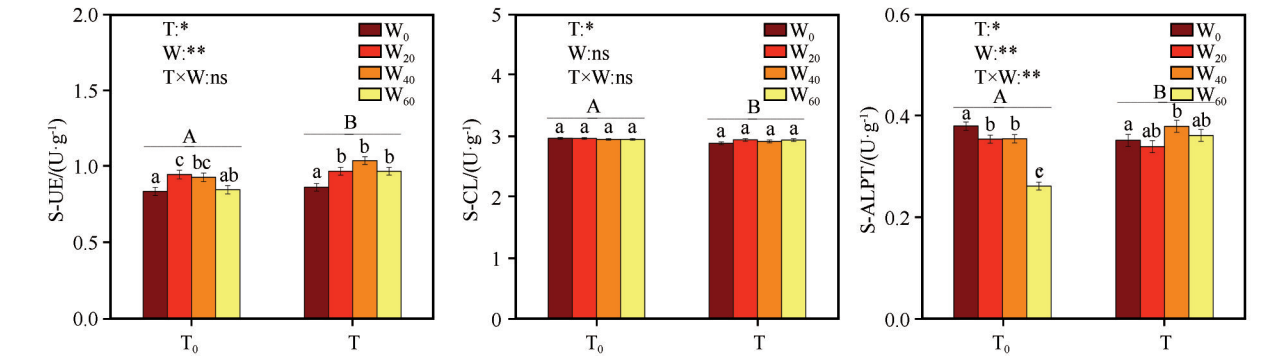


图 3 短期增温和降水减少对沙质草地土壤酶活性的影响(T<sub>0</sub>表示自然温度;T 表示增温;W<sub>0</sub>、W<sub>20</sub>、W<sub>40</sub>、W<sub>60</sub> 分别表示降水减少 0、20%、40%、60%。不同大写字母表示相同降水减少条件下增温处理之间的差异显著,小写字母表示相同温度条件下降水减少处理之间的差异显著, $P$ <0.05;\*,处理效应显著, $P$ <0.05;\*\*,处理效应极显著, $P$ <0.01;ns,处理效应不显著)

Fig.3 Effects of short-term warming and precipitation reduction on soil enzyme activities in sandy grassland (T<sub>0</sub>, natural temperature; T, warming; W<sub>0</sub>, W<sub>20</sub>, W<sub>40</sub> and W<sub>60</sub>, precipitation decreased by 0, 20%, 40% and 60%, Different capital letters indicate a significant difference between temperature treatments at the same precipitation conditions, and small letters show a significant difference between precipitation reduction treatments at the same temperature conditions,  $P$ <0.05)

表 4 土壤微生物生物量和酶活性之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil microbial biomass and soil enzyme activity						
项目	pH	MBC	MBN	S-UE	S-CL	S-ALPT
MBC	-0.436*					
MBN	-0.194	0.155				
S-UE	0.252	0.099	0.146			
S-CL	0.226	-0.067	-0.066	-0.098		
S-ALPT	0.143	0.065	0.383*	0.182	-0.230	
MBC/MBN	-0.174	0.414*	-0.522**	-0.344	-0.003	-0.194

pH 表示土壤 pH 值;MBC 表示土壤微生物量碳;MBN 表示土壤微生物量氮;S-UE 表示土壤脲酶;S-CL 表示土壤纤维素酶;S-ALPT 表示土壤碱性蛋白酶;\*表示显著相关( $P$ <0.05);\*\*表示极显著相关( $P$ <0.01)。

### 3 讨论

#### 3.1 短期增温和降水减少对土壤微生物量碳氮的影响

土壤微生物量碳、氮在一定程度上能够反映土壤微生物的数量,体现土壤微生物的活性<sup>[5]</sup>,常作为土壤对环境响应的指标<sup>[28]</sup>。本研究,沙质草地土壤MBC主要受增温以及增温和降水减少的交互作用影响;增温、降水减少及其交互作用对土壤MBN都有显著影响;土壤MBC/MBN主要受温度和降水减少影响。已有研究也支持了本项结果,即全球变化大背景下,土壤MBC主要受年均温的影响,土壤MBN主要受海拔和年均降水量的综合影响,土壤MBC/MBN对增温和降水变化的响应都很明显<sup>[6]</sup>。在自然温度下,降水减少对沙质草地土壤MBC和MBN的影响趋势一致,均在中度干旱胁迫时,其值达到最高,涨幅近1倍。干旱加剧可能会造成与土壤硝化速率及与之相关的功能微生物的敏感性差异<sup>[29]</sup>。此外,短期内大量减少降水会限制微生物获取底物的能力并在很大程度上抑制微生物生长,从而影响土壤MBC和MBN<sup>[30]</sup>。在增温以及增温和重度干旱胁迫交互作用时土壤MBC和MBN含量分别达到最高。增温会通过降低不同类型土壤微生物氮的利用效率,从而提高土壤MBC和MBN含量<sup>[31-32]</sup>。荒漠和典型草原的相关研究结果表明降水减少通过调节土壤水分和基质的有效性,从而控制土壤微生物活动和生物量<sup>[9]</sup>。也有研究发现重度干旱处理可显著提高荒漠土壤中土壤MBC、MBN水平<sup>[8]</sup>。

#### 3.2 短期增温和降水减少对土壤酶活性的影响

土壤酶主要来源于土壤微生物的活动、植物根系分泌物和动植物残体腐解过程<sup>[33]</sup>。本研究,增温对S-UE、S-CL和S-ALPT活性均有显著影响;降水减少只对S-UE和S-ALPT活性有显著影响;增温和降水减少的交互作用仅对S-ALPT活性有显著影响。增温通过改变土壤有机碳组分和提高有机碳分解速率来调节土壤酶活性,而降水变化会改变凋落物分解对气候变暖的敏感性<sup>[34]</sup>。荒漠生态系统模拟降水处理改变了土壤酶活性,多种土壤水解酶活性都随土壤湿度的增加而升高<sup>[30]</sup>。短期干旱也会减慢土壤氮矿化和碳循环过程,改变与碳氮循环

相关酶活性<sup>[35]</sup>。短期增温、降水减少及其交互作用对沙质草地S-CL活性几乎没有影响,对S-UE活性影响较小。这可能是因为短期环境胁迫时植物群落物种组成、生物量、土壤温度和水分的变化较小,所以部分土壤酶活性的变化不大,青藏高原高寒草甸生态系统相关试验结果支持了本研究<sup>[36]</sup>。在自然温度下,降水减少会降低S-ALPT活性,在重度干旱胁迫时达到最低,减幅约1/3。这说明降水减少改变了土壤酸碱度,从而降低了S-ALPT水解能力<sup>[24]</sup>。

#### 3.3 土壤pH、微生物量碳氮与酶活性的相关性

土壤酸碱度是预测沙质草地土壤微生物生物量和酶活性的重要因子。本研究中,土壤pH与土壤MBC、MBN和MBC/MBN负相关,并且与土壤MBC显著相关,说明土壤pH对微生物量碳具有较大的影响<sup>[37-38]</sup>。随着土壤pH增加,真菌的比例升高<sup>[39]</sup>,更多的碳需求影响土壤MBC含量<sup>[40-41]</sup>。土壤pH与S-CL、S-UE和S-ALPT活性正相关。这说明沙质草地土壤pH对土壤酶催化功能作用重大。也有研究认为,土壤pH通过改变土壤酶空间构象、氨基酸残基微环境而影响其活性<sup>[42]</sup>。土壤MBC、MBN与S-UE、S-ALPT呈正相关,其中MBN与S-ALPT的相关性达显著水平。这与许华等<sup>[30]</sup>和王杰等<sup>[43]</sup>对干旱荒漠区和贝加尔针茅草原的研究结果一致,说明S-UE和S-ALPT活性提高可以通过促进土壤微生物对更多能源物质的分解吸收,增加土壤MBC和MBN的积累,S-ALPT通过影响土壤有机质的分解,继而影响氮的储存和循环<sup>[44]</sup>。

### 4 结论

增温对沙质草地土壤MBC、MBN、MBC/MBN和酶活性均有显著影响。降水减少对沙质草地土壤MBN、MBC/MBN、S-UE和S-ALPT活性有显著影响。增温和降水减少的交互作用对沙质草地土壤MBC、MBN和S-ALPT活性有显著影响。

自然温度下,降水减少40%时土壤MBC和MBN含量最高。降水减少60%时S-ALPT活性最低。在增温条件下,降水减少40%时土壤MBC和MBN含量最低,S-UE含量最高。

土壤pH与土壤MBC、MBN和MBC/MBN呈负相关。土壤pH与S-CL、S-UE和S-ALPT活性呈正相关。土壤MBC、MBN与S-UE、S-ALPT呈正相关。

## 参考文献:

- [1] Evgenia B, Yakov K. Active microorganisms in soil: critical review of estimation criteria and approaches[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 67: 192–211.
- [2] 许森平, 任成杰, 张伟, 等. 土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学计量对气候变化的响应机制[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2445–2454.
- [3] Xiao W, Chen X, Jing X, et al. A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 123: 21–32.
- [4] 刘放, 吴明辉, 魏培洁, 等. 疏勒河源高寒草甸土壤微生物生物量碳氮变化特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(18): 6416–6426.
- [5] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(11): 3598–3605.
- [6] 吴晓玲, 张世熔, 蒲玉琳, 等. 川西平原土壤微生物生物量碳氮磷含量特征及其影响因素分析[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(10): 1607–1616.
- [7] 赵玉涛, 韩士杰, 李雪峰, 等. 模拟氮沉降增加对土壤微生物量的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009(1): 49–51.
- [8] 许华, 何明珠, 唐亮, 等. 荒漠土壤微生物量碳、氮变化对降水的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(4): 1295–1304.
- [9] Liu W X, Allison S D, Xia J Y, et al. Precipitation regime drives warming responses of microbial biomass and activity in temperate steppe soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52: 469–477.
- [10] 文小琴, 舒英格, 何欢. 喀斯特山区土地不同利用方式的土壤养分及微生物特征[J]. *西南农业学报*, 2018, 6: 1227–1233.
- [11] 田耀武, 和武宇恒, 翟淑涵, 等. 陶湾流域草本植物土壤及土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(6): 1643–1650.
- [12] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, et al. Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC)[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 152–163.
- [13] 江森华, 倪梦颖, 周嘉聪, 等. 增温和降雨减少对杉木幼林土壤酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(11): 3210–3219.
- [14] Xu H W, Qu Q, Chen Y H, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 196: 104812.
- [15] 解丽娜, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地南缘绿洲土壤酶活性与理化因子相关性[J]. *环境科学研究*, 2014(11): 1306–1313.
- [16] 周际海, 郜茹茹, 魏倩, 等. 旱地红壤不同土地利用方式对土壤酶活性及微生物多样性的影响差异[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 327–332.
- [17] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J]. *环境科学*, 2020, 41(2): 895–904.
- [18] 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 等. 黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征[J]. *环境科学*, 2021(1): 411–421.
- [19] Zhang Y L, Chen L J, Chen X H, et al. Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land[J]. *Catena*, 2015, 133: 64–70.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2014–06–15.
- [21] 卢静, 刘金波, 盛荣, 等. 短期落干对水稻反硝化微生物丰度和 $N_2O$ 释放的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 10: 2879–2884.
- [22] Daniel G, Rainer G J, Bernard L. Potential soil enzyme activities are decoupled from microbial activity in dry residue-amended soil[J]. *Pedobiologia-International Journal of Soil Biology*, 2012, 55(5): 253–261.
- [23] Tang S R, Cheng W G, Hu R G, et al. Five-year soil warming changes soil C and N dynamics in a single rice paddy field in Japan[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143845.
- [24] Li G L, Kim S J, Han S H, et al. Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 212–221.
- [25] 王涛. 沙漠化研究进展[J]. *中国科学院院刊*, 2009, 24: 290–296.
- [26] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会. 科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [27] 陈新月, 姚晓东, 曾文静, 等. 北方农牧交错带草地土壤微生物量碳氮空间格局及驱动因素[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(2): 250–260.
- [28] 王丽娜, 罗久富, 杨梅香, 等. 氮添加对退化高寒草地土壤微生物量碳氮的影响[J]. *草业学报*, 2019, 28(7): 38–48.
- [29] 李磊, 王岩, 胡姝娅, 等. 草甸草原土壤碳/氮矿化潜力及土壤微生物水分敏感性对极端干旱的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3): 814–820.
- [30] 许华, 何明珠, 孙岩. 干旱荒漠区土壤酶活性对降水调控的响应[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(6): 790–797.
- [31] Li Y Q, Qing Y X, Lyu M K, et al. Effects of artificial warming on different soil organic carbon and nitrogen pools in a subtropical plantation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 161–167.
- [32] Lin L, Zhu B, Chen C R, et al. Precipitation overrides warming in mediating soil nitrogen pools in an alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31438.
- [33] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [34] Suseela V, Tharayil N, Xing B S, et al. Warming alters potential enzyme activity but precipitation regulates chemical transformations in grass litter exposed to simulated climatic changes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 75: 102–112.
- [35] Hueso S, Hernández T, García C. Resistance and resilience of the soil microbial biomass to severe drought in semiarid soils: the importance of organic amendments[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 50: 27–36.
- [36] Li Y Y, Wang X X, Dong S K, et al. Effects of short-term and long-term warming on soil nutrients, microbial biomass and en-



- zyme activities in an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau of China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 140–142.
- [37] Yao X D, Zhang N L, Zeng H, et al. Effects of soil depth and plant-soil interaction on microbial community in temperate grasslands of northern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 96–102.
- [38] Rousk J, Brookes P C, Bååth E. The microbial PLFA composition as affected by pH in an arable soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(3): 516–520.
- [39] Bååth E, Anderson T H. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35 (7) : 955–963.
- [40] Keiblinger K M, Hall E K, Wanek W, et al. The effect of resource quantity and resource stoichiometry on microbial carbon-use-efficiency [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, 73(3) : 430–440.
- [41] Manzoni S, Taylor P, Richter A, et al. Environmental and stoichiometric control on microbial carbon-use efficiency in soils [J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1) : 79–91.
- [42] 王涵, 王果, 黄颖颖, 等. pH变化对酸性土壤酶活性的影响 [J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 2401–2406.
- [43] 王杰, 李刚, 修伟明, 等. 氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响 [J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(3): 237–245.
- [44] Cenini V L, Fornara D A, McMullan G, et al. Linkages between extracellular enzyme activities and the carbon and nitrogen content of grassland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 96: 198–206.

## Effects of short-term warming and precipitation reduction on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activity in sandy grassland

Wang Huaihai<sup>1,2</sup>, Huang Wenda<sup>1</sup>, He Yuanzheng<sup>1,2</sup>, Niu Yayi<sup>1,2</sup>, Zhu Yuanzhong<sup>1,2</sup>

(1. *Naiman Desertification Research 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*)

**Abstract:** In this study, we simulated climate change to explore the effects of short-term warming and precipitation reduction on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in sandy grassland plant communities, and further revealed the response rules of soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in sandy grassland to short-term climate change. The results showed that: (1) Short-term warming and precipitation reduction had significant effects on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities. (2) Under natural temperature, soil MBC and MBN contents in precipitation decreased by 40% increased by 87.9% and 98.8%, respectively. S-ALPT activity was the lowest in precipitation decreased by 60%, which decreased by 32.8%. (3) Under the warming condition, soil MBC and MBN contents were the lowest when precipitation decreased by 40%, with a decrease of 25.67% and 48.16%, respectively. S-UE content was the highest, and the increase range was 20.42%. (4) Soil pH was positively correlated with the activities of three soil enzymes, negatively correlated with soil microbial biomass carbon and nitrogen. Soil microbial biomass carbon and nitrogen were negatively correlated with S-CL, and positively correlated with S-UE and S-ALPT.

**Key words:** warming; precipitation reduction; sandy grassland; microbial biomass carbon and nitrogen; soil enzyme activity