

DOI: 10.5846/stxb202207172040

吕广一, 贺梦婷, 徐学宝, 王成杰. 增温、增雨对荒漠草原植物和土壤总氮及稳定氮同位素的影响. 生态学报, 2023, 43(10): 4167-4175.

Lü G Y, He M T, Xu X B, Wang C J. Effects of warming and increasing precipitation on total nitrogen and stable nitrogen isotopes of plants and soil in the desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4167-4175.

增温、增雨对荒漠草原植物和土壤总氮及稳定氮同位素的影响

吕广一, 贺梦婷, 徐学宝, 王成杰*

草地资源教育部重点实验室/内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 呼和浩特 010011

摘要:剖析气候变化下植物和土壤氮含量关系, 有助于了解植物—土壤氮循环, 揭示植物群落和土壤演替趋势。收集了增温(环境温度、增温 2℃ 和 4℃) 增雨(自然降水量、降水量增加 25% 和 50%) 6 年析因实验处理后荒漠草原优势物种和土壤样品, 通过对叶片和土壤的总氮(Total nitrogen, TN)、有效氮(Available nitrogen, AN)以及稳定氮同位素(Stable nitrogen isotopes, $\delta^{15}\text{N}$) 测定分析, 探究了增温增雨后荒漠草原植物和土壤氮含量变化趋势以及控制植物—土壤氮循环的主要因子。结果表明: (1) 单独增温和同时增温增雨使土壤 TN、AN 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值升高但不显著 ($P>0.05$); 单独增雨显著降低了土壤 AN ($P<0.05$)。 (2) 单独增温使短花针茅(*Stipa breviflora*) 和栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*) 叶片 TN 升高, 而冷蒿(*Artemisia frigida*) 和蒙古葱(*Allium mongolicum*) 叶片 TN 降低; 单独增雨和同时增温增雨显著降低了 4 个物种叶片 TN ($P<0.05$), 这可能是受到了土壤 AN 的调控。 (3) 增温会使叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值富集, 增雨会使叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值贫化, 叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 受温度、降水、土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 值和植物叶片 TN 的共同调节。因此, 本研究认为增温刺激了荒漠草原物种间的氮竞争, 有助于短花针茅和栉叶蒿对氮的吸收和积累, 这可能会增加其在植物群落中的占比。此外, 降水量对荒漠草原植物—土壤氮循环有主导作用, 频发的降水事件可能会加剧荒漠草原的氮限制。

关键词: 气候变化; 荒漠草原; 植物和土壤; 总氮; 稳定氮同位

Effects of warming and increasing precipitation on total nitrogen and stable nitrogen isotopes of plants and soil in the desert steppe

LÜ Guangyi, HE Mengting, XU Xuebao, WANG Chengjie*

Key Laboratory of Grassland Resources of the Ministry of Education / College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China

Abstract: Dissecting the relationship between plant and soil nitrogen (N) content under climate change is helpful to understand the plant-soil N cycle and reveal the change trend of plant community and soil. This study collected dominant species and soil samples in desert steppe under the six years of factorial experiment of warming (ambient temperature, warming 2℃ and warming 4℃) and increasing precipitation (natural precipitation, increasing precipitation by 25% and 50%). By measuring and analyzing the total nitrogen (TN), available nitrogen (AN) and stable nitrogen isotopes ($\delta^{15}\text{N}$) of leaves and soils, we explored the change trend of N content of plants and soil in desert steppe after warming and increasing precipitation, and revealed the main factors controlling the plant-soil N cycle. The results show that: (1) warming and the interaction of warming and increasing precipitation insignificantly increased the TN, AN and $\delta^{15}\text{N}$ of soil ($P>0.05$). Increasing precipitation significantly reduced the AN of soil ($P<0.05$). (2) Warming activated nitrogen

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960357); 内蒙古自治区“科技兴蒙”国际合作引导项目(2021CG0020); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS03065)

收稿日期: 2022-07-17; 采用日期: 2023-03-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nmgcjwang3@163.com

competition among species, which increased the leaves TN of *Stipa breviflora* and *Neopallasia pectinata* and decreased the leaves TN of *Artemisia frigida* and *Allium mongolicum*. Increasing precipitation and the interaction of warming and increasing precipitation significantly reduced the leaves TN of four species, which may be regulated by soil AN. (3) Warming enriched the $\delta^{15}\text{N}$ of leaves, and increasing precipitation depleted the $\delta^{15}\text{N}$ of leaves. The $\delta^{15}\text{N}$ of leaves was regulated by temperature, precipitation, the $\delta^{15}\text{N}$ of soil and the TN of leaves. Therefore, warming stimulated the N competition among species in desert steppe, which contributed to the absorption and accumulation of N by *Stipa breviflora* and *Neopallasia pectinata*, which may increase their proportion in plant communities. In addition, precipitation plays a leading role in the plant-soil N cycle of desert steppe and frequent precipitation events may exacerbate nitrogen limitation in desert steppe.

Key Words: climate change; desert steppe; plant and soil; total nitrogen; stable nitrogen isotope

随着全球气候持续变暖,极端降水事件也向中高纬度地区转移^[1],这导致草地生态系统养分循环发生了改变^[2-3]。植物、土壤氮储备在很大程度上限制着草地生态系统服务功能和初级生产力^[4]。因此,监测植物与土壤间氮循环对探究草地生态系统应对气候变化尤为重要^[5-6]。植物和土壤总氮(Total nitrogen, TN)与稳定氮同位素(Stable nitrogen isotopes, $\delta^{15}\text{N}$)参与草地生态系统生物化学反应过程,并在一定时空上反应了生态系统氮循环特征^[7-10],能为生态系统中氮循环研究提供关键的理论依据^[11-12]。例如,植物叶片 TN 和草地植被生物量之间存在很大相关性^[13];植株叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 可以用来指示环境变化所引起的生态系统氮循环速率的变化情况^[14]。因此,有必要观察和监测植物和土壤 TN 和 $\delta^{15}\text{N}$,为深入了解区域性氮循环模式,探究气候变化影响下草地植物群落的演替趋势提供有效信息^[12]。

大量研究证实,增温对植物和土壤氮含量影响因取样时间而异^[15-16]。刘美等人^[15]研究表明,模拟增温会降低青藏高原植物生长季末期土壤无机氮含量;宗宁等人^[16]也发现增温会使土壤无机氮在植物生长季的中期增加,而在植物生长季末期降低。此外,温度对植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也有显著的影响^[17-19]。例如,刘晓宏等人^[17]在东非大裂谷的研究表明,年均温度每增加 1℃,植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 就会偏正 0.5‰;Amundson 等人^[18]总结以往的研究成果,发现植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 随年均温度的降低而系统性减小;而刘贤赵等人^[19]在北京东灵山研究发现,植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值与年均温度呈现二次曲线关系,即当年均温度低于 3.5℃ 时,植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值随年均温度的增加而偏负;当年均温度高于 3.5℃ 时,植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值随年均温度的增加而升高。另外,降水对植物和土壤氮含量的影响也不容忽视。梁晓谦等人^[20]研究表明,增加降水量会促进宁夏荒漠草原植物和土壤氮储备;而宋一凡等人^[21]在内蒙古荒漠草原 3 个雨量带的研究表明,随着自然降水的减少,土壤氮含量呈递减趋势。因此,降水对植物和土壤氮含量的影响也因研究地点而异。大多数研究认为植物叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随年均降雨的增加而降低。例如,刘艳杰等人^[22]发现,内蒙古常见的 C_3 和 C_4 植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值随年均降雨的增加而显著降低;而 Craine^[23] 研究发现,只有不能生物固氮的植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值会随着年均降雨的增加而降低,而具有固氮能力的植物叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 值与年均降雨量不相关。然而,以往大多研究是集中在高寒草原^[24-25] 和山地草原^[26],荒漠草原生态系统却少有报道。

内蒙古荒漠草原因其植被物种丰富度远低于其他草原类型,被认为是脆弱的草原生态系统^[27],有可能面临沙漠化的危险^[28]。有模型研究表明,在未来年均温度和总降水量升高的条件下,内蒙古荒漠草原的面积将持续增加^[29]。因此,本研究收集了增温和增雨处理下荒漠草原优势物种和土壤样品,通过测定叶片和土壤的总氮、有效氮以及稳定氮同位素值,分析了增温和增雨后荒漠草原植物和土壤氮含量的差异和变化规律,探究了荒漠草原植物—土壤间氮循环的主要调控因子,为预测气候变化背景下荒漠草原的植物群落演替及其限制因素提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

研究样地位于内蒙古自治区四子王旗的荒漠草原(41°47′10″N, 111°53′48″E),主要的土壤类型为栗钙

土。其植被覆盖率较低,建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种为冷蒿(*Artemisia frigida*)、蒙古葱(*Allium mongolicum*)和栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)等,伴生种有阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)和银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等。研究地点处于温带大陆性季风气候区,2020 和 2021 年植物生长季(5—10 月份)平均温度分别为 18.43℃ 和 19.68℃,植物生长季的总降雨量分别为 225.29mm 和 180.67mm(图 1)。

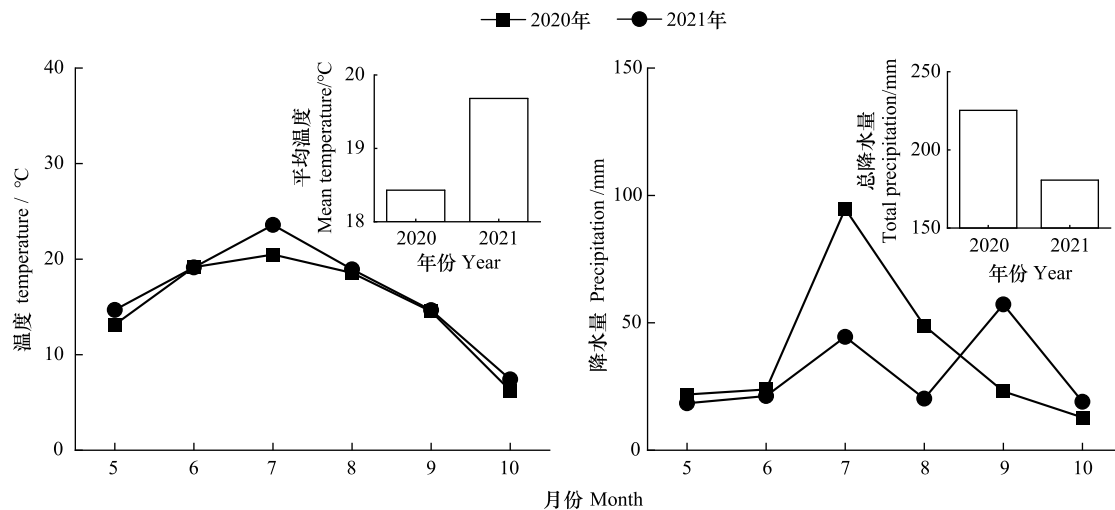


图 1 2020 和 2021 年植物生长季的温度和降水量

Fig.1 The temperature and precipitation of the plant growing season in 2020 and 2021

1.2 实验设计

增温和增雨的析因实验始于 2014 年,由中国科学院植物研究所和中国科学院内蒙古草业研究中心合作设计完成。实验主要设置了模拟增温和增加降水两个主要的操控因子,模拟增温有 3 个梯度,分别为环境温度(T_0)、增温 2℃(T_1)和增温 4℃(T_2),通过开顶式气室(open top chamber, OTC, 图 2)实现模拟增温效果。每个 OTC 的基底是边长为 1.5m 的正六边形,高分别为 0.1m(T_0), 1m(T_1)和 2.3m(T_2); OTC 的地上部分由透光率超过 90% 的玻璃镶嵌而成,并设有通风扇及人员进出的玻璃门。降水强度增加也有 3 个梯度,分别为自然降水(W_0)、降水量增加 25%(W_1)以及降水量增加 50%(W_2)。降水量增加效果通过雨水拦截装置实现(图 2),两种雨水拦截装置的面积分别为 OTC 基底面积的 25% 和 50%。在实验地发生自然降水时,不同面积

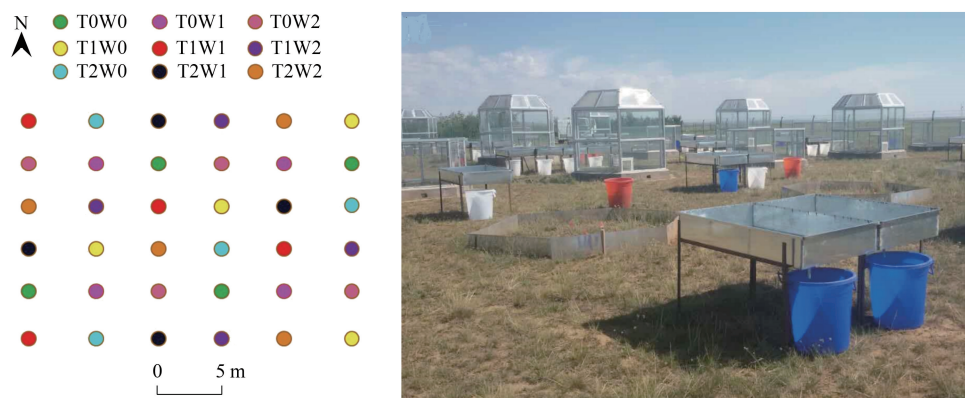


图 2 实验平台与增温、增雨装置

Fig.2 Study site and the equipment of increasing temperature and precipitation

T_0 :环境温度; T_1 :增温 2℃; T_2 :增温 4℃; W_0 :自然降水; W_1 :降水量增加 25%; W_2 :降水量增加 50%

内部,在不改变降水频度的前提下,达到实时梯度增加降水的效果。样地采取随机区组设计,设置 9 个处理 (T0W0、T0W1、T0W2、T1W0、T1W1、T1W2、T2W0、T2W1 和 T2W2),每个处理 4 个重复,共计 36 个 OTC (图 2)。

1.3 试验样品采集和测定

样品采集于 2020 年和 2021 年的 8 月中旬,我们选择研究区的 4 个建群种或优势种,即短花针茅、冷蒿、蒙古葱和栉叶蒿(长期实验处理后不存在物种丢失现象,在其它研究中也作为主要的研究物种^[7, 20–21],并且 4 个物种属于不同的功能群类型,更能体现出植物群落氮储备的整体变化情况)。在 36 个 OTC 中央的 1m × 1m 永久样方框内,摘取 4 个物种叶片,摘取时选择阳生、生长发育成熟的多株叶片,混合后放入标记的信封袋。在植物叶片采集完成后,我们使用直径 3cm 的土钻钻取土壤样品。土壤样品分两层采取(0—10cm 和 10—20cm),在 36 个 1m × 1m 永久样方框的外部钻取土壤样品 3 次,将相同土层的土壤混合后放入标记的塑封袋。将采集的植物和土壤样品带回实验室,经清洗、烘干、研磨后放入德国 Elementar 公司生产的 Isoprime100 稳定同位素质谱仪连接元素分析仪 (Vario Isotope Select) 中,测定得到植物叶片和土壤总氮含量以及稳定氮同位素值($\delta^{15}\text{N}$)。 $\delta^{15}\text{N}$ 是一个相对比值,用公式解释为: $\delta^{15}\text{N} = (R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}} - 1) \times 1000\text{‰}$,式中 $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 分别表示样品和标准物(空气) $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 的值。另外,我们还利用碱性水解扩散法获得了两层土壤的有效氮含量。

1.4 数据处理

首先,通过 SPSS 22 中的线性混合模型,分析了增温和增水的主效应以及交互作用对植物和土壤氮含量的影响。其次,单因素方差分析被用作对比 9 个处理间植物和土壤氮含量的差异。最后,我们通过皮尔森相关性分析探究了植物和土壤氮含量的相关关系。线性混合模型的表达式为: $y = T + W + T \times W + I$,式中 y 是植物和土壤氮含量指标, T 是增温, W 是增水, $\times$ 是交互作用, I 是截距。此外,我们利用 AMOS 21.0 构建了气候因素、植物和土壤氮含量的结构方程模型。首先,基于线性混合模型、单因素方差分析和相关性分析,我们收集了生长季温度和降水量、增加温度和降水以及植物和土壤氮含量之间的因果关系,并假设了一个包含所有指标和假定关系的结构方程模型。其次,我们采用最大似然估计方法获得模型的路径系数,依次删除不重要的指标和路径,直到获得最终的结构方程模型。卡方、自由度、 P 值和均方根近似误差被用作评估模型的拟合优度。在本文中,所有的数据均在 SPSS 22 中分析,所有的图形均在 Origin Pro 2022b 中绘制,所有的表格均在 Microsoft Excel 2019 中制作。 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 表示统计分析中的显著性,较强显著性和极强显著性。

2 结果与分析

2.1 植物叶片的总氮和稳定氮同位素

线性混合模型结果表明,增温、增雨及其交互作用对短花针茅、冷蒿和蒙古葱的叶片总氮有显著影响($P < 0.05$),而对栉叶蒿叶片总氮的影响并不显著($P > 0.05$)。单因素方差分析结果表明,单独增水(T0W0、T0W1 和 T0W2)显著降低了 4 种植物的叶片氮含量($P < 0.05$);单独增温(T0W0、T1W0 和 T2W0)先增加后降低了栉叶蒿的叶片总氮,而显著降低了冷蒿和蒙古葱的叶片总氮($P < 0.05$)。与对照处理相比(T0W0),同时增加温度和降水(T1W1、T1W2、T2W1 和 T2W2)显著降低了 4 种植物叶片的总氮($P < 0.05$)。与叶片总氮相比,叶片稳定氮同位素对温度和降水的变化更加敏感。增温、增水及其交互作用对 4 种植物叶片稳定氮同位素有显著影响($P < 0.05$)。单因素方差分析结果表明,单独增水显著降低了 4 种植物叶片稳定氮同位素($P < 0.05$);单独增温显著降低了冷蒿叶片稳定氮同位素,而显著增加了栉叶蒿叶片稳定氮同位素($P < 0.05$)。与对照处理相比,同时增加温度和降水显著增加了 4 种植物叶片稳定氮同位素($P < 0.05$)(图 3)。

2.2 土壤的总氮、有效氮和稳定氮同位素

线性混合模型结果表明,增温、增水及其交互作用对土壤总氮、有效氮和稳定氮同位素影响并不显著($P >$

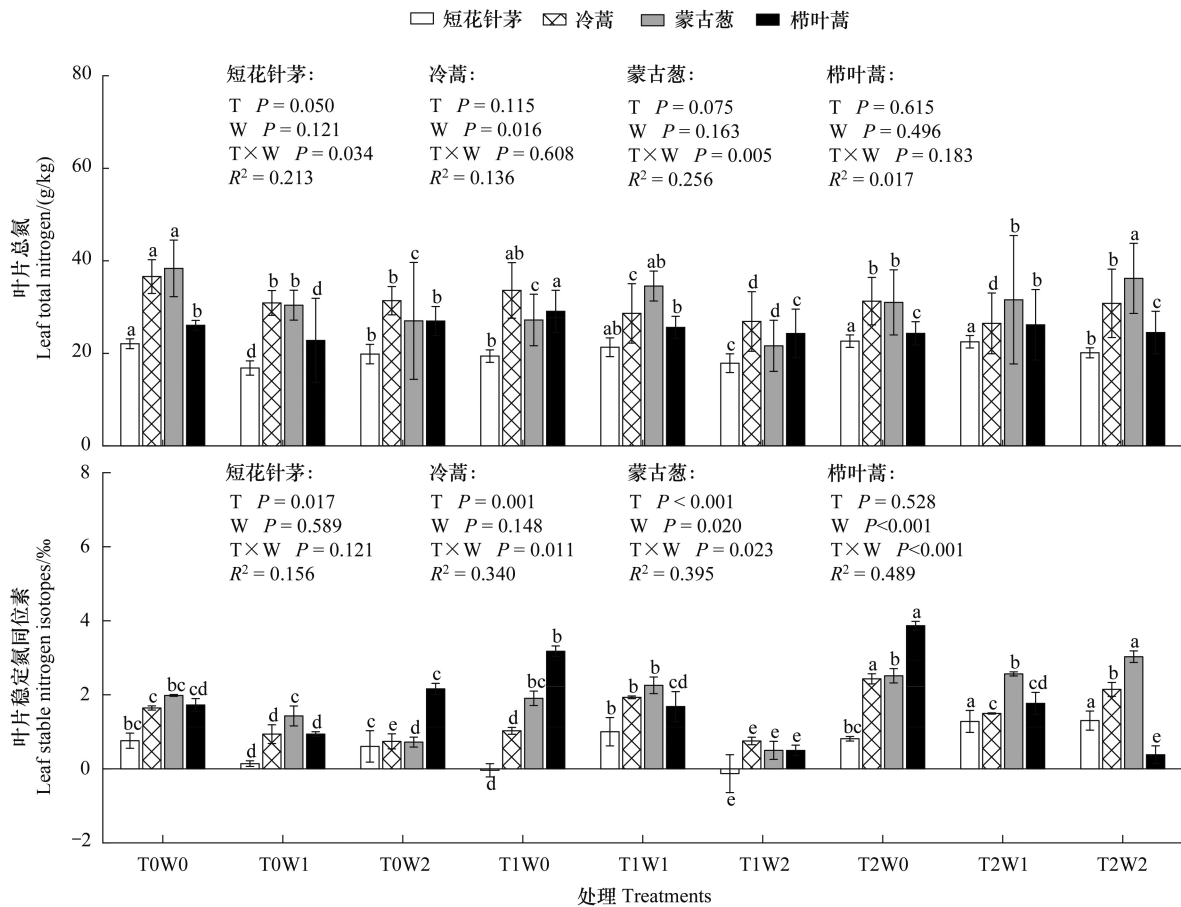


图3 增温、增水对植物叶片总氮和稳定氮同位素的影响

Fig.3 Effects of increasing temperature (T) and water (W) on the total nitrogen (TN) and stable nitrogen isotopes ($\delta^{15}\text{N}$) in leaves

T 代表温度, W 代表降水, T×W 代表温度和降水的交互作用; 不同小写字母表示处理间显著差异 ($P < 0.05$)

0.05)。单因素方差结果表明, 单独或同时的增加温度和降水对 0—10cm 和 10—20cm 的土壤总氮均无显著影响 ($P > 0.05$); 单独增温和同时增温增水显著增加了 0—10cm 和 10—20cm 土壤稳定氮同位素 ($P < 0.05$); 单独增水以及同时增温增水显著降低了 0—10cm 和 10—20cm 土壤有效氮含量 ($P < 0.05$), 而单独增温增加了 0—10cm 和 10—20cm 土壤有效氮含量, 但结果并不显著 ($P > 0.05$) (图 4)。

2.3 植物和土壤氮含量的相关性分析

相关性分析的结果表明, 土壤总氮含量与土壤有效氮含量和叶片稳定氮同位素值有显著的正相关关系 ($P < 0.05$); 土壤有效氮含量与叶片总氮和稳定氮同位素有显著的正相关关系 ($P < 0.01$)。此外, 土壤稳定氮同位素值与叶片稳定氮同位素值有显著的正相关关系 ($P < 0.01$) (表 1)。

2.4 气候因素、植物和土壤氮素的结构方程模型

结构方程模型的结果表明, 生长季的降水量对土壤的总氮含量、有效氮含量和稳定氮同位素值有显著影响 ($P < 0.05$)。增加温度对土壤稳定氮同位素有显著的积极影响 ($P < 0.05$), 增加降水对土壤的有效氮含量有显著的消极影响 ($P < 0.05$)。与土壤总氮含量相比, 土壤有效氮含量对植物总氮含量有显著的积极影响 ($P < 0.05$)。此外, 增加温度和土壤稳定氮同位素值对植物稳定氮同位素值有显著的积极影响 ($P < 0.05$) (图 5)。

3 讨论

3.1 增温、增雨对植物与土壤氮含量的影响

研究表明, 内蒙古荒漠草原植物叶片总氮对增温和增雨的响应因物种而异, 这与国内的其他研究结

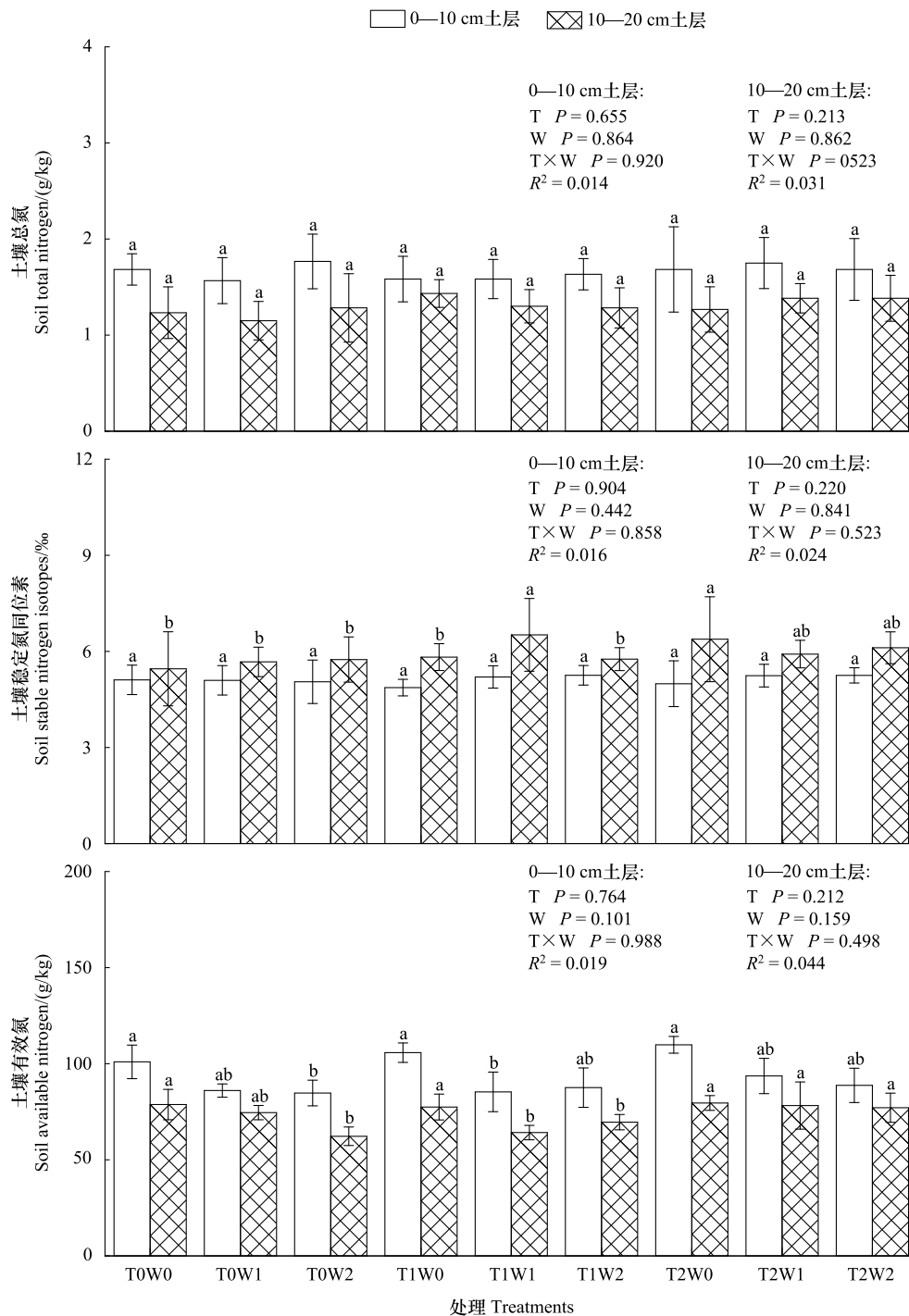


图4 增温、增水对土壤总氮、有效氮和稳定氮同位素的影响

Fig.4 Effects of increased temperature and water on the total nitrogen, available nitrogen and stable nitrogen isotope in soil

果一致。任海燕等人^[30]认为增水会降低针茅对硝态氮的吸收,而增加冰草对硝态氮的吸收在内蒙古的典型草原。此外,邓建明等人^[25]研究结果表明,增水显著的改变不同物种的氮吸收能力,并认为物种的根冠比是调节氮吸收的关键指标。本研究表明,单独增温会增加短花针茅和栉叶蒿的叶片氮含量,而降低冷蒿和蒙古葱的叶片氮含量(图3)。首先,OTC 模拟增温会使近地表温度和表层土壤温度升高,从而改变植物群落地上和地下的生存环境;与自然环境条件相比,增温和增雨会改变土壤中硝态氮和铵态氮的占比^[31-32],从而影响不同物种的氮吸收策略。其次,与优势物种冷蒿和蒙古葱相比,短花针茅作为内蒙古荒漠草原的建群种,其

自身具有较强的抗干旱能力,对外界温度的变化具有较强的适应性,并且其须根发达细长,能有效的吸收土壤中的养分含量^[33]。最后,短花针茅属于资源保守型物种,更加适合生长在资源贫乏的环境中;而蒙古葱属于资源获取型物种,具有生长发育快和养分吸收效率高等特点,更加适合生长在资源富集的环境中^[30]。因此,不同物种叶片氮含量在增温后的变化具有差异性。在本的研究中,单独增雨降低了短花针茅、冷蒿和蒙古葱的叶片氮含量(图3),我们认为这是由于增水显著降低了土壤有效氮含量(图4),导致植物群落氮吸收效率降低,这与其他草原类型的研究结果一致^[33-34]。武倩等人^[34]在内蒙古荒漠草原的研究表明,土壤有效氮含量受年均降水量调控,并对植物群落生物量有显著影响;陈琳等人^[35]对全球降水趋势对土壤氮循环的综述表明,增加降水会加速土壤氮的矿化速率,从而降低土壤有效氮含量。此外,研究表明长期的增加降水会促进土壤氮的淋溶,加剧了内蒙古典型草原的氮限制^[36]。综上所述,本研究认为增温会增加内蒙古荒漠草原建群种短花针茅和土壤的氮储备,而长期的增水降低了植物群落和土壤的氮含量,并且植物群落的氮吸收效率受土壤有效氮含量调控。

表1 植物和土壤氮含量的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of the nitrogen content in plant and soil

指标 Items	土壤总氮 Soil total nitrogen/ (g/kg)	土壤有效氮 Soil available nitrogen/ (g/kg)	土壤稳定 氮同位素 Soil stable nitrogen isotopes/‰	叶片总氮 Leaf total nitrogen/(g/kg)	叶片稳定 氮同位素 Leaf stable nitrogen isotopes /‰
土壤总氮/(g/kg) Soil total nitrogen	1	0.55 **	0.19	0.21	0.28 *
土壤有效氮/(g/kg) Soil available nitrogen		1	0.22	0.53 **	0.56 **
土壤稳定氮同位素/‰ Soil stable nitrogen isotopes			1	0.23	0.44 **
叶片总氮/(g/kg) Leaf total nitrogen				1	0.71 **
叶片稳定氮同位素/‰ Leaf stable nitrogen isotopes					1

数字是相关性系数,*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 时显著相关。土壤的总氮、有效氮和稳定氮同位素值为同一处理下两层土壤(0—10cm和10—20cm)的平均值;植物的总氮和稳定氮同位素值为同一处理下4种植物(短花针茅、冷蒿、蒙古葱和栉叶蒿)的平均值

3.2 增温、增雨对植物与土壤稳定氮同位素的影响

研究结果表明,增温对内蒙古荒漠草原植物叶片的稳定氮同位素值有积极影响,增水对植物叶片的稳定氮同位素值有消极影响(图3),而土壤的稳定氮同位素主要受到植物生长季的降水量和增温的调控(图5)。刘贤赵等人^[37]综述表明,无论是在全球尺度上还是在区域尺度上,植物的稳定氮同位素值与年均温度呈正相关关系,与年降水量呈负相关关系。较高的土壤温度会增加土壤硝化细菌的活性,促进土壤的硝化速率,增强土壤无机氮的有效性,从而使土壤的¹⁵N富集^[38];植物的稳定氮同位素值与土壤的稳定氮同位素值有很强的相关性^[39],从而使植物的稳定氮同位素值升高^[40]。降水的增加会加剧土壤氮的淋溶,导致土壤氮的流失,而植物稳定氮同位素的主要来源是对土壤无机氮的吸收和利用;增加降水也会影响土壤无机氮的组成,改变土壤中硝态氮和铵态氮的占比,从而影响植物的稳定氮同位素值^[23,30]。赵艳艳等人^[24]在高寒矮嵩草草甸草原的研究表明,增温对不同物种的稳定氮同位素值的影响有差异,并且温度升高会使建群种矮嵩草的稳定氮同位素值增加,这与我们的研究结果一致,增温会改善建群种的稳定氮同位素值。在我们的研究中,除了增温、增雨和土壤稳定氮同位素值对植物稳定氮同位素值有显著影响以外,植物的总氮含量与植物的稳定氮同位素也显著相关,这与其他研究地点的结果一致。吴田乡等人^[41]在内蒙古典型草原的研究表明,植物叶片的总氮与稳定氮同位素值呈显著正相关关系,并认为这种相关关系是由于菌根在吸收氮素时产生的分馏效应所引起的。此外,Kitayama等人^[26]在8个不同海拔序列样地中的研究也证实了这一结论。因此,本研究认为长期的模拟增温通过改变土壤无机氮含量使内蒙古荒漠草原土壤的稳定氮同位素值富集,而长期的增加降水通过加

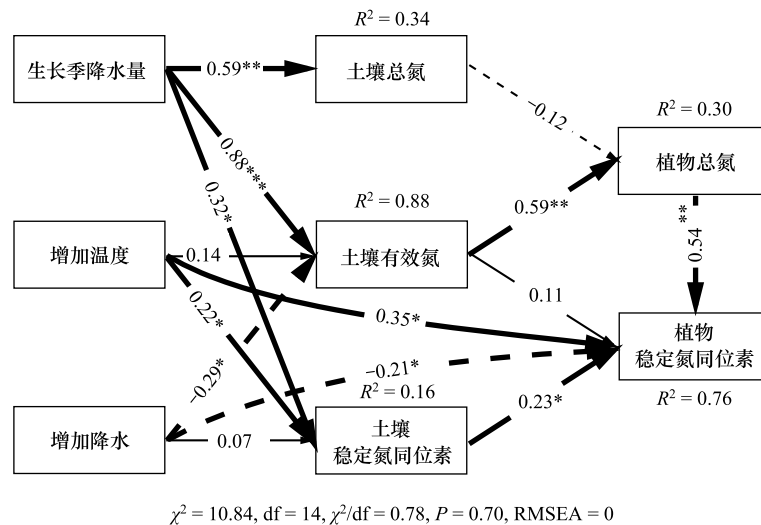


图5 气候因子对植物和土壤氮含量的直接和间接影响

Fig.5 The direct and indirect effects of climatic factors on nitrogen content in plants and soil

实线和虚线分别表示正面和负面影响,粗线表示有显著影响的路径。数字是路径系数; *、**和***分别表示在 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 时有显著影响; χ^2 : 卡方; RMSEA: 均方根近似误差; 土壤的总氮、有效氮和稳定氮同位素为同一处理下两层土壤 (0—10 cm 和 10—20 cm) 的平均值; 植物的总氮和稳定氮同位素值为同一处理下 4 种植物 (短花针茅、冷蒿、蒙古葱和栉叶蒿) 的平均值

速土壤氮的淋溶使土壤的稳定氮同位素值贫化; 内蒙古荒漠草原植物叶片的稳定氮同位素值则受到增温、增雨、土壤稳定氮同位素值和植物总氮含量的共同调节。

4 结论

增加温度和降水量对荒漠草原植物—土壤氮循环有重要影响。其中, 增温、增雨及其交互作用对荒漠草原植物叶片氮含量的影响因物种而异; 叶片的稳定氮同位素受温度、降水、土壤稳定氮同位素和叶片氮含量的共同调节。此外, 荒漠草原植物—土壤氮循环主要受降水量调控, 频发的降水事件可能会加剧荒漠草原的氮限制。

参考文献 (References):

- [1] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [2] 何茂松, 罗艳, 彭庆文, 严正兵, 杨思琪, 李凯辉, 韩文轩. 新疆 45 种荒漠植物粗根碳、氮、磷计量特征及其与环境的关系. 生态学杂志, 2019, 38(9): 2603-2614.
- [3] Gao Q Z, Li Y, Xu H M, Wan Y F, Jiangcun W Z. Adaptation strategies of climate variability impacts on alpine grassland ecosystems in Tibetan Plateau. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014, 19(2): 199-209.
- [4] Fornara D A, Tilman D. Ecological mechanisms associated with the positive diversity-productivity relationship in an N-limited grassland. Ecology, 2009, 90(2): 408-418.
- [5] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 卢宏典, 郭炳桥, 郑媛, 李曼, 程栋梁. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因子. 植物生态学报, 2015, 39(2): 159-166.
- [6] Gruber N, Galloway J N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature, 2008, 451(7176): 293-296.
- [7] 吕广一, 徐学宝, 高翠萍, 于志慧, 王新雅, 王成杰. 放牧对内蒙古不同类型草原植物和土壤总氮与稳定氮同位素的影响. 草业学报, 2021, 30(3): 208-214.
- [8] Sah S P, Rita H, Ilvesniemi H. ^{15}N natural abundance of foliage and soil across boreal forests of Finland. Biogeochemistry, 2006, 80(3): 277-288.
- [9] Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, Weathers K C. Plant and soil natural abundance $\delta^{15}\text{N}$: indicators of relative rates of nitrogen cycling in temperate forest ecosystems. Oecologia, 2007, 153(2): 399-406.
- [10] Aranibar J N, Goirán S B, Guevara A, Villagra P E. Carbon and nitrogen dynamics in a sandy groundwater-coupled ecosystem in the Monte Desert,

- indicated by plant stable isotopes. *Journal of Arid Environments*, 2014, 102: 58-67.
- [11] 禹朴家, 徐海量, 王炜, 张鹏, 赵新风, 傅彦仪. 荒漠草地土壤¹⁵N 同位素对水分变化的响应. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 241-244.
- [12] 周咏春, 张文博, 程希雷, 徐新阳. 植物及土壤碳同位素组成对环境变化响应研究进展. *环境科学研究*, 2019, 32(4): 565-572.
- [13] Liu C C, Liu Y G, Guo K, Qiao X G, Zhao H W, Wang S J, Zhang L, Cai X L. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium addition on the productivity of a Karst grassland: plant functional group and community perspectives. *Ecological Engineering*, 2018, 117: 84-95.
- [14] 林光辉. 稳定同位素生态学: 先进技术推动的生态学新分支. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 119-122.
- [15] 刘美, 马志良. 增温和植物去除对青藏高原东部高寒灌丛土壤不同形态氮的影响. *生态环境学报*, 2022, 31(3): 470-477.
- [16] 宗宁, 石培礼. 模拟增温对西藏高原高寒草甸土壤供氮潜力的影响. *生态学报*, 2019, 39(12): 4356-4365.
- [17] 刘晓宏, 赵良菊, Menassie Gasaw, 高登义, 秦大河, 任贾文. 东非大裂谷埃塞俄比亚段内 C₃ 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 及其环境指示意义. *科学通报*, 2007, 52(2): 199-206.
- [18] Amundson R, Austin A T, Schuur E A G, Yoo K, Matzek V, Kendall C, Uebersax A, Brenner D, Baisden W T. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(1): 1031-1040.
- [19] 刘贤赵, 王国安, 王嘉竹, 王庆. 北京东灵山地区现代植物氮同位素组成及其对海拔梯度的响应. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2009, 39(10): 1347-1359.
- [20] 梁晓谦, 李建平, 张翼, 尉剑飞, 黄绪梅. 荒漠草原植被及土壤生态化学计量对降水的响应. *草业科学*, 2022, 39(5): 864-875.
- [21] 宋一凡, 卢亚静, 刘铁军, 刘慧文, 闫泽宇, 王慧琪. 荒漠草原不同雨量带土壤-植物-微生物 C、N、P 及其化学计量特征. *生态学报*, 2020, 40(12): 4011-4023.
- [22] 刘艳杰, 许宁, 牛海山. 内蒙古草原常见植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 对环境因子的响应. *生态学报*, 2016, 36(1): 235-243.
- [23] Craine J M, Elmore A J, Aida M P M, Bustamante M, Dawson T E, Hobbie E A, Kahmen A, Mack M C, McLauchlan K K, Michelsen A, Nardoto G B, Pardo L H, Peñuelas J, Reich P B, Schuur E A G, Stock W D, Templer P H, Virginia R A, Welker J M, Wright I J. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. *New Phytologist*, 2009, 183(4): 980-992.
- [24] 赵艳艳, 徐隆华, 姚步青, 马真, 张春辉, 王芳萍, 周华坤. 模拟增温对高寒草甸植物叶片碳氮及其同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 含量的影响. *西北植物学报*, 2016, 36(4): 777-783.
- [25] 邓建明, 姚步青, 周华坤, 赵新全, 魏晴, 陈哲, 王文颖. 水氮添加条件下高寒草甸主要植物种氮素吸收分配的同位素示踪研究. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 116-124.
- [26] Kitayama K, Iwamoto K. Patterns of natural ¹⁵N abundance in the leaf-to-soil continuum of tropical rain forests differing in N availability on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant and Soil*, 2001, 229(2): 203-212.
- [27] Chen W Q, Zhang Y J, Mai X H, Shen Y. Multiple mechanisms contributed to the reduced stability of Inner Mongolia grassland ecosystem following nitrogen enrichment. *Plant and Soil*, 2016, 409(1): 283-296.
- [28] Angerer J, Han G D, Fujisaki I, Havstad K. Climate change and ecosystems of Asia with emphasis on Inner Mongolia and Mongolia. *Rangelands*, 2008, 30(3): 46-51.
- [29] 盛文萍, 李玉娥, 高清竹, 万运帆, 于贵瑞. 内蒙古未来气候变化及其对温性草原分布的影响. *资源科学*, 2010, 32(6): 1111-1119.
- [30] 任海燕, 田磊, 朱毅, 徐柱文, 曾德慧, 方运霆, 韩国栋. 氮水添加改变内蒙古典型草原两种优势植物的氮吸收偏好. *科学通报*, 2022, 67(13): 1459-1468.
- [31] 张欣, 任海燕, 康静, 朱毅, 李冬慧, 韩国栋. 增温和施氮对内蒙古荒漠草原土壤理化性质的影响. *中国草地学报*, 2021, 43(6): 17-24.
- [32] 康静, 韩国栋, 任海燕, 朱毅, 张欣, 王悦骅. 不同降水条件下荒漠草原植物的养分含量及回收对增温和氮素添加的响应. *西北植物学报*, 2019, 39(9): 1651-1660.
- [33] 吴旭东, 季波, 何建龙, 任小玢, 俞鸿千, 王占军. 控制降水梯度对荒漠草原优势植物叶功能性状及土壤养分的影响. *生态学报*, 2021, 41(7): 2719-2727.
- [34] Wu Q, Ren H Y, Bisseling T, Chang S X, Wang Z, Li Y H, Pan Z L, Liu Y H, Cahill J F Jr, Cheng X, Zhao M L, Wang Z W, Li Z G, Han G D. Long-term warming and nitrogen addition have contrasting effects on ecosystem carbon exchange in a desert steppe. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(11): 7256-7265.
- [35] 陈琳, 曾冀, 李华, 刘士玲, 雷丽群, 刘世荣. 全球降水格局变化下土壤氮循环研究进展. *生态学报*, 2020, 40(20): 7543-7551.
- [36] Ren H Y, Xu Z W, Isbell F, Huang J H, Han X G, Wan S Q, Chen S P, Wang R Z, Zeng D H, Jiang Y, Fang Y T. Exacerbated nitrogen limitation ends transient stimulation of grassland productivity by increased precipitation. *Ecological Monographs*, 2017, 87(3): 457-469.
- [37] 刘贤赵, 张勇, 宿庆, 田艳林, 王庆, 全斌. 陆生植物氮同位素组成与气候环境变化研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(2): 216-226.
- [38] Liu X Z, Wang G A. Measurements of nitrogen isotope composition of plants and surface soils along the altitudinal transect of the eastern slope of Mount Gongga in southwest China. *Rapid Communications in Mass Spectrometry: RCM*, 2010, 24(20): 3063-3071.
- [39] Wang L X, D'Odorico P, Ries L, Macko S A. Patterns and implications of plant-soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in African savanna ecosystems. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 77-83.
- [40] Alvarez-Clare S, Mack M C. Influence of precipitation on soil and foliar nutrients across nine *Costa Rican* forests. *Biotropica*, 2011, 43(4): 433-441.
- [41] 吴田乡, 黄建辉. 放牧对内蒙古典型草原生态系统植物及土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 160-169.