

张晶,左小安,吕朋.土壤水分和养分对沙质草地优势植物叶片氮回收效率的影响[J].中国沙漠,2024,44(1):161-169.

土壤水分和养分对沙质草地优势植物 叶片氮回收效率的影响

张晶,左小安,吕朋

(中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃兰州730000)

摘要:气候变化和人类活动影响草地资源利用效率和内部养分循环。为了明晰中国半干旱草原区植物对环境变化的养分调控策略,以沙质草地4种优势植物[狗尾草(*Setaria viridis*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、白草(*Pennisetum centrasiticum*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)]为研究对象,依托增减水和氮添加交互模拟试验平台,分析了降水变化、氮添加及其耦合效应下土壤水分、土壤全氮、优势植物地上生物量、绿叶和枯叶氮含量以及氮回收效率(NRE)。结果表明:降水变化和氮添加及其耦合效应会引起物种结构和组成的变化,最终影响优势植物的生产力;干旱处理条件下,氮添加显著提高了狗尾草的绿叶氮含量从而降低NRE($P<0.05$);生长季前期(5—6月)增加降水100%(+60 d)处理下,氮添加显著提高了黄蒿的绿叶氮含量($P<0.05$);对于白草而言,生长季前期(5—6月)减少降水100%(-60 d)、CK和+60 d处理下,氮添加显著提高了绿叶氮含量($P<0.05$),CK和+60 d处理下,氮添加显著提高了枯叶氮含量($P<0.05$),+60 d处理下,氮添加显著降低了NRE($P<0.05$);对于糙隐子草而言,CK处理下,氮添加显著提高了绿叶氮含量($P<0.05$),+60 d处理下,氮添加显著提高了枯叶氮含量($P<0.05$)。结构方程模型(SEM)表明,降水量对绿叶氮含量有负向影响,氮添加对绿叶氮含量和枯叶氮含量均有正向影响,绿叶氮含量对NRE有正向影响,而枯叶氮含量对NRE有负向影响。在科尔沁沙地,相比较于土壤氮,土壤水分可能是调控植物叶片NRE更为重要的影响因子。

关键词:沙质草地;氮回收效率;降水变化;氮添加

文章编号:1000-694X(2024)01-161-09

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00094

中图分类号:N8

文献标志码:A

0 引言

氮素回收是植物将氮元素通过输导系统从衰老组织向活体贮存结构或新组织转移的生理过程,该过程有助于减缓植物在衰老过程中引起的氮损失,降低植物对环境氮的依赖从而提高对于环境的适应性,对草地生态系统养分循环具有重要意义^[1]。在资源相对贫瘠的生态系统中较长时间的氮驻留有利于植物在资源获取和生存的过程中具备更强的竞争性,而较短时间氮驻留的植物则具有较低的生态适应性^[2]。

全球气候变暖导致极端天气气候事件频繁发生,主要表现为中低纬度降水量不断增加、降水分布和格局发生了重大变化,近年来以降水间隔时间增长、单次降水量增大为特征的极端降水事件频率持

续增加^[3-4],降水变化可以在较短时间尺度上改变植物生理代谢反应从而影响氮素的可利用性^[5-6]。其主要原因一方面是水分能够影响植物气孔导度,影响光合作用的同时改变氮利用效率,另一方面是降水通过促进土壤微生物活性,刺激土壤氮矿化作用并间接改善土壤氮可利用性,从而提高植物叶片氮含量,降低养分回收能力^[7-8]。降水梯度变化对养分回收影响的研究表明,随着降水湿润端向干旱端变化,氮回收效率(NRE)逐渐升高^[9-10]。然而也有研究发现增加降水降低了土壤氮的有效性,其主要原因是增加降水提高了地上生产力、土壤有机质和微生物总量,导致氮固持能力增加,从而降低土壤中的可利用氮^[11-12]。因此植物叶片NRE对水分胁迫的响应在不同生态系统中可能表现出不一致性。

收稿日期:2023-05-30;改回日期:2023-07-03

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42001110,42071140)

作者简介:张晶(1988—),女,甘肃榆中人,博士,主要从事恢复生态学方面的研究。E-mail:zhangj@llas.ac.cn

通信作者:左小安(E-mail:zuoxa@lzb.ac.cn)

化石燃料燃烧和人类活动导致地球表面的氮沉降量在过去100多年间急剧增长^[13],并且在未来几十年内会持续增加,这将极大改变植物-土壤间的互馈关系以及养分循环特征^[14]。养分回收作为植物内部养分循环机制,常用来指示植物养分限制状况^[15]。全球456种陆地植物对氮添加响应整合分析表明氮添加导致土壤中可利用氮增加,缓解植物生长过程中氮限制,可以使植物绿叶期叶片平均氮含量提高28.5%,从而提高NRE^[16],然而也有研究表明氮添加能够有效提高枯叶的叶片氮含量,从而降低NRE^[17],由此说明外源养分供应对生态系统养分循环具有调节作用且NRE与土壤养分之间的关系存在不一致性^[18]。此外不同物种或者不同生活型的植物在叶片凋落阶段NRE差异明显^[19-20],这是因为植物叶片中未被回收的养分以凋落物的形式转移到土壤中继续分解和矿化,被植物再次利用,因此NRE也会通过调控不同生活型植物凋落物的氮含量来调节植被-土壤系统的养分循环^[21]。

内蒙古半干旱草原区对气候变化和人类活动的干扰十分敏感,水分和氮素是该区域影响植物生长最为重要的限制性环境影响因子^[22],在全球气候变化和人类活动加剧背景下,分析该区域草地优势植物成熟绿叶和枯叶氮含量变化特征及影响因素,对于预测中国半干旱草原区生态系统养分循环规律及对未来全球变化的响应与反馈具有重要的生态学意义^[23]。近50年来,位于内蒙古东部的科尔沁沙地在剧烈气候变化和人类活动的影响下,草地生态环境不断恶化且生产力锐减,成为沙漠化典型区域^[24]。目前有关该区域沙质草地植物叶片养分回收状况在水分和养分变化下如何响应的研究较少。水分和养分变化如何通过影响土壤水分和养分有效性,从而影响沙质草地优势植物成熟绿叶和枯叶氮含量,进而影响NRE?基于以上问题,本研究通过调查科尔沁沙地沙质草地土壤水分和土壤全氮及4种优势植物的生物量、成熟叶和枯叶的叶片氮含量及植物叶片NRE,解析降水变化和氮沉降下土壤水分和养分对植物叶片NRE的调控机制,为阐释中国半干旱区植物适应环境变化的养分利用策略提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

该研究依托中国科学院西北生态环境资源研

究院奈曼沙漠化研究站,研究区位于内蒙古自治区通辽市奈曼旗境内(42°55′—42°57′N, 120°40′—120°43′E),多年平均气温约为6.4℃,多年平均降水量约为360 mm,其中70%~80%集中在5—8月。优势植物为狗尾草(*Setaria viridis*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、白草(*Pennisetum centrasianicum*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)。土壤为砂质土壤(<http://www.resdc.cn>)。

1.2 试验设计

2017年8月,选取相对均匀、退化程度不高且长期围封的沙质草地,该样地中土壤全碳含量平均值为3.96 g·kg⁻¹,土壤全氮平均值为0.42 g·kg⁻¹。基于该地区生长季年总降水量、极端干旱和极端降水事件的长期观测数据^[25],设置4个降水处理:整个生长季(5—8月)增加或减少降水60%(±60%),生长季前期(5—6月)增加或减少降水100%(±60 d)。于2017年4月20日布设增减水装置,2017年10月20日拆除,该装置具有成本低及对气候变化影响甚微的特点,广泛应用于气候变化的研究^[26-27]。科尔沁沙地大规模的人类活动(农田施肥和畜牧业)加剧了氮输入,导致该地区氮负荷过高^[28],参考世界上其他国家(美国、欧洲)的氮沉降水平,添加20 g·m⁻²N是中国区域较高的氮沉降水平^[29]。因此分别在每年5月和7月各添加10 g·m⁻²N,总计20 g·m⁻²N。本试验拟采取双因素随机区组设计,选取24个8 m×8 m的大样方,再从中随机选取12个样方开展增减水试验,每个增减水样方的面积为2.5 m×2.5 m,10个处理,6个重复,总计60个样方。

1.3 生物量和植物样品的测定

2017年8月在处理样方内随机设定1 m×1 m的小样方进行样品采集。用齐地刈割的方法分物种获取地上生物量。在每个小区随机选择4种优势植物各5株,其中优势植物的生物量占地上总生物量的80%以上。样方内植物叶片的采集以个体为单位,在每株植物上分别采集10片绿叶混合均匀后为一份绿叶样本,采样结束后在植物底部绑上彩色标记物。9月中旬开始,每周对标记植物进行定期观测,在叶片变成棕色时进行枯叶采集。将所有收集的样品分别装入对应的纸质信封,在65℃的烘箱内烘干至恒重,得到地上生物量。对烘干的绿叶和枯

叶样品进行研磨,使用元素分析仪(Costech ECS 4010,意大利)测定每种植物叶片氮含量。

1.4 土壤样品水分和养分测定

在整个样方内,沿对角线用土钻获取 3 个 0~20 cm 的土样,获取的土样在现场混合后,取一部分装入土壤水分盒用来测定土壤水分,剩余土样风干后过筛(孔径 2 mm)去除杂质,采用元素分析仪(Costech ECS 4010, 意大利)测定土壤全氮,土壤水分采用烘干恒重法(105 °C,24 h)。

1.5 氮回收效率的计算

NRE 的计算如下式

$$NRE=[(N_{green}-N_{sen})/N_{green}]\times100\%$$

式中: N_{green} 和 N_{sen} 分别表示植物绿叶和枯叶的叶片氮含量。

1.6 统计分析

采用 SPSS 21.0 进行数据分析,所有数值均采用平均值±标准误表示。利用双因素方差分析比较降水变化和氮添加对沙质草地不同样方土壤全氮及优势植物生物量、绿叶氮含量、枯叶氮含量、NRE 的影响,多重比较采用最小显著性差异法(LSD),采用 Amos 17.0 软件构建结构方程模型(SEM)。

2 结果与分析

2.1 土壤全氮对降水变化、氮添加及其耦合效应的响应

2017 年,生长季前期(5—6 月)的总降水量为 90.64 mm,生长季后期(7—8 月)总降水量为 311.22 mm,-60% 处理下总降水量为 160.75 mm,+60% 处理下总降水量为 642.98 mm,-60 d 处理下

总降水量为 311.22 mm,+60 d 处理下总降水量为 492.50 mm(图 1)。

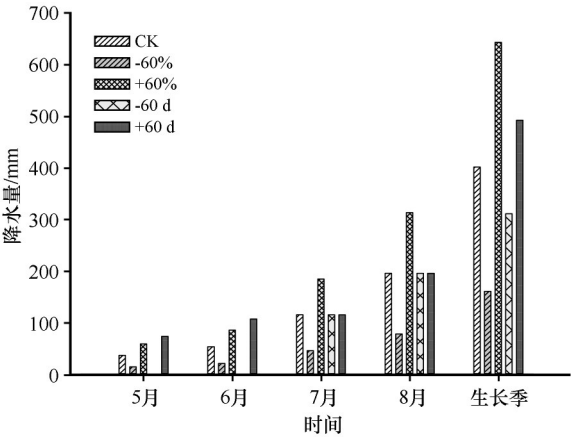


图1 2017 年生长季总降水量和月降水量处理
Fig.1 Total rainfall and monthly rainfall during the 2017 growing season

不加氮处理下,土壤全氮在+60% 处理下提高的 7%;-60 d 处理下,土壤全氮在氮添加处理下提高了 15.0%($P<0.05$,表 1)。

2.2 优势植物地上生物量对降水变化、氮添加及其耦合效应的响应

不加氮处理下,降水变化对狗尾草、黄蒿、白草的地上生物量无显著影响,+60 d 处理下糙隐子草的地上生物量显著降低了 72.3%($P<0.05$);氮添加处理下,降水变化对黄蒿和白草地上生物量无显著影响,-60%、+60%、-60 d 和 +60 d 处理下,狗尾草的地上生物量分别显著降低了 96.6%、95.2%、97.9% 和 77.4%($P<0.05$),+60 d 处理下糙隐子草的地上生物量显著提高了 376.7%($P<0.05$)。+60% 处理下,氮添加显著提高白草地上生物量的 377.7%($P<0.05$),+60 d 处理下,氮添加极显著提高了糙隐子草地上生物量的 602.5%($P<0.01$,表 2)。

表 1 降水变化、氮添加及其耦合效应对土壤全氮的影响

Table 1 Effects of precipitation variation, nitrogen addition and their coupling effects on soil nitrogen content										
指标	处理									
	CK		-60%		+60%		-60 d		+60 d	
	N0	+N	N0	+N	N0	+N	N0	+N	N0	+N
土壤全氮/(g·kg ⁻¹)	0.43±0.15 ^b	0.44±0.17 ^a	0.39±0.13 ^b	0.43±0.16 ^a	0.46±0.25 ^a	0.41±0.22 ^a	0.40±0.10 ^b	0.46±0.26 ^{a*}	0.43±0.19 ^{ab}	0.45±0.26 ^a

注:CK,自然降水量;±60%,整个生长季(5—8 月)增加或减少降水 60%;±60 d,生长季前期(5—6 月)增加或减少降水 100%;N0,不加氮;+N,氮添加。数据为平均值±标准误,n=3。不同小写字母表示同一氮素水平处理下不同降水处理间差异显著($P<0.05$),*和**表示同一降水处理下不加氮和氮添加处理间差异显著(分别为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$)。

表 2 降水变化、氮添加及其耦合效应对优势植物生物量的影响(单位:g·m⁻²)

Table 2 Effects of precipitation variation, nitrogen addition and their coupling effects on dominant plant biomass (unit:g·m⁻²)

物种	生活型	处理									
		CK		-60%		+60%		-60 d		+60 d	
		N0	+N	N0	+N	N0	+N	N0	+N	N0	+N
狗尾草	一年生	0.46±0.22 ^a	26.02±12.75 ^a	1.97±1.14 ^a	0.88±0.34 ^b	1.96±1.01 ^a	1.26±0.63 ^b	0.89±0.32 ^a	0.54±0.23 ^b	0.73±0.56 ^a	5.87±2.13 ^b
黄蒿	一年生	11.04±5.43 ^a	9.30±3.85 ^a	13.19±5.17 ^a	—	20.27±12.09 ^a	12.63±0.10 ^a	15.56±6.31 ^a	10.54±0.40 ^a	26.30±7.38 ^a	22.55±1.11 ^a
白草	多年生	2.88±1.62 ^a	56.68±32.57 ^a	4.02±2.08 ^a	23.11±12.26 ^a	2.69±1.32 ^a	12.85±1.82 ^{a*}	6.78±3.41 ^a	6.32±3.44 ^a	2.65±1.81 ^a	4.69±1.11 ^a
糙隐子草	多年生	11.70±3.01 ^a	4.73±1.55 ^b	6.44±2.86 ^{ab}	10.12±3.28 ^{ab}	7.68±3.28 ^{ab}	15.83±6.74 ^{ab}	4.96±1.58 ^{ab}	10.29±3.76 ^{ab}	3.21±0.87 ^b	22.55±6.10 ^{**}

注:CK,自然降水量;±60%,整个生长季(5—8月)增加或减少降水60%;±60 d,生长季前期(5—6月)增加或减少降水100%;N0,不加氮;+N,氮添加。数据为平均值±标准误,n=3。不同小写字母表示同一氮素水平处理下不同降水处理间差异显著(P<0.05),*和**表示同一降水处理下不加氮和氮添加处理间差异显著(分别为P<0.05和P<0.01)。

2.3 植物叶片绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE对降水变化、氮添加及其耦合效应的响应

氮添加对狗尾草的绿叶氮含量产生了极显著影响(P<0.01);降水变化对白草的绿叶氮含量产生了显著影响(P<0.05),氮添加对白草的绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE产生了极显著影响(P<0.01);氮添加对糙隐子草的绿叶氮含量和枯叶氮含量产生了极显著影响(P<0.01,表3)。

表 3 降水变化、氮添加及其耦合效应下优势植物叶片氮含量和NRE方差分析

Table 3 Analysis of nitrogen content and NRE variance of dominant plant leaves under precipitation variation, nitrogen addition and its coupling effect

物种	处理	绿叶氮含量	枯叶氮含量	NRE
狗尾草	水	0.802	0.813	0.595
	氮	15.166**	1.142	0.336
	水×氮	0.984	0.777	0.967
黄蒿	水	1.485	1.996	1.724
	氮	3.757	2.631	0.220
	水×氮	2.241	1.519	1.478
白草	水	4.129*	1.934	1.975
	氮	12.779**	20.705**	15.564**
	水×氮	1.431	0.727	0.822
糙隐子草	水	1.565	0.835	0.375
	氮	12.651**	9.516**	0.045
	水×氮	0.918	1.170	1.421

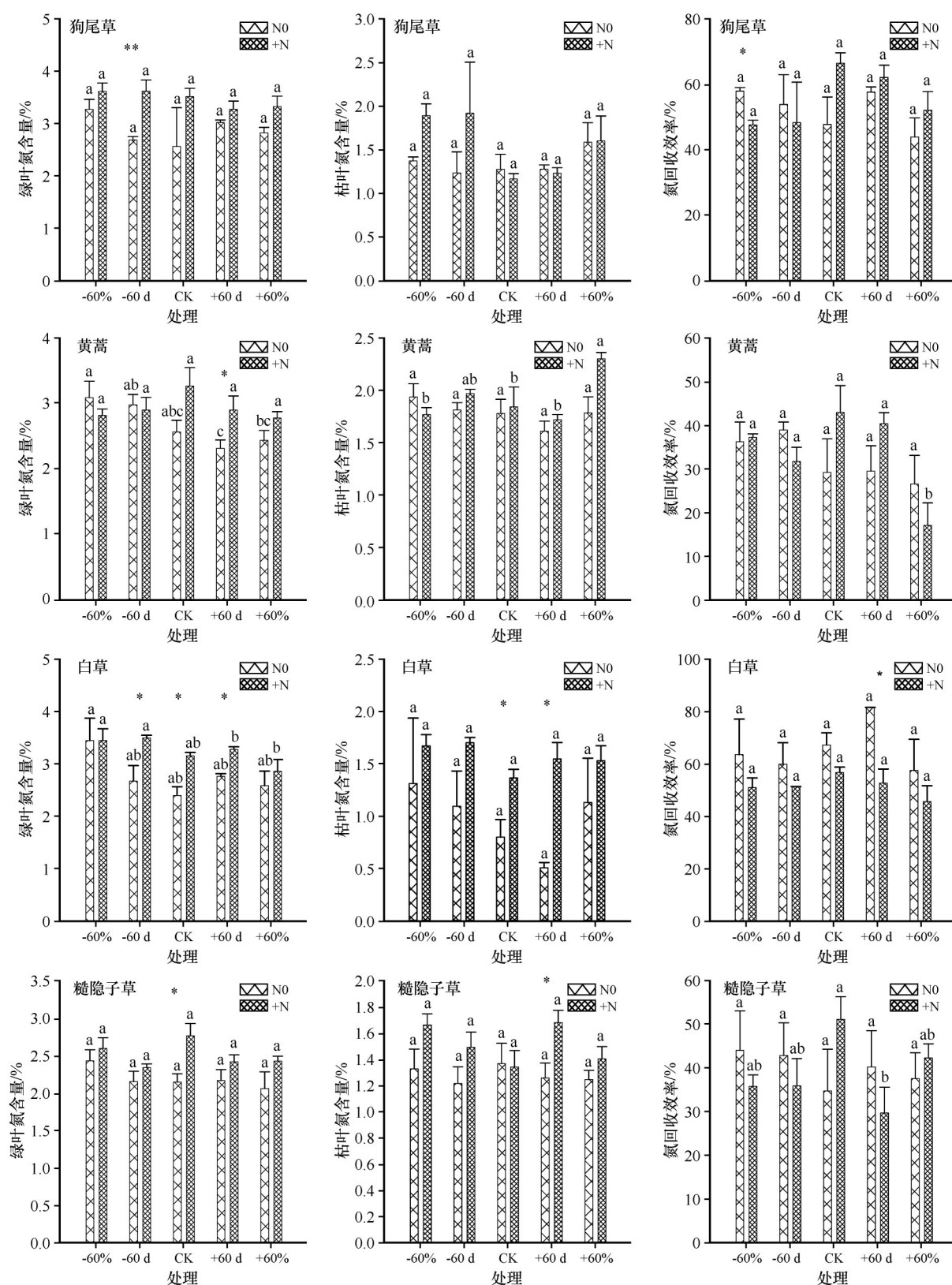
对于狗尾草而言,降水变化对绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE无显著影响,-60 d处理下,绿叶氮含量在氮添加下提高了34.5%(P<0.01),-60%处理

下,NRE在氮添加下降低了17.8%(P<0.05);对于黄蒿而言,不加氮处理下,降水变化对绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE无显著影响,氮添加处理下,枯叶氮含量在+60%处理下提高了24.8%(P<0.05),+60 d处理下,绿叶氮含量在氮添加下提高了25.2%(P<0.05);对白草而言,降水变化对绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE无显著影响,-60 d、CK和+60 d处理下,绿叶氮含量在氮添加下分别提高了30.8%、31.4%和18.5%(P<0.05),CK和+60 d处理下,枯叶氮含量在氮添加下分别提高了70.8%和205.2%(P<0.05),+60 d处理下,NRE在氮添加下降低了35.4%(P<0.05);对糙隐子草而言,不加氮处理下,降水变化对绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE无显著影响,氮添加处理下,降水变化对绿叶氮含量和枯叶氮含量无显著影响,而+60 d处理下的NRE降低了41.9%(P<0.05),CK处理下,绿叶氮含量在氮添加下提高了28.7%(P<0.05),+60 d处理下,枯叶氮含量在氮添加下提高了33.5%(P<0.05,图2)。

2.4 环境因子变化对NRE影响的贡献率

对土壤水分、土壤全氮、氮添加、降水量、绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE进行相关分析,结果表明土壤全氮与土壤水分极显著正相关(P<0.01);氮添加与土壤水分极显著正相关(P<0.01);降水量与土壤水分极显著正相关(P<0.01);绿叶氮含量与氮添加极显著正相关(P<0.01),与降水量极显著负相关(P<0.01);枯叶氮含量与氮添加和绿叶氮含量极显著正相关(P<0.01);NRE与绿叶氮含量极显著正相关(P<0.01),与枯叶氮含量极显著负相关(P<0.01,表4)。

通过对相关变量的分析和筛选,最终得到最优方差的结构方程模型(SEM,χ²=8.40,P=0.30;



注：不同小写字母表示同一氮素水平处理下不同降水处理间具有显著差异($P < 0.05$), *和**表示同一降水处理下不加氮和氮添加处理间具有显著和极显著差异(分别为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)

图2 降水变化、氮添加及其耦合效应下优势植物叶片氮含量和NRE的响应
Fig.2 Response of nitrogen content and NRE in leaves of dominant plants under precipitation variation, nitrogen addition and their coupling effects

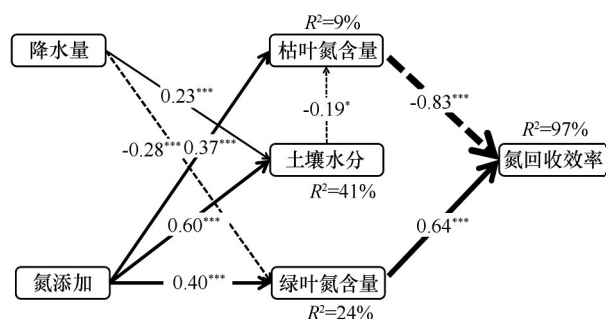
表4 优势植物叶片NRE与环境因子的相关性

Table 4 Correlation between NRE and environmental factors

指标	相关系数					
	土壤水分	土壤全氮	氮添加	降水量	绿叶氮含量	枯叶氮含量
土壤全氮	0.272**					
氮添加	0.595**	0.112				
降水量	0.221**	0.108	-0.023			
绿叶氮含量	0.141	0.062	0.404**	-0.285**		
枯叶氮含量	0.033	-0.036	0.258**	-0.123	0.317**	
NRE	0.073	0.083	0.041	-0.091	0.422**	-0.705**

注:**表示变量间具有极显著相关关系($P<0.01$)。

$RMSEA=0.04$; $GFI=0.98$),该SEM解释了沙质草地优势植物NRE97%的影响因子。SEM结果表明,降水量对土壤水分具有显著的正效应,路径系数为0.23($P<0.001$),对绿叶氮含量有显著的负效应,路径系数为0.28($P<0.001$);氮添加对枯叶氮含量、土壤水分和绿叶氮含量都有极显著的正效应,路径系数分别为0.37、0.60和0.40($P<0.001$);土壤水分对枯叶氮含量有极显著的负效应,路径系数为0.19($P<0.1$);枯叶氮含量对NRE有极显著的负效应,路径系数为0.83($P<0.001$),绿叶氮含量对NRE有极显著的正效应,路径系数为0.64($P<0.001$,图3)。



注:数字表示标准通径系数,其中实线表示正向影响,虚线表示负向影响,***表示 $P<0.001$,*表示 $P<0.1$

图3 NRE影响因子结构方程模型

Fig.3 NRE Impact Factor Structural Equation Model

3 讨论

3.1 降水变化、氮添加及其耦合效应对土壤全氮和优势植物生物量的影响

降水变化会影响土壤的物理、化学性质和微生物特性,从而影响土壤持水性和养分含量^[30-32]。本研究中,生长季减水60%显著降低了土壤水分,其主要原因可能是沙质土壤颗粒较大,土壤饱和导水

率高且蒸发量大,较低的持水力在长期干旱条件下土壤水分长效匮乏^[31],这表明土壤水分除了受到降水的影响,还受到温度、地形和水文条件等多因素的影响。研究表明,降水强度变化会对植物功能群多样性和生产力产生积极或消极的影响^[33]。本研究中降水变化对糙隐子草和狗尾草的生物量产生了波动式影响,而对黄蒿和白草的生物量无显著影响,其原因主要是不同的降水强度与不同氮添加组合引起了物种组成和结构的变化,当沙质草地的水分和养分状况发生改变时,竞争力强的物种会打破种间平衡,各个物种的优势地位发生变化引起了相应生物量的改变^[34-35]。

3.2 降水变化、氮添加及其耦合效应对优势植物NRE的影响

不同植物在绿叶期和枯叶期的NRE有显著差异,生活型也是影响NRE的主要因素^[36-37]。相较于多年生植物,一年生植物具有较强的光合生产能力和资源利用效率,更能适应相对干旱和贫瘠的环境^[38]。本研究中一年生狗尾草在干旱和氮添加的耦合效应下绿叶氮含量显著提高而NRE显著降低,说明狗尾草等一年生植物能够在干旱情况下利用有限的养分资源迅速完成生长和繁殖,从而提高对干旱环境的适应性^[39],一年生黄蒿增加降水和氮添加的耦合效应下绿叶氮含量显著提高,表明黄蒿等一年生植物在水分和养分状况理想的情况下,也可以快速吸收可溶性有机氮源从而提高绿叶氮含量^[40]。多年生的白草和糙隐子草,氮添加能够同时提高绿叶和枯叶的叶片氮含量,在生长季前期增水和氮添加耦合效应下白草的NRE显著降低,这与NRE随着水分和养分条件改善情况下显著降低的

研究结果一致^[41],其主要原因是多年生植物在枯叶期回收氮是克服氮限制的适应对策,在氮匮乏的环境中,多年生植物能够利用有效养分且不断延长养分在叶片内的停留周期,从而最大限度地保证叶片中氮再次被回收和利用^[35],然而在水分和养分条件改善时,多年生植物的生长繁殖会更加依赖土壤中的水分和养分,减缓对衰败叶片组织中氮的依赖性,从而降低NRE^[42]。因此,科尔沁沙地一年生植物和多年生植物氮回收策略的差异可能是该区域生态系统中不同生活型植物得以共存的重要解释机理,不同生活型植物的氮回收策略也是科尔沁沙质草地生态系统植物主要的养分驻留策略之一。

3.3 沙质草地优势植物NRE的调控及影响因素

研究区4种优势植物绿叶氮含量、枯叶氮含量和NRE影响因素的SEM表明,降水量对土壤水分具有正效应,对绿叶氮含量具有负效应,土壤水分对枯叶氮含量具有负效应,这与增加降水能够通过降低绿叶氮含量和枯叶氮含量从而影响NRE的研究相一致^[43]。氮添加量对土壤水分、绿叶和枯叶氮含量都具有正效应,这主要是因为氮添加提高了土壤矿化速率,导致土壤有机碳含量增加,相应植物的生存力和凋落物数量同时增加导致水分贮存力提高而蒸散率降低^[44],这与氮添加能显著提高土壤水分和叶片氮含量最终影响NRE的研究结果相一致^[45-46]。SEM表明绿叶氮含量对NRE具有负效应,而枯叶氮对NRE具有正效应,这表明除了绿叶氮含量之外,枯叶氮含量也是影响氮回收效率的决定性因素,尤其是多年生植物叶片在衰败过程中尽可能贮存更多氮,延长氮在植物体内的驻留时间,为第二年的返青做准备^[37]。然而土壤全氮在SEM中未被选入,表明在该区域,相较于土壤全氮,土壤水分在调控植物叶片NRE的过程中所发挥的作用可能更为重要。

4 结论

降水变化、氮添加及其耦合效应对科尔沁沙质草地土壤水分、土壤全氮、优势植物的生物量、绿叶氮含量、枯叶氮含量及NRE产生了不同影响。具体表现为:降水变化、氮添加及其耦合效应引起了物种结构和组成的变化从而引起优势植物生物量的变化;干旱处理下氮添加显著提高了狗尾草的绿叶氮含量从而降低NRE,+60 d处理下氮添加显著提

高了黄蒿的绿叶氮含量,氮添加提高了白草和糙隐子草的绿叶和枯叶氮含量,增加降水和氮添加耦合效应下白草的NRE显著降低;SEM结构方程模型表明降水量可以通过影响绿叶氮含量最终影响NRE,氮添加可以通过影响绿叶和枯叶氮含量从而影响NRE,降水量和氮添加都可以通过影响土壤水分从而影响枯叶氮含量,最终影响NRE。在科尔沁沙地,土壤水分可能是调控植物叶片NRE的主要影响因素。

参考文献:

- [1] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns [J]. *Advances in Ecological Research*, 1999, 30: 1-67.
- [2] Distel R A, Moretto A S, Didone N G. Nutrient resorption from senescing leaves in two *Stipa* species native to central Argentina [J]. *Austral Ecology*, 2003, 28(2): 210-215.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. IPCC WGI 5th Assessment Report, 2013.
- [4] Sala O E, Gherardi L A, Peters D P C. Enhanced precipitation variability effects on water losses and ecosystem functioning: differential response of arid and mesic regions [J]. *Climatic Change*, 2015, 131(2): 213-227.
- [5] Dijkstra F A, Carrillo Y, Aspinwall M J, et al. Water, nitrogen and phosphorus use efficiencies of four tree species in response to variable water and nutrient supply [J]. *Plant and Soil*, 2016, 406(1): 187-199.
- [6] Wang S, Wang X B, Han X G, et al. Higher precipitation strengthens the microbial interactions in semi-arid grassland soils [J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2018, 27(5): 570-580.
- [7] Zhan X Y, Yu G R, He N P. Effects of plant functional types, climate and soil nitrogen on leaf nitrogen along the north-south transect of eastern China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(2): 125-131.
- [8] Lu X T, Reed S, Yu Q, et al. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semi-arid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2775-2784.
- [9] Meier I C, Leuschner C. Nutrient dynamics along a precipitation gradient in European beech forests [J]. *Biogeochemistry*, 2014, 120(1/3): 51-69.
- [10] 赵广帅, 熊定鹏, 石培礼, 等. 羌塘高原降水梯度带紫花针茅叶片氮回收特征及影响因素 [J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3419-3428.
- [11] 崔晓庆. 降雨、温度和氮沉降增加对新疆温带荒漠生态系统氮素去向和植物化学计量特征的影响 [D]. 北京: 中国农业大

- 学, 2018.
- [12] Mackie K A, Zeiter M, Bloor J M G, et al. Plant functional groups mediate drought resistance and recovery in a multisite grassland experiment [J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107, 2: 937–949.
 - [13] Galloway J N, Dentener F J, Capon D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future [J]. *Science in China Series C-Life Sciences*, 2005, 48: 669–677.
 - [14] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peuelas J. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: a review and perspectives [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(1): 33–47.
 - [15] 李元恒, 韩国栋, 王珍, 等. 增温和氮素添加降低荒漠草原多年生植物氮素回收效率 [J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 5948–5956.
 - [16] Yuan Z Y, Chen H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption [J]. *Ecology*, 2015, 96(2): 373–380.
 - [17] Lv X T, Han X G. Nutrient resorption responses to water and nitrogen amendment in semi-arid grassland of Inner Mongolia, China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 481–491.
 - [18] Xia J Y, Wan S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition [J]. *New Phytologist*, 2008, 179(2): 428–439.
 - [19] Ratnam J, Sankaran M, Hanan N P, et al. Nutrient resorption patterns of plant functional groups in a tropical Savanna: variation and functional significance [J]. *Oecologia*, 2008, 157(1): 141–151.
 - [20] Yuan Z Y, Li L H, Han X G, et al. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(1): 191–202.
 - [21] Liu P, Huang J H, Han X G, et al. Differential responses of litter decomposition to increased soil nutrients and water between two contrasting grassland plant species of Inner Mongolia, China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34(2/3): 266–275.
 - [22] Lu X T, Hu Y Y, Wolf A A, et al. Species richness mediates within species nutrient resorption: implications for the biodiversity-productivity relationship [J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(5): 2346–2352.
 - [23] An Y, Wan S Q, Zhou X H, et al. Plant nitrogen concentration, use efficiency, and contents in a tallgrass prairie ecosystem under experimental warming [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1733–1744.
 - [24] 王涛, 吴薇, 赵哈林, 等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5): 519–528.
 - [25] Huang J, Xue Y, Sun S, et al. Spatial and temporal variability of drought during 1960–2012 in Inner Mongolia, north China [J]. *Quaternary International*, 2015, 355: 134–144.
 - [26] 刘新平, 赵学勇, 何玉惠, 等. 一种野外增减雨试验装置: CN202535823U [P]. 2012–11–21.
 - [27] Zhang J, Zuo X A, Lv P. Effects of Grazing, Extreme drought, extreme rainfall and nitrogen addition on vegetation characteristics and productivity of semiarid grassland [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(2): 960.
 - [28] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1838–1844.
 - [29] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands [J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 712–715.
 - [30] 陈琳, 曾冀, 李华, 等. 全球降水格局变化下土壤氮循环研究进展 [J]. *生态学报*, 2020, 40(20): 7543–7551.
 - [31] Luo Y Q, Zhao X Y, Zuo X A, et al. Plant responses to warming and increased precipitation in three categories of dune stabilization in northeastern China [J]. *Ecological Research*, 2017, 32(6): 887–898.
 - [32] 郭海云, 王根绪, 孙守琴. 氮添加对亚高山针叶林土壤结构及水分入渗性能的影响 [J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 238–245.
 - [33] 杨静, 孙宗玖, 巴德木其其格, 等. 封育对草地植被功能群多样性及土壤养分特征的影响 [J]. *中国草地学报*, 2018, 40(4): 102–110.
 - [34] 刘欣蕊, 崔媛媛, 王忠武, 等. 放牧和模拟降水对短花针茅荒漠草原植物功能群多样性的影响 [J]. *草地学报*, 2023, 31(3): 868–875.
 - [35] Isbell F, Reich P B, Tilman D, et al. Nutrient enrichment, biodiversity loss, and consequent declines in eco-system productivity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(29): 11911–11916.
 - [36] Lü X T, Hou, S L, Reed, S, et al. Nitrogen enrichment reduces nitrogen and phosphorus resorption through changes to species resorption and plant community composition [J]. *Ecosystems*, 2021, 24: 602–612.
 - [37] 李玉霖, 崔夺, 陈静, 等. 科尔沁沙质草地优势多年生植物氮素回收效率的分异特征 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 688–695.
 - [38] 张晶, 左小安, 杨阳, 等. 科尔沁沙地草地植物群落功能性状对封育和放牧的响应 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 261–268.
 - [39] Ripley B, Martin T. Experimental investigation of fire ecology in the C_3 and C_4 subspecies of *Alloteropsis semialata* [J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(5): 1196–1203.
 - [40] 侯宝林. 古尔班通古特沙漠不同生活型草本植物对氮素吸收偏好性研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2022.
 - [41] 安卓, 牛得草, 文海燕, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及 C:N:P 化学计量特征的影响 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 801–807.
 - [42] Lv X, Reed S, Yu Q, et al. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semiarid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2775–2784.
 - [43] Lu X T, Han X G. Nutrient resorption responses to water and nitrogen amendment in semi-arid grassland of Inner Mongolia China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 481–491.

- [44] 胡洋,丛孟菲,陈末,等.氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤无机磷形态的影响[J].水土保持学报,2022,36(3):252-258.
- [45] 康静,韩国栋,任海燕,等.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[J].西北植物学报,2019,39(9):1651-1660.
- [46] Kobe R K, Lepczyk C A, Iyer M. Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set[J]. Ecology, 2005, 86(10): 2780-2792.

Effects of nutrient and water content on leaf nitrogen recovery efficiency of dominant plants in sandy grasslands

Zhang Jing, Zuo Xiaolan, Lv Peng

(Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Climate change and human activities will affect grassland resource use efficiency and internal nutrient cycling. In order to clarify the nutrient regulation strategies of plants in the semi-arid grassland region of China, this study took four dominant plants (*Setaria viridis*, *Artemisia scoparia*, *Pennisetum centrasaticum*, *Cleistogenes squarrosa*) in sandy grassland as the research objects, and based on the interactive simulation test platform of increase or decrease precipitation and nitrogen addition, the soil moisture content, soil total nitrogen content, dominant plants' aboveground biomass, leaf nitrogen concentration in mature leaves, leaf nitrogen concentration in senescent dead leaves, and nitrogen resorption efficiency (NRE) were analyzed. The results showed that nitrogen addition promoted biological activity and increased soil water content ($P < 0.05$) under natural precipitation (CK) or drought treatment conditions. Precipitation changes and nitrogen addition and their coupling effects will cause changes in species structure and composition, which ultimately affect the productivity of dominant plants. Under drought treatment, nitrogen addition significantly increased the nitrogen content in mature leaves of *Setaria viridis* and reduced the NRE ($P < 0.05$). Under the treatment of increasing precipitation by 100% (+60 d) in the early growing season (May to June), nitrogen addition significantly increased the mature leaf nitrogen content of *Artemisia scoparia* ($P < 0.05$). For the *Pennisetum centrasaticum*, the nitrogen addition significantly increased the nitrogen content in mature leaves under decreasing precipitation by 100% (-60 d) in the early growing season (May to June) ($P < 0.05$), and the nitrogen addition significantly increased the nitrogen content of senescent dead leaves ($P < 0.05$) under CK and +60 d treatment, and the nitrogen addition significantly reduced the NRE under +60 d treatment ($P < 0.05$). For *Cleistogenes squarrosa*, nitrogen addition significantly increased the nitrogen content in mature leaves under CK treatment ($P < 0.05$), and nitrogen addition significantly increased the nitrogen content of senescent dead leaves under +60 d treatment ($P < 0.05$). The structural equation model (SEM) showed that precipitation had a positive effect on soil moisture and a negative effect on nitrogen content in mature leaves, nitrogen addition had a positive effect on the nitrogen content in mature leaves, soil moisture and the nitrogen concentration in senescent dead leaves, and the nitrogen content in mature leaves had a positive effect on NRE, and the nitrogen content of senescent dead leaves had a negative effect on NRE. In the Korqin Sandy Land, soil moisture may be a more important influencing factor in regulating the NRE of plant leaves than soil nitrogen.

Key words: sandy grassland; nitrogen resorption efficiency; precipitation changes; nitrogen addition