网络出版时间:2025-10-31 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.04.017

增温施氮对高寒湿草甸土壤氮矿化的影响

李淑卓,马维伟,李广,杜佳团,常佳晨,安娜,赵维军,赵雪梅
(甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070)

[摘 要] 【目的】探究气候变暖和氮沉降对高寒湿草甸土壤氮矿化的影响,为高寒湿草甸氮素变化的研究提供理论支撑。【方法】以青藏高原东缘尕海高寒湿草甸为研究区,于2021年5月—2024年6月,以自然生长草甸为对照(CK),设置增温(W)、施氮(N1(20 kg/(hm^2·a) N)、N2(30 kg/(hm^2·a) N))、增温施氮(WN1(W+20 kg/(hm^2·a) N)、WN2(W+30 kg/(hm^2·a) N))5个处理,于2024年5月在样地中进行30 d的野外原位矿化培养试验,测定了不同处理的土壤理化性状、微生物生物量碳氮含量、酶活性及氮矿化速率,并对以上指标进行了相关性分析和冗余分析。【结果】与CK相比,增温施氮对土壤全氮(TN)、有机碳(SOC)、土壤含水量(SM)、土壤温度(ST)、pH有明显影响。与CK相比,增温条件下,随着施氮量的增加,高寒湿草甸土壤中的微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量显著增加。不同处理对土壤硝酸还原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NIR)、蔗糖酶(SUC)和脲酶(UR)活性有明显影响。与CK相比,WN1、N1、N2处理NR和NIR活性显著增加;W处理SUC活性显著降低,UR活性显著增加,其他处理SUC和UR活性无显著变化。与CK相比,W、WN1处理土壤净氨化速率、净硝化速率、净氮矿化速率均显著提高,WN2、N2处理以上3个指标均明显降低。增温、施氮及其交互作用均极显著影响了土壤氮矿化速率。相关性分析结果显示,增温施氮条件下,土壤氮矿化过程与pH呈显著正相关,与TN、SOC、SM呈显著负相关。冗余分析结果表明,TN、SOC和SM对土壤净氨化速率、净硝化速率和净氮矿化速率在前两轴的累计贡献率为74.41%,其中TN和SOC解释率分别为64.4%,18.4%。【结论】连续增温施氮改变了高寒湿草甸的土壤理化性质、微生物生物量碳氮含量、酶活性以及土壤氮矿化过程,其中TN和SOC是土壤氮矿化的主要影响因素。

[关键词] 高寒湿草甸;增温;施氮;土壤氮矿化;土壤酶
[中图分类号] S812.2 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)04-0152-08

Effects of warming and nitrogen application on nitrogen mineralization in meadow soils

LI Shuzhuo, MA Weiwei, LI Guang, DU Jianan, CHANG Jiachen, AN Na, ZHAO Weijun, ZHAO Xuemei
(*College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aimed to investigate the effects of climate warming and nitrogen deposition on soil nitrogen mineralization in alpine wet meadows, to provide theoretical support for the study of nitrogen changes in alpine wet meadows. 【Method】 From May 2021 to June 2024, five treatments of temperature increase (W), nitrogen application (N1(20 kg/(hm^2·a)N), N2 (30 kg/(hm^2·a)N)), nitrogen application with temperature increase (WN1(W+20 kg/(hm^2·a)N), WN2 (W+30 kg/(hm^2·a)N)) were set, with the naturally grown grassland as control (CK). Field in situ mineralization incubation test for 30 days was conducted in

[收稿日期] 2024-12-24 [修回日期] 2025-03-03
[基金项目] 国家自然科学基金项目(31860143);2024年度中央引导地方科技发展资金项目(24ZYQA023);甘肃省教育厅产业扶持计划项目(2021CYZC-15)
[作者简介] 李淑卓(1999—),女,甘肃正宁人,在读硕士,主要从事湿地氮循环过程研究。E-mail:15790871465@163.com
[通信作者] 马维伟(1980—),男,甘肃靖远人,教授,博士,博士生导师,主要从事湿地碳氮循环过程研究。E-mail:mww-007@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

May 2024 to determine soil physicochemical properties, microbial biomass carbon and nitrogen content, enzyme activity and nitrogen mineralization rate under different treatments, and correlation and redundancy analyses were performed on the above indicators.【Result】Compared with CK, Nitrogen application with temperature increase had significant effects on soil total nitrogen（TN）, soil organic carbon（SOC）, soil moisture content（SM）, soil temperature（ST）, and pH. Compared with CK, microbial biomass carbon（MBC）and microbial biomass nitrogen（MBN）contents in the soil of wet meadow increased significantly with the increase of nitrogen application under temperature increase. Different treatments had significant effects on the activity of soil nitrate reductase（NR）, nitrite reductase（NIR）, sucrase（SUC）urease（UR）. Compared with CK, NR and NIR activities were significantly increased in WN1, N1 and N2 treatments; SUC activity was significantly decreased and UR activity was significantly increased in W treatment, while SUC and UR activities did not change significantly in other treatments. Compared with CK, soil net ammonification rate, net nitrification rate and net nitrogen mineralization rate were significantly increased in W and WN1 treatments, and were significantly decreased in WN2 and N2 treatments. Temperature increase, nitrogen application and their interactions all significantly affected the soil N mineralization rate. The results of correlation analysis showed that the soil nitrogen mineralization process was significantly positively correlated with pH and significantly negatively correlated with TN, SOC, and SM under the condition of increasing temperature and nitrogen application. The results of redundancy analysis showed that the cumulative contribution of TN, SOC and SM to the soil net ammonification rate, net nitrification rate and net nitrogen mineralization rate in the first two axes was 74.41%, and the explanation rates of TN and SOC was 64.4%, 18.4%, respectively.【Conclusion】Successive temperature increase and nitrogen application altered soil physicochemical properties, microbial biomass carbon and nitrogen content, enzyme activities, and soil nitrogen mineralization processes in high-cold wet meadows, with TN and SOC being the main influencing factors on soil nitrogen mineralization.

Key words: wet meadow; warming; nitrogen application; soil nitrogen mineralization; soil enzymes

自工业化以来，随着人类大量使用矿物燃料以及土地利用方式的改变，全球气候变暖和氮沉降显著增加。在高纬度和高海拔地区，土壤矿物分解和氮周转率发生了显著变化[1]。气候变暖和大气氮沉降通过改变土壤温度、pH等环境因子，影响了土壤微生物群落结构与活性，改变了土壤生态系统的养分循环和能量流动[2]，从而进一步影响了土壤氮矿化过程。因此，研究气候变暖及氮沉降对氮素转化的影响有重要意义。

土壤氮矿化是土壤氮素循环中的重要过程之一，直接影响生态系统中植被生产力和土壤氮素的可利用效率[3]。而土壤氮矿化过程不免受到土壤环境变化的调节。例如，ABER等[4]的森林土壤野外氮沉降试验表明，外源氮能在短时间内与土壤有机物结合，促进土壤有机物的分解及养分释放，从而显著提升土壤净氮矿化速率。研究表明，在连续3年高氮添加的情况下，土壤真菌群落的稳定性受到了影响[5]，最终抑制了土壤氮素转化过程。同时，长期低氮添加对土壤呼吸及氮矿化过程有显著影响，而适量的氮添加则能解除高寒生态系统土壤氮素限制，促进植被根系发育和微生物活性，进而促进土壤氮的矿化[6]。因此，氮沉降对植被及土壤的综合影响取决于氮素输入多寡、持续时间长短以及不同生态系统之间的差异。野外试验[7]和室内模拟培养试验[8]表明，增温同样对土壤氮矿化过程具有重要影响，增温显著促进高寒地区湿草甸土壤硝化速率及氮矿化速率。然而前人在中国东北地区、青藏高寒湿草甸土壤的研究表明，增温对土壤氮矿化速率无显著影响[9-10]。但也有学者认为，气候变暖增强了青藏高原湿草甸土壤固碳能力，致使土壤养分含量发生变化，从而影响了氮素转化。

综上可知，国内外很多学者已在增温和氮沉降两个方面探讨了不同生态系统氮循环的特征和机理，但对于气候变暖及氮沉降耦合对高寒湿草甸土壤氮矿化的影响讨论较少，尤其是增温和施氮的交互作用及其作用机理尚不明确。高寒湿草甸是青藏高原的主要植被类型，占其面积的60%以上[11]。因此，本研究选取青藏高原东缘的尕海高寒湿草甸，分析连续增温和施氮对土壤理化性质、微生物生物量碳氮含量、酶活性以及土壤氮矿化速率的影

中国知网　https://www.cnki.net

响,旨在探明在长期气候变暖和氮沉降增加的背景下,高寒湿草甸地区植被生长初期土壤氮矿化的主要特点及其影响因素,为高寒湿草甸氮素变化的研究提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

尕海高寒湿草甸位于甘肃省甘南藏族自治州(33°58′12″－34°32′16″ N,102°05′00″－102°47′39″ E)国家级自然保护区内,海拔3 430～4 300 m,保护区内湿地面积57 846 hm^2,其中湿草甸51 160 hm^2,且主要分布在河谷底、湖畔、积水的滩地和洼地。该地区年均气温1.2 ℃,年平均日较差13.7 ℃,气温以7月份最高,平均为10.5 ℃,1月份最低,平均为－9.2 ℃;年均降水量781.8 mm,降雨通常集中在7－9月,年蒸发量1 150.5 mm[11];主要植物种类有蕨麻(*Potentilla anserina* L.)、青藏苔草(*Carex moorcroftii Falc. ex Boott*)、草玉梅(*Anemone rivularis Buch. -Ham*)、唐松草(*Thalictrum aquilegiifoliumvar. Sibiricum Linnaeus*)、线叶蒿(*Artemisia subulata Nakai*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum* L.)、散穗早熟禾(*Poa subfastigiata Trin.*)等[2]。

1.2 试验设计与土壤样品采集

增温施氮模拟试验于2021年5月－2024年6月进行,由于每年7－9月为该区雨季,氮沉降相对较大,故在5,7,9月中旬进行氮添加处理。在研究区内,随机选取植被生长均匀、群落盖度在85.0%以上的区域,采用野外控制试验的方法,以自然生长草甸为对照(CK),布设增温(W)、施氮(N1、N2)、增温施氮(WN1、WN2)5个处理,每个处理3次重复,各小区面积均为2.2 m^2,共计18个试验小区。其中N1、N2、WN1、WN2处理中的施氮量根据青藏高原氮沉降背景值(N:10 kg/(hm^2·a))的2～3倍设计[12],即N1、WN1处理施氮量为20 kg/(hm^2·a),N2、WN2处理施氮量为30 kg/(hm^2·a)。选择植物易吸收的NH_4NO_3作为氮肥,于每年5,7,9月中旬分别将4.14 g NH_4NO_3(N1)、6.12 g NH_4NO_3(N2)溶解于2 L水中,然后采用喷雾器均匀地喷洒到样方中,对照样方采用2 L蒸馏水进行喷洒处理。增温采用被动增温的开顶箱法(Open-top chamber,OTC)进行[2]。

于2024年5月,在样地中进行30 d野外树脂芯原位氮矿化的培养,具体方法为:每个小区内随机选取3个点,去除地表凋落物,随机打入6个PVC管(长25 cm、直径5 cm,埋入土壤深20 cm),将其中的3个PVC管取出,用装有冰袋的保温箱将土样带回实验室,用来测定硝态氮和铵态氮含量的初始值。将另3个PVC管取出,用小刀去除底部约2 cm厚的土样,然后在PVC管底部先放入1张滤纸,再放入装有3 g阴离子的交换树脂袋,继续在下面放一张滤纸,再用泡沫板封住底端,最后插入土壤原位中,然后封住PVC管的顶端,进行野外树脂芯原位培养。培养结束后从每个小区中取出3个PVC管,取出土样并带回实验室,将土样磨碎过孔径2 mm筛,去除土样内部根系及石砾,进行土壤理化性质的测定。

1.3 指标测定与方法

土壤全氮(total nitrogen,TN)含量用半微量凯氏法[13]测定,土壤有机碳(soil organic carbon,SOC)含量用重铬酸钾氧化法测定,土壤铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)含量用MgO-代氏合金蒸馏法[13]测定,土壤微生物生物量氮(soil microbial biomass N,MBN)、微生物生物量碳(soil microbial biomass C,MBC)含量采用氯仿熏蒸-K_2SO_4浸提法[13]测定。硝酸还原酶(nitrate reductase,NR)与亚硝酸还原酶(nitrite reductase,NIR)活性测定采用苯磺酸-醋酸-α萘胺比色法[14]测定,蔗糖酶(sucrase,SUC)活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法[15]测定,脲酶(urease,UR)活性采用苯酚-次氯酸钠比色法[15]测定。土壤pH值采用哈纳pH计(水土比为2.5:1)进行测定,土壤含水量(soil moisture,SM)采用烘干法测定,土壤温度(soil temperature,ST)由EM-50数据收集系统收集。土壤净氨化速率(R_a)、净硝化速率(R_n)和净氮矿化速率(R_N)的计算公式[9]为:

$$R_a=\frac{\Delta c\left(NH_4^+\text{-}N\right)_i}{\Delta t_i};\tag{1}$$

$$R_n=\frac{\Delta c\left(NO_3^-\text{-}N\right)_i}{\Delta t_i};\tag{2}$$

$$R_N=R_a+R_n。\tag{3}$$

式中:$\Delta c(NH_4^+\text{-}N)_i$表示铵态氮含量的变化量,mg/kg;$\Delta c(NO_3^-\text{-}N)_i$表示硝态氮含量的变化量,mg/kg;$\Delta t_i$表示培养时间,d。

1.4 数据分析

采用SPSS 18.0软件对数据进行单因素(One-way ANOVA)方差分析,采用Duncan's多重比较

中国知网 https://www.cnki.net

法进行多重比较。用 Canoco 5.0 软件的冗余分析法（redundancy analysis，RDA）对土壤氮矿化速率与土壤理化指标的相关性进行分析，从中筛选出主要影响因子，以获得不同指标对土壤氮矿化的解释率。使用 Origin 2022 绘图。

2　结果与分析

2.1　增温施氮对高寒湿草甸土壤理化性质的影响

增温施氮对高寒湿草甸土壤理化性质的影响如表 1 所示。表 1 显示，增温施氮对土壤 SOC、TN、SM、ST、pH 有明显影响。N1、CK、W、N2 处理间的土壤有机碳（SOC）含量存在显著差异（$P<0.05$），其中 N1 处理 SOC 含量最高，W 处理较低。WN2、CK 处理的土壤全氮（TN）含量较高，N1、N2 处理的 TN 含量显著低于 CK，但显著高于 W 处理。N1 处理的土壤含水量（SM）最高，W 处理的 SM 最低，且与其他处理存在显著差异。与 CK 相比，N1 处理降低了土壤温度（ST），增温施氮处理均显著提高了土壤温度。与 CK 相比，N1 和 WN2 处理显著降低了土壤 pH。

表 1　增温施氮对高寒湿草甸土壤理化性质的影响

Table 1　Effects of temperature increase and nitrogen application on the physicochemical properties of wet meadow soils

处理 Treatment	土壤有机碳（SOC）/（g·kg^{-1}） Soil organic carbon	土壤全氮（TN）/（g·kg^{-1}） Soil total nitrogen	土壤含水量（SM）/% Soil moisture	土壤温度（ST）/℃ Soil temperature	pH
CK	32.78±2.36 b	2.80±0.04 b	0.43±0.01 c	12.36±0.32 d	7.89±0.00 c
N1	39.00±0.39 a	2.69±0.20 c	0.54±0.00 a	12.27±0.38 d	7.84±0.00 d
N2	33.97±2.18 b	2.37±0.06 cd	0.44±0.01 c	12.43±0.31 d	7.93±0.00 b
W	27.04±1.07 c	1.64±0.00 e	0.36±0.00 d	13.60±0.53 c	7.97±0.01 a
WN1	28.86±1.98 ab	2.05±0.16 d	0.49±0.01 b	14.18±0.62 b	7.92±0.01 b
WN2	31.43±0.53 ab	3.27±0.03 a	0.50±0.00 b	15.01±0.59 a	7.82±0.01 e

注：同列数据后标不同小写字母表示不同处理之间差异显著（$P<0.05$）。下表同。

Note：Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments（$P<0.05$）. The same below.

2.2　增温施氮对高寒湿草甸土壤微生物生物量碳氮含量的影响

增温施氮对高寒湿草甸土壤微生物生物量碳氮含量的影响如表 2 所示。由表 2 可知，增温施氮对高寒湿草甸土壤 MBC、MBN、MBC/MBN 有显著影响。相较于 CK，增温条件下，随着施氮量的增加，MBC 含量增加，而施氮处理 MBC 含量无明显变化。与 CK 相比，增温、施氮和增温施氮处理的 MBN 含量均小于 CK，土壤 MBC/MBN 明显增加。

表 2　增温施氮对高寒湿草甸土壤微生物生物量碳氮含量的影响

Table 2　Effects of warming nitrogen application on soil microbial biomass carbon and nitrogen content in apline meadow

处理 Treatment	土壤微生物生物量碳（MBC）/（mg·kg^{-1}） Soil microbial biomass C	土壤微生物生物量氮（MBN）/（mg·kg^{-1}） Soil microbial biomass N	MBC/MBN	处理 Treatment	土壤微生物生物量碳（MBC）/（mg·kg^{-1}） Soil microbial biomass C	土壤微生物生物量氮（MBN）/（mg·kg^{-1}） Soil microbial biomass N	MBC/MBN
CK	202.47±9.41 b	57.83±4.99 a	3.79±0.25 c	W	306.54±68.86 ab	13.65±0.87 d	26.66±5.31 b
N1	203.73±48.22 b	31.56±6.46 c	13.80±5.52 bc	WN1	338.26±45.35 ab	6.88±0.92 d	73.53±11.08 a
N2	212.70±43.16 b	26.44±3.37 c	8.64±0.88 bc	WN2	387.98±51.30 a	45.29±2.00 b	20.47±2.66 bc

2.3　增温施氮对高寒湿草甸土壤酶活性的影响

增温施氮对高寒湿草甸土壤酶活性的影响如表 3 所示。由表 3 可以看出，不同处理对 NR、NIR、SUC、UR 活性有明显影响。与 CK 相比，WN1、N1、N2 处理 NR 活性分别显著提升了 323.5%，223.5% 和 76.4%，其他处理无显著变化；N1、N2、WN1、WN2 处理 NIR 活性显著增加 31.6% ～75.1%；W 处理 SUC 活性显著降低了 6.2%（$P<0.05$），其他处理无显著变化；W 处理 UR 活性显著增加了 44.2%，其余处理无显著变化。

中国知网　https://www.cnki.net

表3 增温施氮对高寒湿草甸土壤酶活性的影响

Table 3 Effects of warm nitrogen application on soil enzyme activity in apline meadow mg/(g·d)

处理 Treatment	硝酸还原酶(NR) Nitrate reductase	亚硝酸还原酶(NIR) Nitrate reductase	蔗糖酶(SUC) Sucrase	脲酶(UR) Urease
CK	0.001 7±0.000 1 d	62.65±1.80 e	54.83±0.55 a	1.26±0.10 bc
N1	0.005 5±0.000 1 b	82.46±0.74 d	54.84±0.47 a	1.42±0.04 b
N2	0.003 0±0.000 1 c	94.80±0.36 c	53.39±1.40 ab	1.51±0.12 b
W	0.002 5±0.000 2 cd	109.73±0.62 a	51.43±0.14 b	1.82±0.15 a
WN1	0.007 2±0.000 7 a	100.52±0.28 b	54.71±0.29 a	1.09±0.03 c
WN2	0.001 7±0.0001 d	103.49±2.47 b	54.28±0.30 a	1.41±0.05 b

2.4 增温施氮对高寒湿草甸土壤氮矿化速率的影响

由表4可知,不同处理显著影响了土壤净氨化速率、净硝化速率和净氮矿化速率。与CK相比,W、WN1处理土壤净氨化速率、净硝化速率、净氮矿化速率分别显著提高了234.0%,65.3%;78.3%,19.5%和140.8%,37.9%,且与其他处理存在显著性差异($P<0.05$)。与CK相比,N1处理的土壤净氨化速率无显著变化,而土壤净硝化速率及净氮矿化速率显著降低($P<0.05$)。与CK相比,WN2、N2处理土壤净氨化速率、净硝化速率、净氮矿化速率分别降低了12.7%,74.9%;47.6%,65.0%和33.6%,69.1%。总体来看,W、WN1处理促进了土壤氮矿化,N2、WN2却抑制土壤氮矿化。双因素方差分析结果(表5)表明,增温、施氮及其交互作用对土壤净氮矿化速率均有极显著影响。

表4 增温施氮对高寒湿草甸土壤氨化、硝化和净氮矿化速率的影响

Table 4 Effects of warming nitrogen application on ammoniation, nitrification and net nitrogen mineralization rates in apline meadow mg/(g·d)

处理 Treatment	土壤净氨化速率(R_a) Net ammoniation rate	土壤净硝化速率(R_n) Net nitrification rate	土壤净氮矿化速率(R_N) Net mineralization rate
CK	0.03±0.01 c	0.05±0.01 b	0.08±0.01 c
N1	0.03±0.00 c	0.02±0.01 c	0.04±0.00 de
N2	0.01±0.00 d	0.02±0.00 c	0.02±0.01 e
W	0.11±0.01 a	0.08±0.01 a	0.19±0.01 a
WN1	0.05±0.01 b	0.06±0.00 b	0.11±0.00 b
WN2	0.03±0.01 c	0.03±0.01 c	0.05±0.00 d

表5 增温和施氮及其二者交互作用对高寒湿草甸土壤氨化、硝化和净氮矿化速率影响的双因素方差分析

Table 5 Results of two-factor ANOVA on soil N mineralization rate under temperature increase and N application

影响因素 Factor	显著性 Significance	R_a	R_n	R_N
增温(W) Warming	F	97.894	124.284	748.514
	P	<0.001	<0.001	<0.001
施氮(N) Nitrogen application	F	85.591	84.326	124.284
	P	<0.001	<0.001	<0.001
增温×施氮(W×N) Warming and nitrogen application	F	12.382	15.645	84.326
	P	0.001	0.001	<0.001

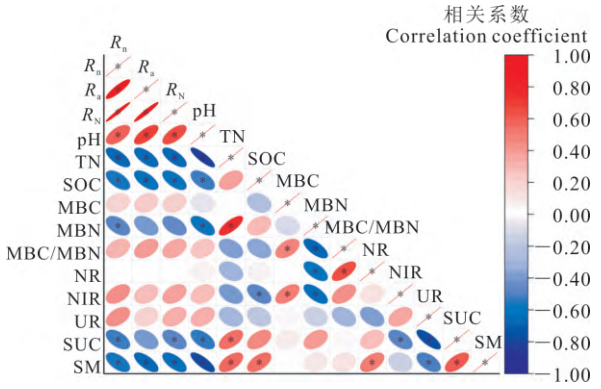
2.5 高寒湿草甸土壤氮矿化与理化性质、微生物生物量碳氮及酶活性的相关性

土壤氮矿化速率与理化性质、微生物生物量碳氮含量和酶活性的相关性如图1所示。由图1可知,增温施氮条件下,高寒湿草甸土壤净氨化速率、净硝化速率和净氮矿化速率均与pH呈显著正相关,而与TN、SOC、SM呈显著负相关。

土壤氮矿化速率与理化性质、微生物生物量碳氮含量和酶活性的冗余分析结果见图2,由于pH对主成分的贡献有限,故冗余分析中自动剔除了该指标。

图2表明,第一、二排序轴累计解释率分别为72.21%,1.70%,说明第一、二排序轴能够很好地反映土壤氮矿化速率与土壤理化性质、土壤微生物生物量碳氮含量和酶活性之间的关系,且主要由第一排序轴决定。TN、SOC和SM对土壤净氨化速率、净硝化速率和净氮矿化速率在前两轴的累计贡献率为74.41%,其中TN和SOC解释率分别为64.4%和18.4%,可知TN、SOC是湿草甸土壤氮矿化变化的主要影响因素。

中国知网 https://www.cnki.net



R_n. 净硝化速率；R_a. 净氨化速率；R_N. 净氮矿化速率；MBC. 微生物生物量碳；MBN. 微生物生物量氮；MBC/MBN. 微生物生物量碳氮比；TN. 全氮；SOC. 土壤有机碳；SM. 土壤含水量；NIR. 硝酸还原酶；NR. 亚硝酸还原酶；SUC. 蔗糖酶；UR. 脲酶。*表示显著相关（$P<0.05$）。下图同。

R_n. Nitrification rate; R_a. Ammonification rate; R_N. Net N mineralization rate; MBC. Soil microbial biomass C; MBN. Soil microbial biomass N; MBC/MBN. Soil microbial biomass C/N; TN. Total nitrogen; SOC. Soil organic carbon; SM. Soil moisture; NIR. Nitrate reductase; NR. Nitrate reductase; SUC. Sucrase; UR. Urease. * indicates a significant correlation ($P<0.05$). The same below.

图 1　土壤氮矿化速率与理化性质、微生物生物量碳氮含量和酶活性的相关性

Fig. 1　Correlation analysis of soil nitrogen mineralization rate with soil physicochemical properties, microbial biomass C and N and enzyme activity

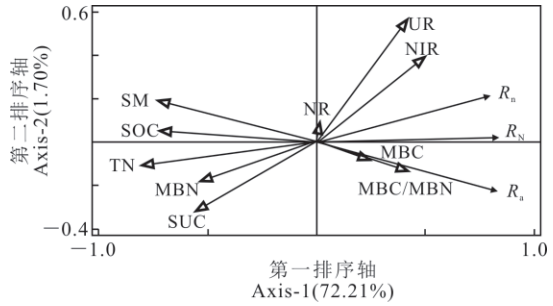


图 2　土壤氮矿化速率与理化性质、微生物生物量碳氮含量和酶活性的冗余分析（RDA）

Fig. 2　RDA analysis of soil nitrogen mineralization rate and soil physicochemical properties, microbial biomass C and N content and enzyme activity

3　讨　论

3.1　增温施氮对高寒湿草甸土壤微生物生物量碳氮含量和酶活性的影响

本研究中，在尕海高寒湿草甸，与 CK 相比，W 处理明显增加了土壤 MBC 含量，可知增温对 MBC 含量增加起到了促进作用，这可能与植被生长初期土壤水热条件的改善有关。研究表明，土壤温度升高不仅会增加生物可利用碳数量，而且会导致微生物群落结构和功能发生变化[16]。本研究中，与 CK 相比，W 处理显著降低了土壤 MBN 含量，这可能是因为增温促使土壤微生物活性和群落结构发生了改变，对氮素敏感的微生物对土壤 MBN 的消耗增加，从而降低了土壤 MBN 含量。本研究中，在单一施氮条件下，随着施氮量的增加，土壤 MBN 含量逐渐减小，这与马源等[17]的研究结果相反，可能是由于本研究是在连续施氮 3 年长期定位试验的基础上进行的，土壤氮含量积累较高，抑制了微生物对氮素的转化所致。

本研究发现，在尕海高寒湿草甸，与 CK 相比，增温（W）及单一施氮处理（N1、N2）对土壤 NR、NIR 和 UR 活性有一定的提升作用。除了 W 处理显著降低了 SUC 活性外，其他处理 SUC 活性无显著变化，这与高艳娜[18]和杨文英[19]对湿地的研究结果一致。此外，SUC 活性与 TN 含量存在显著的正相关关系，这与其他团队关于湿地土壤酶活性变化的研究结果相一致[20-21]。有研究表明，短期增温施氮交互处理提高了 UR 活性[2,22]。本研究中，与 CK 相比，只有 W 处理 UR 活性显著增加，增温施氮处理的 UR 活性无显著变化，这与前人的研究结果存在差异，可能是因为持续输入的氮源刺激了土壤脲酶分解，抵消了增温处理促进 UR 活性提高的效果。由此可见，持续的增温和施氮处理会显著改变高寒湿草甸氮循环过程，虽然其土壤 SUC 与 UR 活性并无显著提升，但土壤 NR 及 NIR 活性总体提高，从侧面反映了该区域的土壤氮矿化过程发生了明显转变。

3.2　增温施氮对高寒湿草甸土壤 N 供应能力的影响

本研究中，在尕海高寒湿草甸，与 CK 相比，W、WN1 处理显著增加了土壤净氮矿化速率，而 WN2、N2 处理显著降低了土壤净氮矿化速率。这是因为 W 处理土壤 C/N 较高（16.49），且 W 处理提高了 UR、UIR 活性，明显影响了土壤中 NO_3^- 还原为 NO_2^- 的过程以及 N_2 还原为 NH_3 的过程[23]，从而增强了氮矿化过程。此外，N1 处理土壤净氮矿化速率明显高于 N2 处理，表明低氮提高了土壤微生物活性，从而增强了微生物对有机物的矿化，进而产生较多的矿质氮[24]。N2 处理土壤 C/N（14.33）和 MBC/MBN 均低于 N1 处理，说明高氮抑制了土壤氮矿化速率。这是因为高氮输入抑制了与土壤矿化相关的微生物活性以及植物根系活力[25-26]，最终抑制了土壤氮矿化过程。本研究是在连续 3 年长期定位试验基础上进行的，有研究认为，氮添加年限超过 2 年后其增

中国知网　https://www.cnki.net

强效应显著降低[27],这是由于最初氮添加能够刺激植物生长和微生物活动,促进土壤中氮的转化[28];然而随着施氮年限的增加,土壤中氮积累量明显增大,氮的限制作用加剧,反而不利于土壤氮的矿化。

3.3 增温施氮条件下土壤氮矿化与环境因子间的关系

本研究中,在尕海高寒湿草甸,土壤净氨化速率、净硝化速率、净氮矿化速率主要受到TN、SOC的影响,其中TN的贡献率高达64.4%,施氮影响氮含量导致土壤C/N降低,从而提高了土壤碳矿化速率,这一变化对土壤氮矿化速率的影响尤为显著。本研究发现,与CK相比,施氮(N1、N2)处理明显提高了土壤SOC含量,这是由于植被生长初期植物碳汇的利用率并未达到最高[29],表层土壤SOC的分解、吸收和转化速率较低[30],从而导致施氮处理土壤SOC累积。研究表明,氮添加通过提高土壤SOC含量使土壤内部的矿化作用更加活跃[30],从而影响了土壤氮矿化速率。本研究中,在尕海高寒湿草甸,SM与土壤净氨化速率、净硝化速率和净氮矿化速率均呈显著负相关,这是由于氮添加会增加土壤含水量,促进土壤氮组分的转化,减少了矿化过程中的土壤硝态氮和铵态氮含量,最终抑制了土壤氮矿化过程。

4 结 论

在尕海高寒湿草甸,与CK相比,增温、施氮、增温施氮处理均明显影响了土壤理化性质、微生物生物量碳氮含量、酶活性以及土壤氮矿化过程。与CK相比,W、WN1处理促进土壤氮矿化过程,而N2、WN2处理抑制土壤氮矿化速率。这表明净氮矿化速率并未与氮输入量呈显著正相关,当氮添加量超过一定水平后,土壤氮矿化速率反而会下降。TN和SOC是尕海高寒湿草甸土壤氮矿化的主要影响因素。本研究结果初步揭示了在长期气候变暖和氮沉降增加的背景下尕海高寒湿草甸土壤氮素转化的主要特点,为未来高寒湿草甸土壤氮素的利用与转化提供了理论依据。

[参考文献]

[1] LI S, DONG S K, SHEN H, et al. Nitrogen addition gradient can regulate the environmental filtering of soil potassium or phosphorus in shaping the community assembly of alpine meadow[J]. Ecological Indicators, 2020, 109: 105774.

[2] 杨永凯,马维伟,陈好,等. 尕海湿地区沼泽草甸土壤酶活性对短期增温施氮的响应[J]. 草地学报, 2022, 30(12): 3263-3271.
YANG Y K, MA W W, CHEN H, et al. Response of soil enzyme activities in marsh meadow in Gahai wet short-term warming and nitrogen addition[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(12): 3263-3271.

[3] 王雪,郭雪莲,郑容波,等. 放牧对滇西北高原纳帕海沼泽化草甸湿地土壤氮转化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2308-2314.
WANG X, GUO X L, ZHENG R B, et al. Effects of grazing on nitrogen transformation in swamp meadow wetland soils in Napahai of Northwest Yunnan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2308-2314.

[4] ABER J, MCDOWELL W, NADELHOFFER K, et al. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited[J]. BioScience, 1998, 48(11): 921-934.

[5] 元晓春,曾泉鑫,张晓晴,等. 3年高氮添加对黄山松土壤真菌网络稳定性的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(8): 3372-3381.
YUAN X C, ZENG Q X, ZHANG X Q, et al. The impact of reduced by three-year high nitrogen addition on stability of soil fungal network of *Pinus taiwanensis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(8): 3372-3381.

[6] 郝颖琦,王玉英,吴鹏飞,等. 青藏高原高寒生态系统土壤呼吸对氮添加的响应:Meta分析[J]. 生态学杂志, 2024, 5(20): 1-11.
HAO Y Q, WANG Y Y, WU P F, et al. Response of soil respiration to nitrogen addition in alpine ecosystem of the Qinghai-Tibetan Plateau: a Meta-analysis[J]. China Induetrial Economics, 2024, 5(20): 1-11.

[7] ZHANG S H, CHEN D D, SUN D S, et al. Impacts of altitude and position on the rates of soil nitrogen mineralization and nitrification in alpine meadows on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(4): 393-400.

[8] WANG J, ZHANG J B, MÜLLER C, et al. Temperature sensitivity of gross N transformation rates in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(2): 423-431.

[9] 宋良翠,马维伟,李广,等. 温度变化对尕海湿地不同退化梯度土壤氮矿化的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(9): 27-37.
SONG L C, MA W W, LI G, et al. Effect of temperature changes on nitrogen mineralization in soils with different degradation gradients in Gahai wetland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(9): 27-37.

[10] 刘颖慧,李悦,牛磊,等. 温度和湿度对内蒙古草原土壤氮矿化的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(3): 349-354.
LIUY H, LI Y, NIU L, et al. Effects of temperature and moisture on nitrogen mineralization in Inner Mongolia grassland, China[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(3): 349-354.

[11] 陈好,马维伟,龙永春,等. 尕海湿地草甸土退化过程土壤氮矿化演变特征[J]. 生态学报, 2023, 43(10): 3906-3919.
CHEN H, MA W W, LONG Y C, et al. Evolution characteristics of soil nitrogen mineralization during meadow soil degrada-

中国知网 https://www.cnki.net

tion of Gahai wetland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10):3906-3919.

[12] JIA Y, YU G, HE N, et al. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China in duced induced by human activity[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1):3763.

[13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[14] 武志杰，隽英华，陈利军，等. 一种检测土壤硝酸还原酶活性的分析方法[M]. 北京：中国农业出版社，2011.
WU Z J, JUN Y H, CHEN L J, et al. An analytical method for detecting soil nitrate reductase activity[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.

[15] 邹英武，杜洋文，程军勇，等. 不同配方施肥对油茶林地土壤酶活性、微生物群落结构及产量和品质影响[J]. 中国农学通报，2023, 39(31):113-121.
ZOU Y W, DU Y W, CHENG J Y, et al. Effect of different formula fertilizations on soil enzyme activity, microbial community structure, fruit yield and quality in *Camellia oleifera* woodland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(31):113-121.

[16] 贺云龙，齐玉春，彭琴，等. 外源碳输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响及其微生物学驱动机制[J]. 生态学报，2017, 37(2):358-366.
HE Y L, QI Y C, PENG Q, et al. Effects of external carbon on the key processes of carbon cycle in a terrestrial ecosystem and its microbial driving mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2):358-366.

[17] 马源，杨洁，张德罡，等. 高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响[J]. 生态学报，2020, 40(8):2680-2690.
MA Y, YANG J, ZHANG D G, et al. Effects of alpine meadow degradation on soil microbial biomass and nitrogen mineralization rate in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8):2680-2690.

[18] 高艳娜. 长江口湿地土壤酶活性和土壤微生物生物量对长期模拟升温的响应[D]. 上海：华东师范大学，2017.
GAO Y N. Response of soil enzyme activity and soil microbial biomass to long-term simulated warming in wetland of the Yangtze River estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.

[19] 杨文英. 杭州湾湿地四种湿地环境土壤呼吸特征以及土壤活性有机碳研究[D]. 重庆：西南大学，2011.
YANG W Y. Study on soil respiration characteristics and soil active organic carbon in four wetland environments in Hangzhou Bay wetland[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.

[20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京：农业出版社，1986.
GUAN S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.

[21] 文程敬，吴俊文，刘元玺，等. 氮对轻木人工林生长及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025, 53(6):37-47.
WENG C J, WU J W, LIU Y X, et al. Effects of nitrogen on the growth and C, N and P stoichiometric characteristics of *Ochroma pyramidale* plantations [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(6): 37-47.

[22] BAI Y P, LI F, YANG G, et al. Meta-analysis of experimental warming on soil invertase and urease activities[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2018, 68(2):104-109.

[23] 罗希茜，陈哲，胡荣桂，等. 长期施用氮肥对水稻土亚硝酸还原酶基因多样性的影响[J]. 环境科学，2010, 31(2):424-430.
LUO X Q, CHEN Z, HU R G, et al. Effect of long-term fertilization on the diversity of nitrite reductase genes (*nirK* and *nirS*) in paddy soil [J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 423-430.

[24] 郝婧羽. 活性污泥硝酸盐异化还原为铵(DNRA)的影响因素及DNRA-Anammox耦合机理探究[D]. 西安：西安科技大学，2021.
HAO J Y. Influencing factors of nitrate dissimilation reduction to ammonium (DNRA) in activated sludge and study on coupling mechanism of DNRA-Anammox[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.

[25] 胡星云，孙志高，张党玉，等. 外源氮输入对黄河口碱蓬湿地土壤碳氮含量动态的影响[J]. 水土保持学报，2017, 31(6):204-211.
HU X Y, SUN Z G, ZHANG D Y, et al. Effects of exogenous nitrogen input on the dynamics of soil carbon and nitrogen contents in *Suaeda salsa* marshes of Yellow River Estuary, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 204-211.

[26] 王韵淑，曹延武，冰德叶，等. 氮磷肥对华山松幼苗生长和生态化学计量特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025, 53(4):70-79.
WANG Y S, CAO Y W, BING D Y, et al. Effect of nitrogen an dphosphorus addition on seedling growth and ecological stoichiometry of *Pinus armandii* [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(4):70-79.

[27] 郭亚兵，毛晋花，王聪，等. 氮、磷添加对热带森林土壤氮转化及损失影响的研究进展[J]. 生态学杂志，2021, 4(10):3339-3354.
GUO Y B, MAO J H, WANG C, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil nitrogen transformation and loss in tropical forests: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 4(10):3339-3354.

[28] LI Y, SUN J, TIAN D S. Soil acid cations induced reduction in soil respiration under nitrogen enrichment and soil acidification[J]. Science of the Total Environment, 2018, 615: 1535-1546.

[29] ZHANG T A, CHEN H Y, RUAN H H. Global negative effects of nitrogen deposition on soil microbes[J]. The ISME Journal, 2018, 12(7):1817-1825.

（下转第 168 页）

中国知网 https://www.cnki.net

[29] 王垿,孙昕,李鹏飞,等.双对栅藻FACHB-78甘油三酯积累的盐胁迫条件优化[J].中国环境科学,2019,39(12):5248-5253.
WANG X,SUN X,LI P F,et al. Optimization of salt stress condition for accumulation of triglycerides in *Scenedesmus bijuga* FACHB-78[J]. China Environmental Science,2019,39(12):5248-5253.

[30] SRIVASTAVA G,NISHCHAL,GOUD V V. Salinity induced lipid production in microalgae and cluster analysis (ICCB 16-BR_047)[J]. Bioresource Technology,2017,242:244-252.

[31] PANCHA I,CHOKSHI K,MAURYA R,et al. Salinity induced oxidative stress enhanced biofuel production potential of microalgae *Scenedesmus* sp. CCNM 1077[J]. Bioresource Technology,2015,189:341-348.

[32] 陈飞,王淑智,潘响亮.盐胁迫对蛋白核小球藻光系统Ⅰ(PSⅠ)和光系统Ⅱ(PSⅡ)的影响同步监测分析[J].应用与环境生物学报,2015,21(4):695-699.
CHEN F,WANG S Z,PAN X L. Synchronous analysis of the effects of NaCl stress on photosystems Ⅰ (PSⅠ) and Ⅱ (PSⅡ) activities of *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2015, 21(4): 695-699.

[33] 饶本强,张列宇,吴沛沛,等.集球藻对盐胁迫的生理适应及细胞结构变化[J].水生生物学报,2012,36(2):329-338.
RAO B Q,ZHANG L Y,WU P P,et al. Changes on cellular structures and physiological adaptation of *Palmellococcus* sp. subjected to salt stress[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2012,36(2):329-338.

[34] LIU H B,BUSKEY E J. Hypersalinity enhances the production of extracellular polymeric substance (eps) in the texas brown tide alga,*Aureoumbra lagunensis* (Pelagophyceae)[J]. Journal of Phycology,2000,36(1):71-77.

[35] 张展,刘建国.微藻高密度培养中的生长指标和适应机制[J].海洋水产研究,2003,24(4):36-43.
ZHANG Z,LIU J G. Applications of growth parameters and adaptive mechanisms of microalgae cultured at high cell density[J]. Marine Fisheries Research,2003,24(4):36-43.

[36] SAIRAM R K,RAO K V,SRIVASTAVA G C. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress,antioxidant activity and osmolyte concentration[J]. Plant Science,2002,163(5):1037-1046.

[37] 宁建凤,郑青松,邹献中,等.罗布麻对不同浓度盐胁迫的生理响应[J].植物学报,2010,45(6):689-697.
NING J F,ZHENG Q S,ZOU X Z,et al. Physiological responses of *Apocynum venetum* to different levels of salt stress [J]. Chinese Bulletin of Botany,2010,45(6):689-697.

[38] 费伟,陈火英,曹忠,等.盐胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2005,23(1):5-9.
FEI W,CHEN H Y,CAO Z,et al. Effects of salininty stress on phsiological characteretics of tomato seedling[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science), 2005,23(1):5-9.

[39] BIAGINI G A,KIRK K,SCHOFIELD P J,et al. Role of K^+ and amino acids in osmoregulation by the free-living microaerophilic protozoon *Hexamita inflata*[J]. Microbiology, 2000,146(2):427-433.

[40] HO S H,NAKANISHI A,KATO Y,et al. Dynamic metabolic profiling together with transcription analysis reveals salinity-induced starch-to-lipid biosynthesis in alga *Chlamydomonas* sp. JSC4[J]. Scientific Reports,2017,7:45471.

[41] 陈运梁,邹竹荣,杨双龙.外源茉莉酸甲酯对盐胁迫下小桐子幼苗渗透调节和脯氨酸代谢的影响[J].西北植物学报,2023,43(5):794-804.
CHEN Y L,ZOU Z R,YANG S L. Effect of exogenous methyl jasmonate on osmotic adjustment capacity and proline metabolism of *Jatropha curcas* seedlings under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2023,43(5):794-804.

[42] POTTS M. Mechanisms of desiccation tolerance in *Cyanobacteria*[J]. European Journal of Phycology,1999,34(4):319-328.

[43] 朱文秀,任洪艳,庄海浪,等.污泥脱水液培养微藻在盐胁迫下的油脂积累情况[J].应用与环境生物学报,2022,28(1):182-189.
ZHU W X,REN H Y,ZHUANG H L,et al. Lipid accumulation of cultivating microalgae using sludge liquor under salt stress[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2022,28(1):182-189.

(责任编辑:温晓平 裴阿卫)

(上接第159页)

[30] 卢朝阳,马维伟,杜佳团,等.尕海湿地区沼泽草甸生长季土壤碳氮组分对增温施氮的响应[J].水土保持学报,2024,38(2):316-325.
LU Z Y,MA W W,DU J N,et al. Response of growing season soil carbon and nitrogen components to warming and nitrogen addition in marshy meadows of the Gahai wetland area [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):316-325.

(责任编辑:李小平)

中国知网 https://www.cnki.net