

# 盐碱草甸植被退化对土壤硝化作用强度的影响

翟辉亮, 张丽辉, 王 贵, 谷天何, 王新宇, 廖玉杰, 郑力溥

(长春师范大学 生命科学学院, 长春 130032)

**摘 要:** 为了解不同退化阶段盐碱草甸草原土壤硝化作用强度特征及其影响因素, 采用空间代替时间的方法, 以松嫩平原盐碱草甸草原植被退化过程中 4 种典型植物群落为对象, 以未做处理为参照, 设置刈割、施氮和刈割同时施氮 3 种处理, 测定了土壤的硝化作用强度(NI)、pH 值、电导率(EC)、含水量(SMC)和有效磷(OP)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)及全氮(TN)的含量。结果显示:(1) 土壤 NI 与 pH 值、电导率、含水量、OP 和  $\text{NO}_3^-$ -N 呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ );通过逐步回归分析的方法得出土壤 NI 的重要影响因素, 重要影响因素对土壤 NI 影响强弱表现为: pH 值 > 有效磷含量 > 含水量 > 硝态氮含量, 并推断土壤硝态氮含量可作为土壤 NI 的一个重要表征参数。(2) 未作处理时, 星星草群落与碱蓬群落土壤硝化作用强度分别为 13.4, 13.5 mg/(kg · h), 显著高于羊草群落和退化羊草群落的 5.0, 2.5 mg/(kg · h), 刈割和施氮处理分别使星星草群落土壤 NI 提高 96.88%, 253.77%, 混合处理使其提高 413.70%, 显著高于其他 3 种植物群落, 由此可见, 在人为刈割和施氮肥的干预下, 星星草群落土壤铵态氮可能更易转变为硝态氮, 氮素流失的风险也更大, 因此可认为星星草群落处于盐碱草甸退化过程中的关键阶段。

**关键词:** 盐碱草甸草原; 硝化作用强度; 植被退化; 刈割; 施氮

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)02-0021-06

## Effects of Saline-Alkali Meadow Vegetation Degradation on Soil Nitrification Intensity

ZHAI Huiliang, ZHANG Lihui, WANG Gui, GU Tianhe, WANG Xinyu, LIAO Yujie, ZHENG Lipu

(College of Life Sciences, Changchun Normal University, Changchun 130032, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics and influencing factors of soil nitrification intensity in saline-alkaline meadow grasslands at different degradation stages, based on space-for-time method, and four typical plant communities in the process of saline-alkaline meadow grassland vegetation degradation in the Songnen Plain were selected as objects. Based on the untreated treatment, three treatments of cutting, nitrogen application and simultaneous nitrogen application were set. The soil nitrification intensity (NI), pH, electrical conductivity (EC), soil moisture content (SMC) and available phosphorus (OP), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N), ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+$ -N) and total nitrogen (TN) content were investigated. The results showed that: (1) the soil nitrification intensity had a very significant positive correlation with pH, EC, SMC, OP and  $\text{NO}_3^-$ -N ( $p < 0.01$ ); through stepwise regression analysis, important influence factors of soil nitrification intensity were obtained, the influence of important factors on soil nitrification intensity were ranked as order: pH > OP > SMC >  $\text{NO}_3^-$ -N, and it could be concluded that soil nitrate nitrogen content could be used as an important characterization parameter for soil nitrification intensity; (2) the soil nitrification intensity of untreated *Puccinellia tenuiflora* community and *Suaeda salsa* community were 13.4 mg/(kg · h) and 13.5 mg/(kg · h), respectively, which were both much higher than those of *Leymus chinensis* community and degraded *Leymus chinensis* community [5.0 mg/(kg · h) and 2.5 mg/(kg · h)], respectively; mowing and nitrogen treatment increased the soil nitrification intensity of *Puccinellia tenuiflora* community by 96.88% and 253.77%, respectively, and mixed treatment increased 413.70%, which was significantly higher than that of the other three plant communities. It can be seen that the soil ammonium nitrogen in the *Puccinellia*

收稿日期: 2020-05-03

修回日期: 2020-05-26

资助项目: 国家自然科学基金(31670430; 31670426)

第一作者: 翟辉亮(1998—), 男, 河南开封人, 本科, 研究方向为土壤生态学。E-mail: zhaihuiliang@126.com

通信作者: 王贵(1982—), 男, 贵州大方人, 实验师, 博士, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: wangguixy@126.com

*tenuiflora* community may be more easily converted to nitrate nitrogen under the intervention of man-made mowing and nitrogen fertilizer application, and the risk of nitrogen loss is also greater. Therefore, it can be considered that the *Puccinellia tenuiflora* community is at a critical stage in the degradation process of saline-alkali meadows.

**Keywords:** saline-alkali meadow grassland; nitrification intensity; vegetation degradation; mowing; nitrogen application

陆地生态系统氮循环主要包括固氮作用、氨化作用、硝化作用、反硝化作用及生物体内有机氮的合成等环节<sup>[1]</sup>,而土壤内部氮循环则可以细分为氨化作用、硝化作用、铵态氮的固定、硝态氮的固定、硝态氮异化还原为  $\text{NH}_3$ ,有机氮异养硝化及植物直接吸收简单有机氮等过程<sup>[2]</sup>。硝化作用作为氮循环过程中的一个关键步骤,广泛分布于陆地、水体以及污泥中,承担着生物圈氮素平衡的重要功能,且与植物营养关系密切。硝化作用最早由俄罗斯科学家 Winogradsky 发现,其认为硝化过程分两个阶段,即将氨( $\text{NH}_3$ )氧化为亚硝酸根( $\text{NO}_2^-$ )的氨氧化阶段(Ammonia oxidizing)和将  $\text{NO}_2^-$  氧化为硝酸根( $\text{NO}_3^-$ )的亚硝酸盐氧化阶段(Nitrite oxidation)<sup>[3]</sup>,这两个过程分别由氨氧化微生物和硝化微生物主导<sup>[4-5]</sup>。近些年来,国内外众多学者对硝化作用进行了多方面、多层次的研究,并取得了大量成果,如 2015 年,世界上 3 个研究团队几乎同时发现了可以将氨直接氧化为硝酸盐的微生物,这彻底改变了 100 多年来人们关于硝化作用的认识,此类微生物被命名为全程氨氧化微生物(Comammox)<sup>[6-8]</sup>;影响土壤硝化作用的环境因素众多,包括土壤 pH 值、底物和产物浓度、水分、氧气含量以及温度等<sup>[9]</sup>。有研究发现在多种土壤体系中,AOA 的硝化活力要高于 AOB<sup>[10]</sup>;鲍俊丹等<sup>[11]</sup>通过控制含水量、施氮量和温度研究了我国 13 种不同类型土壤的硝化作用,发现不同类型土壤硝化作用差别很大,并且硝化作用与土壤的 pH 值呈显著正相关;一般认为,硝化作用速率在中性或者碱性土壤中更高,在酸性土壤中相对较低,甚至在 pH 值 $<5.5$  的培养基上无法分离氨氧化微生物,然而近几年的研究表明,在 pH 值降为 3.0 的情况下,硝化速率可等于甚至超过中性土壤<sup>[12]</sup>。目前,国内外学者对松嫩平原盐碱草甸草原土壤硝化作用强度仍缺乏系统性的研究。硝化作用作为全球氮循环中的一个重要环节,其也是造成土壤氮素损失和环境氮素污染的重要原因,对环境质量有很大的影响,如  $\text{NO}_3^-$ -N 易通过淋溶或反硝化作用造成土壤氮素的损失,导致土壤肥力的下降<sup>[13-15]</sup>,并造成地下水的污染或温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  的排放等<sup>[16-17]</sup>。

松嫩平原作为我国著名的畜牧基地,拥有优质而庞

大的牧草资源,同时也是我国盐碱地的主要分布区域之一,据 2016 年的数据显示,该区域的盐碱土地面积已达 393.7 万  $\text{hm}^2$ <sup>[18]</sup>,且具有面积扩大、盐碱化程度加深的趋势<sup>[19-20]</sup>。近年来国家通过推行退耕还林还草工程,使大部地区的土地盐碱化趋势得到了遏制,草甸草原在退化或恢复的过程中,植物群落组成和  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N, TN, OP 含量等都会发生变化,但这些指标的变化究竟如何影响土壤硝化作用鲜有报道。本研究采用空间代替时间的方式,选取 4 种不同退化阶段的草甸草原典型植物群落(羊草群落、退化型羊草群落、星星草群落、碱蓬群落)为研究对象,采用刈割与施氮两种处理方式以模拟收割草与施肥,旨在分析不同退化阶段的草甸草原,在不同的管理模式下,土壤硝化作用强度与植物群落、土壤基本理化性质的相互关系,为可持续利用盐碱草甸草原提供数据支持。

## 1 研究区概况

样地设置在吉林省双辽市卧虎镇左岭村东泰牧场,该区域位于松嫩平原西部,为科尔沁沙地东缘,多为苏打盐碱地,土壤质地多为黏土,海拔 150 m,北纬  $43^\circ46'48''$ ,东经  $123^\circ41'58''$ ,属大陆季风性气候。全年热量充足,光照充沛,降水偏少,四季气候分明,雨热同步。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置

选取 4 个不同恢复阶段的典型植物群落为研究对象:(1) 未退化(undegraded, Ud),羊草群落 [*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.]; (2) 轻度退化(mild degraded, Md),退化型羊草群落; (3) 中度退化(moderate degraded, MOd),星星草群落 [*Puccinellia tenuiflora* (Turcz.) Scribn. et Merr.]; (4) 重度退化(heavy degraded, Hd),碱斑或碱蓬群落 [*Suaeda salsa* (L.) Pall.]. 每种典型植物群落,以不作处理为对照(CK),设置刈割(Cut, C),施氮(N),刈割同时施氮(C&N) 3 种处理模式。刈割处理为:每年 8 月末将植被地上部分全部割走;施氮处理为:每  $1 \text{ m}^2$  每年施加 5 g 混合氮(硫酸铵:硝酸钙=7:3),每年 5—9 月份期间分 5 次施加。每个处理类型样地设立 5 个

5 m×5 m 的样方作为平行重复处理。

2.2 取样方法

土壤样品采集于 2019 年 7 月中旬(植物生长旺季,同步进行植被调查),在每个样方内,去除表层土,使用取土器(规格为内径 5 cm,高 10 cm)采集 0—10 cm 土壤,四分法收集适量土壤,根据随机抽样的原则,将每个样方的 3 点土壤混匀,放入冰盒带回实验室。

土壤样品带回实验室后,用镊子挑除植物残体及石砾,过 10 目土壤标准筛,试验样品分为两部分,一部分为鲜土,存放于 4℃ 冰箱,用于测定土壤硝化作用强度、含水量、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N;另一部分为风干处理,用于测定土壤 pH 值、电导率、OP 和 TN。

2.3 测定项目及方法

土壤硝化作用强度采用土浆培养法测定,培养基为 CaCO<sub>3</sub> 5 g,(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2 g,MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.03 g,MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.01 g,使用 1 L 磷酸盐缓冲液(pH 值=8.34)溶解。接种土壤后,振荡 30 min,初次取样,作为 0 h 样本,紧接着恒温振荡培养(180 r/min,28℃),此后每隔 24 h 取样,至 168 h 结束,采用重氮偶合分光光度法测定亚硝态氮含量,检测波长 520 nm,以亚硝态氮的产生速率计算硝化作用强度。

土壤 pH 值与电导率使用 DZS-708 多参数分析仪测定;土壤含水量采用烘干法测定;OP 采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定,浸提剂为 0.5 mol/L 的 NaHCO<sub>3</sub>(用 100 g/L 的 NaOH 调节 pH 值至 8.5),土液比为 1:20,检测波长 700 nm;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用靛酚蓝比色

法测定,浸提剂为 2 mol/L 的 KCl,土液比为 1:5,检测波长 625 nm;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用紫外分光光度法测定,浸提剂为 0.01 mol/L 的 CaCl<sub>2</sub>,土液比为 1:5;TN 使用凯氏定氮法测定,土壤样品经消化炉消化后,使用 KjeltecTM8400 凯氏定氮仪测定。

2.4 数据处理与分析

使用 Excel 2010 整理数据,利用 SPSS 19.0 分析与作图,使用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同植物群落及不同处理类型土壤硝化作用强度与基本理化性质进行差异检验(LSD,*p*<0.05),逐步回归分析和相关性检验均使用 SPSS 软件。

3 结果与分析

3.1 不同处理模式下典型植物群落土壤理化性质

3.1.1 刈割与施氮处理对土壤理化性质的影响 刈割处理对土壤理化性质的影响:(1)对羊草群落、星星草群落和碱蓬群落土壤 pH 有显著影响,分别为升高 0.13,降低 0.16 和升高 0.1,对退化羊草群落无显著影响;(2)使除星星草群落外的其他 3 种群落的土壤电导率提高;(3)使含水量降低 5.62%~37.07%,且随着退化程度的加重,刈割对土壤含水量的影响随之减轻;(4)对 4 种植物群落土壤 TN 含量影响不显著,对羊草群落和退化羊草群落土壤 OP 影响也不显著,星星草群落土壤 OP,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 量提高 24.75%,54.89%,碱蓬群落土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 OP 含量分别提高 46.76%,84.31%,15.47%(表 1)。

表 1 不同处理模式下各退化阶段典型植物群落土壤理化性质

处理类型	退化阶段	pH 值	电导率 (EC)/ (μS·cm <sup>-1</sup> )	含水量/%	有效磷 (Olsen-P)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮 (TN)/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
CK	Ud	8.43±0.05d	389.3±1.8c	8.50±1.31a	4.20±0.14b	4.81±0.19a	10.23±0.25a	1560.14±47.70a
	Md	8.65±0.01c	89.8±3.4d	3.59±0.04b	4.06±0.16b	4.66±0.19a	5.72±0.29b	1520.54±62.34a
	MOd	9.58±0.01b	797.0±17.4b	7.48±0.20a	6.40±0.36a	0.72±0.07b	9.90±0.14a	411.97±23.12b
	Hd	10.34±0.01a	1123.7±12.3a	6.76±0.16a	6.43±0.08a	0.69±0.04b	6.38±0.10b	396.36±4.92b
C	Ud	9.32±0.03c	525.3±0.9c	5.98±0.24b	4.24±0.15c	3.07±0.08b	16.01±0.21b	1762.85±63.49a
	Md	7.74±0.02d	110.2±2.0d	3.28±0.01c	4.29±0.29c	3.55±0.13a	4.96±0.22d	1435.35±8.63b
	MOd	9.71±0.04b	755.3±3.7b	6.64±0.21a	8.16±0.30b	0.67±0.01c	24.33±0.22a	685.91±19.93c
	Hd	10.06±0.01a	1609.3±31.8a	6.09±0.09b	9.45±0.32a	0.78±0.11c	5.99±0.33c	339.65±3.65d
N	Ud	8.67±0.05b	321.0±2.0c	6.93±0.36b	4.10±0.02a	4.23±0.10a	21.52±0.71a	1481.34±58.30a
	Md	7.67±0.01d	111.4±1.4d	3.07±0.05d	3.98±0.20a	3.32±0.16b	13.23±0.12b	1298.49±33.36b
	MOd	7.94±0.02c	1087.7±27.8b	9.71±0.17a	7.69±0.06b	1.45±0.15c	21.63±0.37a	1346.40±76.71ab
	Hd	10.01±0.03a	1364.0±9.5a	5.53±0.12c	8.49±0.29c	1.18±0.12c	8.24±0.41c	320.34±16.47c
C&N	Ud	8.28±0.06c	223.3±2.9c	3.73±0.05c	3.99±0.17c	6.05±0.57b	15.17±0.41b	1326.03±66.86a
	Md	7.70±0.01d	155.3±0.4d	3.15±0.06d	4.17±0.05c	7.27±0.16a	11.87±0.08c	1374.82±21.84a
	MOd	9.51±0.01a	884.0±11.6b	8.37±0.17a	9.63±0.47a	4.12±0.15c	24.50±0.65a	1306.52±6.50a
	Hd	10.06±0.04a	1342.3±11.8a	5.50±0.11b	7.76±0.64b	2.66±0.18d	15.48±0.82b	404.62±25.77b

注:CK 表示未做处理,N 表示施氮,C 表示刈割,C&N 表示刈割同时施氮;Ud 表示退化阶段(羊草群落),Md 表示轻度退化阶段(退化羊草群落),MOd 表示中度退化阶段(星星草群落),Hd 表示重度退化阶段(碱蓬群落或碱斑);同列数据后字母不同表示同一处理下不同退化阶段间差异显著(*p*<0.05),下同。

施氮处理对土壤理化性质的影响:(1) 羊草群落、退化羊草群落和星星草群落土壤 pH 值有显著变化,分别为降低 0.32,降低 0.13 和降低 0.12,但是对碱蓬群落无显著影响;(2) 施氮处理对各群落土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  具显著影响,羊草群落、退化羊草群落、星星草群落和碱蓬群落土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量分别提高 39.78%,135.07%,34.78%,91.69%, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  分别提高 30.45%,29.01%,301.46%,161.50%;(3) 羊草群落、退化羊草群落土壤 TN 分别降低 257.82,141.29 mg/kg,星星草群落土壤 TN 含量升高 777.52 mg/kg,碱蓬群落土壤 TN 含量差异不显著;(4) 施氮处理对土壤含水量及 OP 含量影响不显著(表 1)。

3.1.2 不同类型植物群落土壤理化性质 除退化羊草群落外,随着退化程度的加深,土壤 pH 值及电导率逐渐升高(表 1);在 4 种处理模式下,星星草样地的土壤含水量均最高,除刈割同时施氮处理外,碱蓬群落土壤含水量均高于两种羊草群落;4 种典型植物群落土壤无机态氮都以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为主,随着退化程度的加深,土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  与  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量显著降低,而 OP 含量显著提高;土壤 TN 含量表现为羊草群落 $\approx$ 退化羊草群落 $>$ 星星草群落 $>$ 碱蓬群落。

3.2 不同退化阶段植物群落的多样性

Shannon-Weiner index 用来描述种的个体出现的紊乱和不确定性,不确定性越高,多样性也就越高。随着退化程度的加深,典型植物群落的多样性呈先升高后降低的趋势(图 1)。刈割处理极显著提高了羊草群落和退化羊草群落的多样性,对星星草群落的多样性也有显著提高,而对碱蓬群落无显著影响;施氮处理对 4 种典型群落多样性影响不显著。

3.3 不同处理模式下典型群落的土壤硝化作用强度

未作处理时,星星草群落与碱蓬群落硝化作用强度分别为 13.4,13.5  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ,显著高于羊草群落和退化羊草群落 5.0,2.5  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ (图 2)。施氮、刈割处理分别使星星草群落土壤硝化作用强度提高 253.77%,96.88%,且混合处理使其土壤硝化作用

强度提高 413.70%,说明两种处理可显著提高星星草群落土壤硝化作用强度,且具有叠加效应;施氮、刈割单独处理时,羊草群落土壤硝化作用强度分别提高 61.69%,44.75%,但混合处理时反而降低 23.62%;刈割、施氮两种处理对退化羊草群落和碱蓬群落土壤硝化作用强度无显著影响。

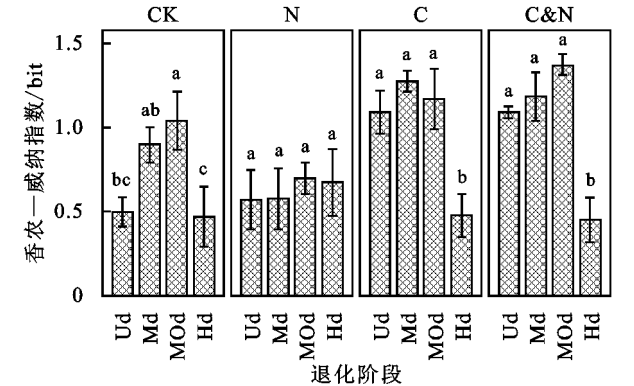


图 1 不同处理模式下各退化阶段典型植物群落的物种多样性

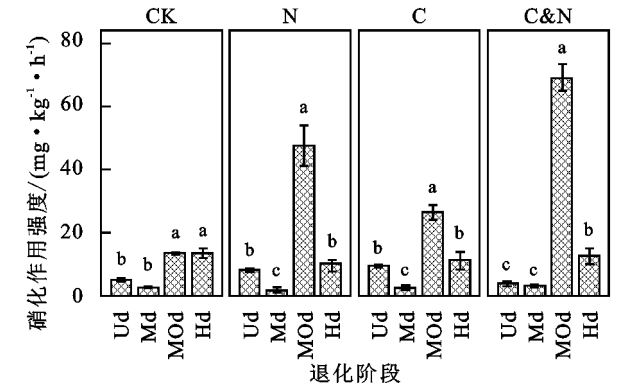


图 2 不同处理模式下各退化阶段典型植物群落的土壤硝化作用强度

3.4 土壤硝化作用强度与基本理化性质的关系

对典型植物群落土壤硝化作用强度和理化性质进行相关性分析(表 2),结果显示:盐碱草甸草原土壤硝化作用强度与土壤 pH 值、电导率、含水量、OP 和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  具有极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),与 Shannon-Weiner index(S-W index)、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TN 无显著相关关系。

表 2 土壤硝化强度与基本理化性质的相关系数

指标	NI	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	SMC	OP	pH	EC	S-W index	TN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$
NI	1	0.645**	0.641**	0.626**	0.455**	0.384**	0.271	-0.033	-0.234
$\text{NO}_3^- \text{-N}$		1	0.443**	0.224	0.198	0.019	0.218	0.238	0.043
SMC			1	0.479**	0.654**	0.492**	-0.176	-0.114	-0.435**
OP				1	0.809**	0.865**	-0.052	-0.668**	-0.629**
pH					1	0.926**	-0.263	-0.703**	-0.773**
EC						1	-0.382**	-0.777**	-0.723**
S-W index							1	0.316*	0.287*
TN								1	0.701**
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$									1

注:\* 代表  $p < 0.05$ , \*\* 代表  $p < 0.01$ 。



为进一步了解在不同退化阶段盐碱草甸草原土壤硝化作用强度与理化性质的关系,以有效磷( $x_1$ )、含水量( $x_2$ )、硝态氮含量( $x_3$ )、土壤 pH 值( $x_4$ )和电导率( $x_5$ )为自变量,以土壤硝化作用强度( $y$ )为因变量进行逐步回归分析,得出最优方程: $y=2.02+0.11x_1+0.096x_2+0.024x_3+0.299x_4$ ,从该方程中可知,土壤有效磷含量、含水量、硝态氮含量、pH 值是土壤硝化作用强度的重要影响因子,这些指标对硝化作用强度的影响强弱为:pH 值>有效磷含量>含水量>硝态氮含量。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

4.1.1 刈割与施氮对土壤硝化作用强度的影响 刈割处理使羊草群落、星星草群落土壤硝化作用强度分别提高 44.75%,96.88%,施氮处理使其分别提高 61.69%,253.77%,蔡祖聪等<sup>[21]</sup>在土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响研究中,认为氮肥的施加会促进硝化作用,这与本研究中结论基本一致。两种处理方式均能提高土壤硝化作用强度,且施氮效应高于刈割,对星星草群落的效应高于羊草群落。但混合处理使星星草群落土壤硝化作用强度提高 413.70%,羊草群落却降低了 23.62%,这可能是混合处理对两种植物群落干扰效应不同造成的。刈割、施氮两种处理模式均能对植物群落生态系统带来一系列复杂的影响,其可能为:刈割处理会改变植物群落的物种多样性(图 1),使植物群落的物种组成发生了改变,而不同的植物对养分有不同的利用方式,植物的根系分泌物可影响土壤微生物群落的组分和活性;刈割处理还会改变植物枯落物量,影响枯落物对土壤的覆盖程度、土壤的含水量及枯落物有机质的分解利用等,而施氮处理会显著影响土壤氮含量和 pH 值,从而可能对土壤硝化作用产生影响。

4.1.2 土壤硝化作用强度的影响因素 土壤硝化作用强度的影响因素有很多,对于不同气候区域、不同生态系统乃至不同类型土壤,其硝化作用强度的影响因素往往也会有所不同。丁洪等<sup>[22]</sup>通过研究华北平原不同类型土壤的硝化活性,发现土壤的硝化作用主要与土壤质地和 pH 值有关。郭志英等<sup>[23]</sup>研究发现,我国农田土壤硝化潜势(NP)与 pH 值、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量呈极显著的正相关,与 TN 相关性不明显;而森林土壤 NP 与 pH 值、TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 含量相关不显著。在本研究中,松嫩平原盐碱草甸草原土壤硝化作用强度与土壤 pH 值、电导率、含水量、OP 和  $\text{NO}_3^-$ -N 具有极显著正相关关系( $p<0.01$ )。本研究发现,在植

被退化的过程中,植物群落的多样性表现为先升高后降低的趋势(图 1),这或许是因为随着土壤的盐碱化,羊草群落的优势性降低,黄蒿、星星草、碱蓬等得以获得生存资源,植物群落多样性升高,随着盐碱化程度的进一步加剧,只有碱蓬和一些虎尾草等得以生存,植物群落多样性便随之降低。值得注意的是,当演替至星星草占主导地位的阶段时,土壤硝化作用强度显著升高,且人工施氮会显著降低植物群落多样性,提高星星草群落的优势性,这可能加速了向碱蓬群落的演替过程,同时加速了土壤的盐碱化;土壤 pH 值被认为是影响土壤硝化作用最为关键的因素之一。在盐碱环境内,土壤硝化作用强度与 pH 值呈显著正相关;土壤的 pH 值与电导率呈现极显著相关性,说明土壤可溶性盐分可能是影响 pH 值的直接因素;水分是草甸植物和土壤硝化微生物生长所必需的物质,由于该区域降水偏少等特点,土壤的含水量成为硝化作用的一个限制因素;土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量与硝化作用强度存在极显著的正相关关系(表 2,  $p<0.01$ ),这是因为, $\text{NO}_3^-$ -N 是硝化作用的产物,土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 积累越多,直接反映出土壤硝化作用越强烈,这表明土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量可以作为土壤硝化作用强度的重要表征参数。N、P 元素是组成细胞成分的重要元素,可供植物根系和硝化微生物吸收利用。

关于本研究中土壤无机氮和有效磷含量变化,及其对硝化作用强度的关系进行两方面讨论:(1)这两种元素在土壤中的存在形式可能对盐碱化的敏感程度不同,随着盐碱化程度的加深,植物对土壤 N、P 的利用效率很有可能降低,而流向硝化微生物的部分增多,从而使退化程度较高的植物群落土壤硝化作用更强烈,加上该区域降雨较少,蒸发量较大<sup>[24-26]</sup>,不易被土壤吸附的  $\text{NO}_3^-$ -N 与 OP 便会累积在表层土壤,使表层土  $\text{NO}_3^-$ -N 与 OP 更高;(2)在人工添加无机氮元素的条件下,土壤中 OP 含量也会升高,OP 主要是由土壤中固定的磷转化而来的,因此无机氮也有可能提高土壤固定磷的有效性,进而提高土壤的硝化作用。

### 4.2 结论

未作处理时,星星草群落与碱蓬群落土壤硝化作用强度分别为 13.4,13.5 mg/(kg·h),显著高于羊草群落和退化羊草群落 5.0,2.5 mg/(kg·h),且刈割处理使羊草群落、星星草群落土壤硝化作用强度分别提高 44.75%,96.88%,施氮处理使这两个群落土壤硝化作用强度分别提高 61.69%,253.77%。刈割、施氮两种处理都可显著提高羊草群落、星星草群落土壤硝化作用强度,增加了  $\text{NO}_3^-$ -N 流失的风险,不利于氮素的利用。在盐碱草甸草原土壤硝化作用强度

的影响因子中,土壤有效磷含量、含水量、硝态氮含量、pH值是土壤硝化作用强度的重要影响因子,对硝化作用强度的影响强弱为:pH值>有效磷含量>含水量>硝态氮含量,土壤硝态氮的含量可以作为硝化作用强度的重要表征参数。

星星草群落是草甸草原盐碱化过程中一个重要的植物群落,本研究中发现星星草群落土壤硝化作用强度显著高于其他植物群落,且外界干扰(割草或施氮肥)对星星草土壤硝化作用强度和理化性质影响也很大,由于这种不稳定性,该群落可能是盐碱草甸草原植被退化或恢复过程的一个关键的阶段,对该群落的研究可作为一个研究盐碱草甸草原的一个突破点;同时,星星草的根系分泌物中很可能存在硝化作用的促进剂,无论是在农业生产还是环境保护方面,硝化促进剂都具有一定的潜在价值,对于此种物质的定性和具体应用还需进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] Schimel J P, Bennett J. Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm [J]. *Ecology*, 2004, 85 (3):591-602.
- [2] Norton J, Ouyang Y. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10, DOI:10.3389/fmicb.2019.01931.
- [3] 陈秋霜,俞如旺.漫谈硝化作用[J].*生物学教学*, 2019, 44 (2):77-79.
- [4] Bock E, Wagner M. Oxidation of Inorganic Nitrogen Compounds as An Energy Source [M]. New York: Springer, 2006.
- [5] Martin K, Anne E B, José R T, et al. Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon [J]. *Nature*, 2005, 437(7058):543-546.
- [6] Maartje A H, Daan R S, Mads A, et al. Complete nitrification by a single microorganism [J]. *Nature*, 2015, 528(7583):555-559.
- [7] Holger D, Elena V L, Petra P, et al. Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria [J]. *Nature*, 2015, 528 (7583):504-509.
- [8] Pinto A J, Marcus D N, Ijaz U Z, et al. Metagenomic evidence for the presence of comammox *Nitrospira*-like bacteria in a drinking water system[J]. *Msphere*, 2016, 1(1):1-8.
- [9] 侯雪燕.土壤 pH 对硝化作用和氨氧化微生物群落结构的影响[D].重庆:西南大学, 2014.
- [10] 杨赛,朱琳,魏巍.土壤生态系统硝化微生物研究进展[J].*中国土壤与肥料*, 2018(6):1-10.
- [11] 鲍俊丹,石美,张妹婷,等.中国典型土壤硝化作用与土壤性质的关系[J].*中国农业科学*, 2011, 44(7):1390-1398.
- [12] Li Y Y, Stephen J C, Graeme W N, et al. Nitrification and nitrifiers in acidic soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116:290-301.
- [13] Oenema O, van Liere L, Schoumans O. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 304 (1/4):289-301.
- [14] Randall G W, Vetsch J A, Huffman J R. Nitrate losses in subsurface drainage from a corn-soybean rotation as affected by time of nitrogen application and use of nitrapyrin[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(5):1764-1772.
- [15] Robertson G P, Bruulsema T W, Gehl R J, et al. Nitrogen-climate interactions in US agriculture[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 114:41-70.
- [16] 朱兆良,孙波.中国农业面源污染控制对策研究[J].*环境保护*, 2008(8):4-6.
- [17] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrogen in agriculture: balancing the cost of an essential resource[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2009, 34:97-125.
- [18] 张巍,冯玉杰.松嫩平原盐碱土理化性质与生态恢复[J].*土壤学报*, 2009, 46(1):169-172.
- [19] 孙广友,王海霞.松嫩平原盐碱地大规模开发的前期研究灌区格局与风险控制[J].*资源科学*, 2016, 38(3):407-413.
- [20] 李取生,李秀军,李晓军,等.松嫩平原苏打盐碱地治理与利用[J].*资源科学*, 2003, 25(1):15-20.
- [21] 蔡祖聪,赵维.土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J].*土壤学报*, 2009, 46(5):795-801.
- [22] 丁洪,蔡贵信,王跃思,等.华北平原几种主要类型土壤的硝化及反硝化活性[J].*农业环境科学学报*, 2001, 20 (6):390-393.
- [23] 郭志英,贾仲君.中国典型生态系统土壤硝化强度的整合分析[J].*土壤学报*, 2014, 51(6):1317-1324.
- [24] 刘兴土.松嫩平原退化土地整治与农业发展[M].北京:科学出版社, 2001.
- [25] 杨帆.松嫩平原盐渍化区水盐转化规律与调控机理[M].北京:中国环境出版社, 2014.
- [26] 林年丰,汤洁.松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析[J].*第四纪研究*, 2005, 25(4):474-483.