

# 氮添加对科尔沁人工草地羊草碳氮磷化学计量和土壤特性的影响

王雪丽<sup>1,2</sup>, 齐开源<sup>1</sup>, 王鹏<sup>2</sup>, 王竹天<sup>2</sup>, 周立业<sup>1\*</sup>

(1. 内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028000; 2. 通辽市科尔沁区草原工作站, 内蒙古 通辽 028000)

**摘要:**【目的】探究科尔沁沙地羊草(*Leymus chinensis*)碳氮磷化学计量特征和土壤中酶活性及土壤化学性质对氮素添加的响应。【方法】以科尔沁沙地人工建植的羊草为研究对象, 对不同施氮水平下(施氮量分别为0、50、100、150、200 kg/hm<sup>2</sup>)羊草的化学计量特征和土壤特性进行研究。【结果】随施氮水平的提高, 羊草有机碳、全氮含量呈增加趋势, 全磷含量呈降低趋势; 氮肥添加可有效增加土壤中有机碳、全氮含量, 降低土壤电导率和pH值, 并提高土壤中脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶的活性; 在150 kg/hm<sup>2</sup>施氮水平下土壤酶活性达到最高, 分别为17.78 mg/g、60.21 mg/g、0.62 mg/g。【结论】追施氮肥可提高土壤中酶的活性, 从而促进土壤中营养元素的转化, 有利于羊草对土壤中养分和元素的吸收利用, 综合分析得出科尔沁沙地羊草草地推荐施氮量为200 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 氮肥; 羊草; 土壤酶活性; 化学计量特征; 土壤理化性质

中图分类号: S812.4 文献标志码: A 文章编号: 1009-5500(2024)03-0088-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2024.03.011



禾本科(Gramineae)赖草属(*leymus*)多年生羊草(*Leymus chinensis*)产量高、营养丰富、耐践踏和耐牧性强, 且对气候、土壤条件要求不严, 是我国具有优势的多年生优质乡土牧草<sup>[1]</sup>, 方精云等<sup>[2]</sup>提出, 发展小面积优质高产的人工草地是保护和恢复大面积天然草地的有效途径, 对发展草原畜牧业稳定提供优质牧草具有重要意义。科尔沁区地处中国北方, 属于温带半干旱大陆性气候, 春季秋季风沙较大, 冬季寒冷少雪, 冻害、病虫害和倒伏严重影响着苜蓿、燕麦等高产优质牧草的生产<sup>[3]</sup>, 羊草的生物学特性在科尔沁区明显优于苜蓿、燕麦, 因此种植羊草可有效缓解科尔沁地区饲草产量供应不足及草畜矛盾问题<sup>[4]</sup>。

氮素是植物生命活动必需营养元素, 在植物生长过程中对氮素的消耗是持续的, 需要不断补充以满足植物生长的需要, 缓解因氮素缺失引起的植物产量的增长限制<sup>[5]</sup>。权国玲等<sup>[6]</sup>研究也表明, 羊草对氮素具有较高的吸收率, 氮素添加不仅能够有效提升羊草产量及品质, 还可以改善羊草营养成分及养分吸收, 但过量施用氮肥也会导致氮肥利用率下降, 同时造成环境污染<sup>[7]</sup>。土壤酶是评价土壤生态环境质量与土壤肥力水平的重要生物学指标之一<sup>[8]</sup>。植物吸收土壤中的养分需要不同的土壤酶来促进, 例如水解酶能水解多糖、蛋白质等大分子物质, 从而形成简单的、易被植物吸收的小分子物质<sup>[9]</sup>。有研究发现, 合理施用氮、磷、钾等无机肥可提高土壤中脲酶、磷酸酶等土壤酶活性<sup>[10]</sup>, 增加土壤养分中全氮、全磷等养分含量<sup>[11]</sup>。此外, 王春杰等<sup>[12]</sup>研究表明植物有机碳和全氮含量与土壤有机质、全氮和含水量之间存在显著相关性, 进一步说明植物生长发育与土壤化学性质和土壤中酶活性的变化是相互关联的。

为探究氮素添加对科尔沁沙地人工羊草草地与土壤的影响, 本文对科尔沁沙地人工羊草草地进行不

收稿日期: 2023-05-09; 修回日期: 2023-11-03

基金资助: 内蒙古自治区重点研发和成果转化项目(2022YFDZ0028); 2023内蒙古直属高校基本科研业务费

作者简介: 王雪丽(1999-), 女, 内蒙古通辽市人, 硕士研究生。E-mail: 19847556757@163.com

\*通信作者。E-mail: toni2002@126.com

同氮素水平添加,分析氮添加后羊草碳氮磷化学计量特征及土壤化学性质和土壤酶活性变化,为人工羊草草地合理施用氮肥提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

本试验地设置在内蒙古自治区通辽市内蒙古民族大学科技园区(43°63'67" N, 122°07'23" E)。该地区属温带半干旱大陆性气候,海拔高度177 m,年均降水量为350~400 mm,蒸发量为1 750~2 000 mm,年均气温5~6 °C,  $\geq 10$  °C积温3 000~3 200 °C,无霜期150 d左右,年均风速为3~4.4 m/s。土壤类型是沙土,pH值为8.3,土壤全氮含量0.036%,碱解氮含量35.37 mg/kg,有机质含量0.64%,速效钾含量77.51 mg/kg,速效磷含量3.71 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验地为2015年建植的人工羊草草地,羊草品种为吉农1号。试验采用随机区组设计,参照候文慧等<sup>[13]</sup>的试验并根据土壤的氮素含量设置了0(CK), 100, 200, 300, 400 kg/hm<sup>2</sup>的基肥施氮量,氮肥为尿素(含N率 $\geq 46\%$ ),小区面积为16 m<sup>2</sup>(4 m $\times$ 4 m),3次重复,共15个小区,4周设置保护行,保护行宽度为2 m。

2016—2019年于4月10日(分蘖期)和7月10日(结实期)连续4年采用撒施方式进行人工追施氮肥,追施用氮量均为全年用氮量的一半(50%),即0(CK), 50, 100, 150, 200 kg/hm<sup>2</sup>,分别用N0, N50, N100, N150, N200表示,同时每个处理于2016年返青期一次性施入磷肥(重过磷酸钙,含P率 $\geq 44\%$ ) 200 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(氯化钾,含K率 $\geq 60\%$ ) 200 kg/hm<sup>2</sup>,施肥后立即用喷灌设备进行灌溉。

取样时间分别为2020年4月10日、5月10日、6月10日、7月10日、8月10日,各小区采用5点取样法取土样,取土深度为0~20 cm,按4分法取足量土样装进无菌袋中,放入超低温冰箱中以备测定土壤酶活性(脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶),其余部分过2 mm钢筛后风干研磨、去杂、过筛备用,测定土壤有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)、电导率、pH值等指标。2020年7月1日(羊草的抽穗期),在每个处理中选取长势居中的200株,将其完整取出,装入信封袋,带回实验室,将植

株用清水冲洗干净后,滤纸吸干,置于105 °C烘箱中杀青15 min,再调至65 °C烘干至恒重,然后用植物粉碎机粉碎过0.125 mm筛,最后装入自封袋并标记备用,测定羊草有机碳(C)、全氮(N)、全磷(P)化学计量特征。

### 1.3 指标测定及方法

土壤酶活性:土壤脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法<sup>[14]</sup>测定,以尿素为基质,恒温箱中37 °C下培养24 h,对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>与次氯酸盐和苯酚反应后生成水溶性靛酚蓝的含量进行测定;土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,以磷酸苯二钠为基质,在磷酸酶作用下,恒温箱中37 °C下培养2 h,测定生成苯酚的量;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定。

土壤化学性质及羊草化学计量特征:有机碳测定采用重铬酸钾外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法<sup>[15]</sup>测定;用酸度计和电导率仪测定土壤pH值和电导率。

### 1.4 数据分析

采用Excel 2019和SPSS 26.0进行数据处理、统计分析,所有数据均为所有重复的平均值。运用单因素方差分析比较不同氮肥处理下羊草化学计量和土壤特性的差异,结果与分析利用试验数据的标准差进行分析,显著水平标记 $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 追施氮肥对羊草化学计量特征的影响

随着施氮水平的提高,羊草中N含量、N:P和C:P与对照相比显著增加( $P < 0.05$ ),其中,N含量增加了67.07%,N:P增加了53.40%;C:N随着施氮水平的提高呈逐渐下降趋势,在N200水平下达到最小值(386.94),较对照降低了38.85%;各处理下的P含量均显著低于对照( $P < 0.05$ ),但4个施氮处理下的P含量无显著差异(表1)。

### 2.2 氮肥对土壤特性的影响

2.2.1 氮肥添加对土壤理化性质的影响 N200施氮水平下显著降低了土壤pH值、电导率( $P < 0.05$ ),与对照相比,分别降低了45.26%、8.39%。随施氮水平的提高,土壤C:N呈下降趋势,但不同处理间下降幅度不同,土壤N:P呈上升趋势,N200处理下土壤C:N

表1 不同施氮水平下羊草地上部分有机碳、全氮、全磷含量变化

Table 1 Content changes of organic matter, total nitrogen and total phosphorus in *L. chinensis* under different nitrogen application levels

指标	处理				
	N0	N50	N100	N150	N200
有机碳 C/(g·kg <sup>-1</sup> )	515.63±19.57 <sup>a</sup>	530.22±31.03 <sup>a</sup>	517.08±27.76 <sup>a</sup>	531.55±32.06 <sup>a</sup>	530.88±21.87 <sup>a</sup>
全氮 N/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.82±0.03 <sup>d</sup>	0.96±0.07 <sup>c</sup>	1.00±0.06 <sup>bc</sup>	1.10±0.05 <sup>b</sup>	1.37±0.02 <sup>a</sup>
全磷 P/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.23±0.02 <sup>a</sup>	0.19±0.01 <sup>b</sup>	0.20±0.01 <sup>b</sup>	0.19±0.01 <sup>b</sup>	0.18±0.01 <sup>b</sup>
碳氮比 C:N	632.95±27.07 <sup>a</sup>	556.42±37.92 <sup>b</sup>	514.67±2.66 <sup>b</sup>	485.71±29.57 <sup>b</sup>	387.08±19.70 <sup>c</sup>
氮磷比 N:P	3.49±0.11 <sup>d</sup>	5.12±0.16 <sup>c</sup>	4.94±0.08 <sup>c</sup>	5.92±0.20 <sup>b</sup>	7.49±0.36 <sup>a</sup>
碳磷比 C:P	2 209.35±112.55 <sup>b</sup>	2 846.91±111.99 <sup>a</sup>	2 543.02±32.81 <sup>ab</sup>	2 869.06±78.57 <sup>a</sup>	2 899.28±209.21 <sup>a</sup>

注:同行不同字母表示不同施氮水平羊草化学计量含量间差异显著( $P<0.05$ )。

与 N:P 与对照相比具有显著性差异( $P<0.05$ ), C:P 呈先下降后上升趋势(表2)。

土壤中 C、N 含量随施氮水平的提高有不同程度的增加,其中,在 N200 处理下 N 含量显著高于对照

( $P<0.05$ )。土壤中 C 和 P 含量分别在 N200 处理下和 N50 处理下达到最大值,分别为 6.61 mg/g、0.83 mg/g,但土壤中 C 和 P 含量在不同施氮水平下无显著差异(图1)。

表2 不同施氮水平下土壤 pH、电导率、碳氮比、氮磷比变化

Table 2 Changes of soil pH, electrical conductivity, OC/TN ratio, TN/TP ratio under different nitrogen application levels

指标	处理				
	N0	N50	N100	N150	N200
电导率	92.67±22.95 <sup>a</sup>	83.4±22.05 <sup>ab</sup>	70.86±19.85 <sup>ab</sup>	58.46±20.26 <sup>ab</sup>	50.73±16.39 <sup>b</sup>
pH	8.94±0.39 <sup>a</sup>	8.80±0.38 <sup>ab</sup>	8.57±0.34 <sup>ab</sup>	8.37±0.37 <sup>ab</sup>	8.19±0.34 <sup>b</sup>
碳氮比 C:N	0.98±0.07 <sup>a</sup>	0.92±0.14 <sup>a</sup>	0.91±0.15 <sup>a</sup>	0.89±0.26 <sup>a</sup>	0.84±0.25 <sup>a</sup>
氮磷比 N:P	0.22±0.02 <sup>b</sup>	0.22±0.05 <sup>b</sup>	0.25±0.07 <sup>ab</sup>	0.27±0.05 <sup>ab</sup>	0.32±0.13 <sup>a</sup>
碳磷比 C:P	7.48±0.86 <sup>a</sup>	6.71±1.09 <sup>a</sup>	7.76±1.76 <sup>a</sup>	8.03±2.05 <sup>a</sup>	8.65±1.70 <sup>a</sup>

注:同行不同字母表示不同施氮水平土壤理化性质间差异显著( $P<0.05$ )。

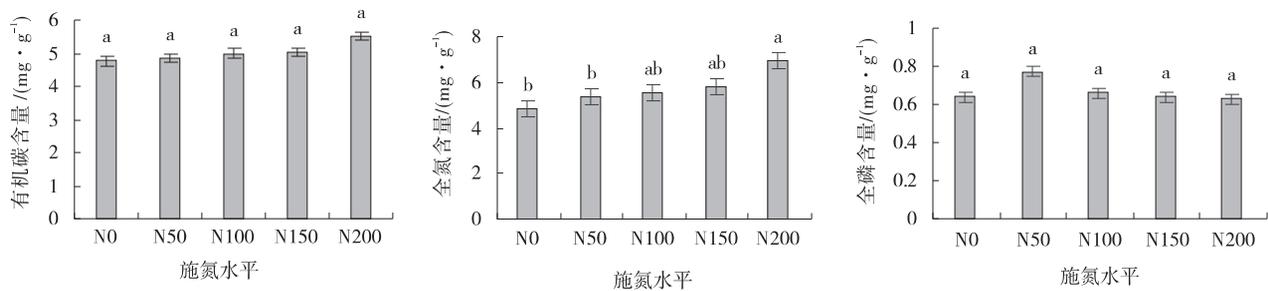


图1 不同施氮水平下土壤有机碳、全氮、全磷含量变化

Fig. 1 Changes of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus contents under different nitrogen application levels

注:不同字母表示不同施氮水平土壤理化性质间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

2.2.2 氮肥添加对土壤酶活性的影响 随施氮水平的提高,人工羊草草地土壤中脲酶活性呈增强趋势,过氧化氢酶活性呈先增强后减弱趋势,但均无显著性差异。脲酶活性在 N200 处理下达到最大值(21.79 mg/g)。随施氮水平提高,土壤蔗糖酶活性呈先增强后减弱趋势,且 N100、N150 处理下显著高于对

照( $P<0.05$ )。磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性均在 N150 处理下达到最大值,分别为 60.21、0.62 和 40.54 mg/g。

### 2.3 羊草化学计量与土壤特性的相关性分析

羊草 N 含量与土壤中 C、N 含量呈极显著正相关关系( $P<0.01$ ),与脲酶活性显著正相关( $P<0.05$ ),

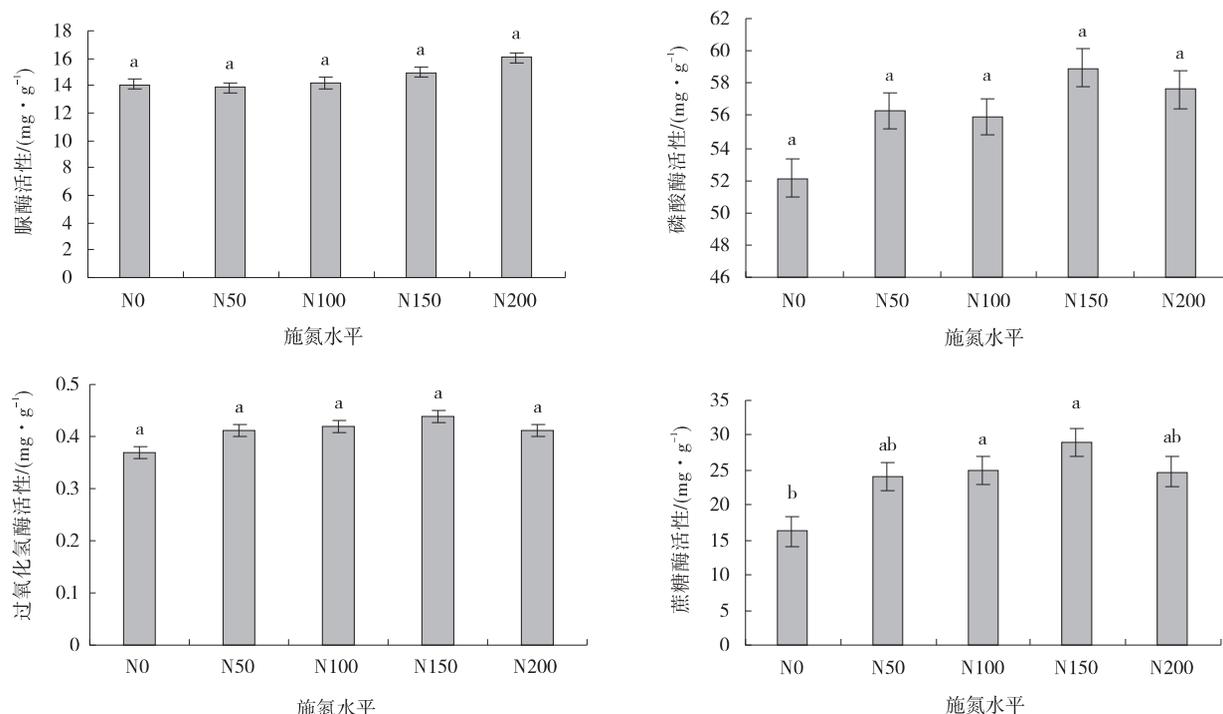


图2 不同施氮水平下土壤酶活性变化

Fig 2 Changes of soil enzyme activities under different nitrogen application levels

注:字母表示不同施氮水平土壤酶活性间差异显著( $P < 0.05$ )。

与电导率、pH值呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );羊草P含量分别与土壤磷酸酶活性、蔗糖酶活性呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );羊草C:N与土壤中C、N含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),与电导率、pH值呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与土壤中脲酶活性呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );羊草N:P与土壤中N含量呈

极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与土壤C含量、电导率和pH分别呈显著负相关关系( $P < 0.05$ )(表3)。土壤中脲酶活性与土壤中C、N含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),与电导率和pH呈显著负相关关系( $P < 0.05$ );土壤中磷酸酶活性与土壤电导率呈显著负相关关系( $P < 0.05$ )(表4)。

表3 植物化学计量与土壤特性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between plant stoichiometry and soil characteristics

指标	有机碳	全氮	全磷	碳氮比C:N	氮磷 N:P
脲酶活性	0.54	0.93*	-0.50	-0.88*	0.87
磷酸酶活性	0.82	0.72	-0.93*	-0.79	0.82
过氧化氢酶活性	0.60	0.49	-0.81	-0.61	0.59
蔗糖酶活性	0.70	0.58	-0.88*	-0.69	0.68
有机碳C	0.54	0.99**	-0.63	-0.97**	-0.95*
全氮N	0.63	0.99**	-0.71	-0.99**	0.98**
全磷P	0.32	-0.22	-0.35	0.21	-0.08
电导率	-0.61	-0.93*	0.74	0.96**	-0.93*
pH值	-0.60	-0.95*	0.72	0.97**	-0.93*

注:表中第一行为植物化学计量指标,第一列为土壤指标;\*和\*\*分别表示显著( $P < 0.05$ )和极显著相关( $P < 0.01$ ),下同。

### 3 讨论

#### 3.1 氮肥添加对羊草化学计量特征的影响

施肥可以通过直接改变土壤养分影响植物N、P含量,而植物体内C、N、P元素间存在一定的相关性,

植物对N和P的利用效率高低可以通过C:N值和C:P值反映<sup>[16]</sup>。本试验研究表明,羊草地上部分C含量随着施氮水平的提高呈增加趋势,P含量随着N素添加量的增大趋于降低,这与对黄土高原典型草原长芒草进行氮素添加试验的结果相似<sup>[17]</sup>。追施氮肥羊草

表4 土壤酶活性与土壤化学性质的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil enzyme activities and soil chemical properties

指标	有机碳	全氮	全磷	电导率	pH值
脲酶活性	0.94**	0.93**	-0.49	-0.87*	-0.89*
磷酸酶活性	0.63	0.70	0.05	-0.85*	-0.82
过氧化氢酶活性	0.39	0.46	0.05	-0.71	-0.67
蔗糖酶活性	0.49	0.56	0.87	-0.76	-0.73

地上部分N含量显著增加,研究结果与林伟山等<sup>[18]</sup>对青藏高寒草甸进行氮、磷添加研究结果一致,表明土壤中氮素可直接影响植物的氮含量。

本试验结果中,羊草地上部分C:N比值随着施氮量的增加显著降低,N:P比值随着施氮量的增加呈逐渐上升的趋势,这与林志玲等<sup>[19]</sup>试验结果相似,当N:P<14时氮素含量成为植被生长的限制因素<sup>[20]</sup>,而本试验中羊草地上部分N:P平均比值在5~10之间,说明氮肥处理增加羊草对N素的吸收,但未达到理想水平,此时科尔沁沙地人工羊草草地生产依旧受氮素制约。本试验植物组织中C:P随施氮量加大逐渐升高,这与前人对锡林郭勒灌丛草原羊草进行氮添加的研究结果不同<sup>[21]</sup>,表明追施氮肥改变了科尔沁沙地土壤中氮、磷的供应状况,随施氮水平的提高,氮素供应较为充足,相反,磷含量较为短缺。

### 3.2 氮肥对土壤特性的影响

3.2.1 氮肥添加对土壤理化性质的影响 土壤有机质是植物营养的主要来源之一,土壤有机质的多寡不仅影响土壤的供肥性能,而且间接影响和改变土壤的物理性状<sup>[22]</sup>。相关研究表明<sup>[23-24]</sup>,长期施肥可显著提高耕层有机质含量,促进有机质积累。土壤全氮含量是衡量土壤氮素供应能力的标准,施氮量的增加可以显著提升土壤氮素含量<sup>[25]</sup>,本试验表明,几个施氮水平下土壤中C、N、P含量均有不同程度的增加,其中N含量的增加较为显著,P含量的变化较为稳定,与前人的研究结果相似<sup>[26]</sup>,说明追施氮肥可增加土壤氮素含量,促进有机质积累,虽然本试验中土壤有机质含量增加幅度不大,但对于土壤化学性质的改善可以起很大促进作用。

土壤电导率能反映土壤生产水平的高低<sup>[27]</sup>。本试验表明,随着施氮量的增加土壤电导率值呈下降趋势,200 kg/hm<sup>2</sup>施氮量处理下与对照相比变化显著,相

关学者研究表明土壤电导率值会由于施氮水平的升高呈升高趋势<sup>[28]</sup>,这是由于氮肥的大量使用,导致土壤中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>积累,土壤电导率值升高,盐分累积土地酸化。而本次试验中随施氮水平提高电导率呈下降趋势,这可能是由于科尔沁沙化土地孔隙较大,通气性好,难以存留水分导致土壤电导率值较低。

不合理添加肥料导致土壤酸化,会对我国作物安全和生态环境造成威胁,土壤pH值的变化是判断土壤是否酸化的评价方法之一<sup>[29]</sup>。有学者研究指出,过量的氮添加是土壤pH值下降的主要原因之一<sup>[30]</sup>。本试验中土壤pH值随着施氮水平的不断增加,呈降低趋势,但还未达到使得土壤酸化得程度,这说明试验施氮量不足以导致土壤酸化,也可能是科尔沁沙化土地不会造成土壤酸化盐碱化。此外,姜莉欣等<sup>[31]</sup>的研究得出,培养基质pH值=8.4时,羊草生产状况相对较好,这与本试验结果基本一致。

3.2.2 氮肥添加对土壤酶活性的影响 土壤的一切生物化学过程,都是在土壤酶的参与下进行<sup>[9]</sup>,土壤酶可大大加速生物化学反应的速度,通过测定土壤中酶的活性可以评估土壤某些营养物质的转化情况、土壤肥力水平及土壤养分氮、磷转化能力<sup>[32]</sup>。张焱华等<sup>[33]</sup>研究中详细介绍了土壤酶活性影响土壤肥力的机理,土壤潜在肥力、酶活性、植物有效养分3者之间关系密切,供应植物养分能力与酶活性有直接关系。叶协峰等<sup>[34]</sup>通过相关分析发现,脲酶、磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶之间均有极显著的相关关系,而土壤酶活性之间的相互关系表明,土壤酶在促进土壤有机物质转化中不仅显示其专性特性,同时也存在共性关系,其相关系数的大小反映不同酶的专性作用或共性作用的大小,因而对土壤理化因子的影响不同。

任静等<sup>[35]</sup>发现施加氮肥能显著提高土壤脲酶和磷酸酶活性,与本试验结果相似。脲酶是存在土壤中

的能催化尿素分解的高度专一性水解酶,其活性是影响尿素分解的最主要因素,本试验结果表明,追施氮肥可增强土壤脲酶活性,这是由于尿素的加入,在一定程度上使脲酶活性激活,从而促进其将尿素分解为 $\text{NH}_3$ 供植物吸收<sup>[9]</sup>。土壤磷酸酶活性的高低直接影响着土壤中有机磷的分解转化及生物有效性,是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标<sup>[36-37]</sup>。本试验发现,随施氮量的增加,土壤中磷酸酶的活性呈增强趋势,这与黄智鸿等<sup>[38]</sup>研究中单施氮肥会导致土壤磷酸酶活性降低的研究结果有所不同,主要有两方面原因,一方面由于氮素添加使土壤中有机碳含量增加,而土壤有机碳既可以作为土壤生物提供碳源,也可以为土壤提供各种矿质营养,因此,土壤有机碳含量高的土壤,土壤微生物多样性和土壤微生物活性都较高,所以土壤磷酸酶的数量和活性也都较高;另一方面,于群英等<sup>[36]</sup>发现土壤磷酸酶活性与土壤全氮含量呈极显著正相关关系,土壤磷酸酶活性主要取决于土壤全氮含量,本试验中氮素的添加使土壤中全氮含量增加,因此,磷酸酶活性也随之增强。但增加趋势不明显,可能是沙化土壤增施氮肥没有显著降低其土壤pH值,没有影响到磷酸酶活性,也可能是由于单施氮肥用量不足。

过氧化氢酶作为土壤中重要的一种氧化还原酶,能将土壤中过氧化氢分解,使作物免遭毒害,对作物的生长有着重要的影响,其活性过高或过低,均不利于作物生长<sup>[39]</sup>。本研究表明,土壤过氧化氢酶活性随着施氮水平的增加呈先增加再降低的趋势,但各施氮水平间无显著性差异,这与前人研究结论一致<sup>[40]</sup>,追施氮肥过氧化氢酶活性增强,其原因可能是施氮会导致土壤腐殖质增多,而过氧化氢酶活性与土壤腐殖质含量呈正相关性<sup>[41]</sup>,同时,增施氮肥使羊草根系生长旺盛,呼吸强度增大,产生大量过氧化氢等有害物质,激发过氧化氢酶活性。

本研究表明增施氮水平后土壤蔗糖酶活性呈先增加后降低趋势,在N150水平下土壤蔗糖酶活性最高,但继续增加施氮量后土壤蔗糖酶活性随之下降,说明适量的氮素水平使羊草吸收氮量充足,转化蛋白质时导致大量糖代谢旺盛,能够刺激蔗糖酶活性增强<sup>[42]</sup>。

### 2.3 羊草化学计量与土壤特性的相关性分析

通过土壤酶、土壤理化性质和羊草化学计量间的相关性分析表明,增施氮肥可提高土壤酶活性,而酶活性的变化可直接影响土壤中C、N的含量及土壤电导率、pH值,同时,土壤中养分含量、电导率、pH值可直接影响羊草中C、N、P含量,三者相互联系关系密切,说明通过增施氮肥增强土壤酶活性进而加快土壤中营养元素转化对羊草生长及元素吸收有促进作用。

## 4 结论

在科尔沁沙化土地建植人工羊草草地受氮素制约,N150水平下土壤酶活性较高,有利于羊草的正常生长发育;N200水平可显著提升土壤有机碳和全氮,维持较高的N:P供羊草生长发育;土壤中可供植物利用的营养元素含量与土壤酶活性高低直接相关,追施氮肥可提高土壤中酶的活性,从而促进土壤中营养元素的转化,有利于羊草对土壤中养分和元素的吸收利用,综合分析土壤特性和羊草化学计量特征,科尔沁沙地羊草草地推荐施氮量为 $200 \text{ kg/hm}^2$ 。

### 参考文献:

- [1] 刘公社,王德利,石凤翎,等. 羊草种质资源研究历程及启示[J]. 中国草地学报,2022,44(4):1-9.
- [2] 方精云,潘庆民,高树琴,等. “以小保大”原理:用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复[J]. 草业科学,2016,33(10):1913-1916.
- [3] 陶雅,徐丽君,李峰等. 我国羊草产业亟待振兴[J]. 草业学报,2023,32(11):188-198.
- [4] 刘明健,张永亮,贾玉山,等. 豆禾混播对草地土壤碳氮磷含量的影响[J]. 中国草地学报,2021,43(8):50-57.
- [5] Leghari S J, Wahocho N A, Laghari G M, *et al.* Role of nitrogen for plant growth and development: A review [J]. *Advances in Environmental Biology*, 2016, 10 (9) : 209-219.
- [6] 权国玲,全宗永,李向林,等. NPK配施对羊草草原产量、土壤肥力及物种多样性的影响[J]. 中国农学通报,2016,32(32):105-110.
- [7] 周伟,吕腾飞,杨志平等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(9):3051-3058.
- [8] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报,2005,25(3):513-519.

- [9] 王理德,王方琳,郭春秀,等. 土壤酶学研究进展[J]. 土壤,2016,48(1):12-21.
- [10] 曾艳,周柳强,黄美福,等. 不同施氮量对桑园红壤耕层酶活性的影响[J]. 生态学报,2014,34(18):5306-5310.
- [11] 王玲,施建军,史慧兰,等. 氮磷添加对环青海湖高寒草原牧草营养成分和土壤养分的影响[J]. 草业科学,2019,36(12):3065-3075.
- [12] 王春杰,朱志梅,张仁慧,等. 陕北榆林地区沙漠化土壤理化性质、土壤酶活性及其与植物C,N的关系[J]. 水土保持通报,2010,30(5):57-62.
- [13] 候文慧,张玉霞,杜晓艳等. 氮素水平对科尔沁沙地羊草叶片氮代谢及产量的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(5):106-112.
- [14] 关松萌. 土壤酶学及其研究方法[M]. 北京:农业出版社,1986.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:78-126.
- [16] 俞月凤,何铁光,曾成城,等. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. 生态学报,2022,42(3):935-946.
- [17] 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.
- [18] 林伟山,德科加,张琳,等. 氮、磷添加对青藏高寒草甸土壤碳氮磷化学计量特征影响的Meta分析[J]. 草地学报,2022,30(12):3345-3354.
- [19] 林志玲,高阳,朱铁霞,等. 施氮量和密度对燕麦叶片C、N、P化学计量特征的影响[J]. 草业科学,2020,37(6):1107-1114.
- [20] Güsewell S. 2004. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*. 164: 1469-1817
- [21] 李丹,图雅,史超逸,等. 氮添加对锡林郭勒灌丛草原羊草(*Leymus chinensis*)化学计量特征的影响[J]. 草地学报,2022,30(3):692-700.
- [22] 张成霞,南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J]. 草业学报,2010,19(4):204-211.
- [23] 欧俊辉,张海. 长期定位施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学,2017,45(15):126-128.
- [24] 林治安,赵秉强,袁亮,等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(8):2809-2819.
- [25] 李楠,龚长虹,刘伟,等. 施肥对草原土壤养分动态变化的影响[J]. 安徽农业科学,2001,29(1):88-89.
- [26] 陈密. 氮源和施氮量对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持应用技术,2020(4):6-8.
- [27] 闫湘,金继运,何萍,等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学,2008,41(2):450-459.
- [28] 吴三鼎,董强,党廷辉. 减量施氮及秸秆深埋对春玉米地土壤电导率和硝态氮淋溶的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(6):46-51.
- [29] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, *et al.* Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 15(2):260-270
- [30] 唐贤,梁丰,徐明岗,等. 长期施用化肥对农田土壤pH影响的整合分析[J]. 吉林农业大学学报,2020,42(3):316-321.
- [31] 姜莉欣,李月芬,黄宇金,等. 盐碱胁迫下羊草生态化学计量特征研究[J]. 世界地质,2019,38(1):302-308.
- [32] 孙亚男,李茜,李以康,等. 氮、磷养分添加对高寒草甸土壤酶活性的影响[J]. 草业学报,2016,25(2):18-26.
- [33] 张焱华,吴敏,何鹏,等. 土壤酶活性与土壤肥力关系的研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(34):11139-11142.
- [34] 叶协锋,杨超,李正,等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):445-454.
- [35] 任静,刘小勇,韩富军,等. 施氮水平对旱塬覆沙苹果园土壤酶活性及果实品质的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(8):206-213.
- [36] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽技术师范学院学报,2001(4):5-8.
- [37] Park S C, Smith T J, Bisesi M S. Activities of phosphomonoesterase from *Lumbricus terrestris* [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1992, 24: 873-876.
- [38] 黄智鸿,赵海超,魏东,等. 不同施肥措施对春玉米农田土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(5):18-24.
- [39] 褚素贞,张乃明,史静. 云南省设施土壤过氧化氢酶活性变化趋势研究[J]. 中国农学通报,2015,31(15):220-225.
- [40] 牛静,甄安忠,葛生珍,等. 不同施氮量对植烟土壤理化特性和酶活性的影响[J]. 西南农业学报,2013,26(4):

- 1561—1566.
- [41] 李生仪,孙延亮,赵俊威,等. 施氮对苜蓿根际土壤微生物数量、酶活性及干草产量的影响[J]. 中国草地学报, 2022,44(4):113—120.
- [42] 曾玲玲,张兴梅,洪音,等. 长期施肥与耕作方式对土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2):27—30+60.

## Effects of nitrogen addition on stoichiometric ratio and soil characteristics of *Leymus chinensis* in Horqin artificial grassland

WANG Xue-li<sup>1,2</sup>, QI Kai-yuan<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, WANG Zhu-tian<sup>2</sup>, ZHOU Li-ye<sup>1\*</sup>  
(1. Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, China; 2. Grassland workstation in Horqin District, Tongliao 028000, China)

**Abstract:**【Objective】 To investigate the stoichiometric characteristics of *Leymus chinensis* in Horqin and the response of soil enzyme activity and soil chemical properties to nitrogen addition. 【Method】 The stoichiometric characteristics and soil characteristics of *L. chinensis* artificially planted in Horqin Sandy land were studied under different nitrogen application levels, 0 kg/hm<sup>2</sup>, 50 kg/hm<sup>2</sup>, 100 kg/hm<sup>2</sup>, 150 kg/hm<sup>2</sup> and 200 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. 【Result】 With the increase of nitrogen application, the contents of organic carbon and total nitrogen increased, while the contents of total phosphorus decreased. The addition of nitrogen fertilizer effectively increased the content of organic carbon and total nitrogen in soil, reduced the soil conductivity and pH. The activities of urease, phosphatase and catalase in soil were improved with the highest soil enzyme activity achieved at 150 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen application level, which were 17.78 mg/g, 60.21 mg/g and 0.62 mg/g, respectively. 【Conclusion】 The application of nitrogen fertilizer can improve the enzyme activities in the soil, thus promotes the transformation of nutrient elements in the soil, and is conducive to the absorption and utilization of nutrients and elements in the soil of *L. chinensis*. Comprehensive analysis suggested that the recommended nitrogen application amount of *L. chinensis* grassland in Horqin Sandy Land is 200 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** nitrogen fertilizer; *leymus chinensis*; soil enzyme activity; stoichiometric characteristics; physical and chemical properties of soil

(责任编辑 康宇坤)