

# 黑土滩草地群落及土壤化学计量特征对重建年限的响应

邢云飞<sup>1,2</sup>, 王晓丽<sup>1,2</sup>, 施建军<sup>1,2\*</sup>, 汪海波<sup>3</sup>, 贾小红<sup>4</sup>, 李思瑶<sup>1,2</sup>

(1. 青海大学, 青海省畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 青海省果洛州草原站, 青海 玛沁 814000; 4. 青海环森工程技术咨询有限公司, 青海 西宁 810007)

**摘要:**研究三江源人工草地植物群落和土壤化学计量特征,有助于评价退化草地修复效果。本试验以黑土滩作为对照,与建植12,19年的人工草地及天然草地的植物群落和土壤化学计量特征进行比较,分析了环境因子对植物群落组成的影响。结果表明:(1)植被重建改变了黑土滩退化草地的群落组成,优良牧草比例增加,人工草地的优势种是垂穗披碱草、矮生嵩草和高山嵩草,黑土滩的优势种是臭蒿、细叶亚菊和黄帚橐吾;植被丰富度、多样性指数和均匀度指数均为天然草地>黑土滩>人工草地。(2)土壤有机碳、全氮和全磷含量变化趋势呈现为天然草地>人工草地>黑土滩,土壤有机碳、全氮和全磷间显著相关( $P<0.05$ ),C:N和C:P两者间显著相关( $P=0.0015$ )。(3)冗余分析表明,土壤pH、土壤含水量、全氮和全磷是影响植物种类分布变异的主要因子,其中土壤pH解释了植物群落组成29%的变异( $P=0.002$ ),土壤含水量解释了植物群落组成21%的变异( $P=0.016$ ),土壤全氮解释了植物群落组成解释19%的变异( $P=0.002$ ),土壤全磷解释了植物群落组成解释13%的变异( $P=0.004$ )。结合植被群落特征和碳氮磷生态化学计量特征,建植19年的人工草地植物群落相对稳定,但还未恢复为天然草地,应加强人工草地的氮素添加和土壤改良。

**关键词:**人工草地;植被特征;生态化学计量学;限制因子

**中图分类号:**S812.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)06-0001-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cycp.2022.06.001



生态化学计量学综合了生物学、化学和物理学等多门学科的基本原理,分析生态系统反应过程中的多种化学元素(主要是碳、氮、磷)的平衡关系,是研究生态过程中化学元素比例关系的一种综合方法<sup>[1-2]</sup>。其中碳(C)是植物必需的生命元素,氮(N)、磷(P)是植物生长必不可少的矿质性营养元素和关键的限制性

养分<sup>[3-4]</sup>,目前生态化学计量学的研究多集中在探究C、N、P元素的比例关系方面<sup>[5]</sup>。土壤是植物生长赖以生存的重要基质和环境条件,土壤C含量取决于进入土壤的动植物残体、腐殖质数量及其腐殖化系数的大小。土壤N含量主要来源于未凋落物的分解、生物固氮作用和随降水进入土壤中的氮<sup>[6]</sup>。无机态氮主要以硝态氮和铵态氮的形式存在,并受土壤母质的影响。有机态氮主要存在于腐殖质,或以蛋白质、氨基酸、核酸、酰氨等形式存在于动植物和微生物等残体中,受凋落物的分解速率以及植物对N的吸收利用率的影响,其空间变异性较大<sup>[7]</sup>。土壤中的P含量则主要来源于岩石的风化和动植物残体的分解<sup>[8]</sup>。土壤中的N、P是植物生长过程中不可替代的化学元素,在陆地生态系统中是决定一个地区物种的丰富程度的重

**收稿日期:**2021-12-02;**修回日期:**2021-12-13

**基金项目:**青海省高端创新人才千人计划资助(2019QHQRJH);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK1002)

**作者简介:**邢云飞(1994-),男,河南扶沟人,博士研究生。

E-mail:874134458@qq.com

\*通信作者。E-mail:shjj0318@sina.com

要因素<sup>[9]</sup>。土壤养分供给、植物养分需求与归还维持着一个动态平衡的元素比值<sup>[10]</sup>。依据生态化学计量学的理论,研究土壤中养分化学元素的含量及其比例关系,对揭示土壤养分的含量与认识土壤碳、氮、磷元素循环和平衡机制具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。

黑土滩退化草地是高寒植被极度退化,生产力下降,植被盖度下降,可食牧草比例下降,表层土壤剥离,形成次生裸地的一种表现形式,已经成为制约三江源区畜牧业发展的主要因素<sup>[13]</sup>。许多学者的研究主要集中在不同退化阶段草地的生物量、生物多样性及群落结构等植被变化特征或土壤中碳、氮、磷、土壤颗粒、土壤含水量等因子单独或少量几个因子结合后的变化特征<sup>[14-18]</sup>,而针对黑土滩退化草地,系统分析不同建植年限植被重建对黑土滩退化草地植被与土壤理化因子间关系的研究较少<sup>[19]</sup>。草地生态系统中的植被与土壤因子密不可分,草地土壤贮存着大量的营养物质,不仅对草地植物的生长起着关键性作用,而且直接影响着草地植物群落的组成,决定着草地生态系统的功能和生产力水平<sup>[20]</sup>。本研究以三江源区不同恢复年限的人工草地为研究对象,应用对比分析和空间代替时间的方法,分析不同建植年限植被重建对黑土滩退化草地植被群落特征、土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征,以期在当地通过合理方式恢复退化草地,改善土壤质量和维护草地健康提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省果洛州玛沁县境内,地理坐标 N 34°27'36", E 100°12'19", 平均海拔 3 700 m, 属青藏高原大陆性半湿润气候类型, 年均降水量 550 mm, 年均气温 -2.5 °C, 极端最高气温 25.3 °C, 极端最低气温 -34.4 °C。牧草生长季为 150 d 左右, 年平均日照时数 2 500 h。研究区天然草地是以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮生嵩草(*K. humilis*)、线叶嵩草(*K. capillifolia*)为优势种, 冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、黑褐穗藁草(*Carex atrofusca*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)为伴生种的高寒草甸。近几十年来, 由于气候变化和人为干扰, 高寒草甸退化成了以铁棒锤(*Aconitum pendulum*)、圆萼刺参(*Morina chinensis*)、

甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、黄帚橐吾(*Ligularia gaurea*)和臭蒿(*Artemisia hedinii*)为主的黑土滩。

### 1.2 试验设计

2000年和2007年在退化后的黑土滩草地上,重新建植以垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和冷地早熟禾为主的多年生人工草地。2018年在以上人工草地中分别随机选取3个100 m×100 m的样地,四周建立围栏,返青期和生长期休牧,每年11月到次年4月放牧使用。黑土滩样地是附近2000年围栏封育的重度退化高寒草甸,天然草地样地是附近山坡未退化的高寒草甸,放牧水平和放牧时间与人工草地一致,无其他管理措施。

### 1.3 材料与方

2018年8月在黑土滩(Black soil land, BSL)、12年人工草地(12-year old artificial grassland, 12AG)、19年人工草地(19-year old artificial grassland, 19AG)和天然草地(Native grassland, NG)上进行试验,每个样地随机设置5个50 cm×50 cm的样方进行植被调查和土壤取样。为避免边缘效应,每个样方之间间隔不得小于5 m。

首先对样方内所有植物进行鉴定,采用针刺法测定每个物种盖度及样方总盖度,用直尺测定每个物种的高度,并记录。之后将样方内的植物分种齐地面剪取并分别装入信封袋,带回实验室60 °C下烘干至恒重,称重并记录。

采用根钻法(根钻直径为7.00 cm)在每个样地的各个样方内取5个30 cm深的土芯,之后合并为一个根样。将根样带回实验室,装入0.45 mm的滤网纱袋中冲洗,分离出植物根系,在80 °C下烘干至恒重,称重。

采用土钻法(土钻直径为3.5 cm)在每个样地的各个样方内0~30 cm取5个土芯,之后合并为一个土样。将土样带回实验室,风干过2 mm的筛子,进行相关指标分析。

土壤容重采用环刀法测定。土壤含水量采用烘干称重法测定。采用PHS-3S酸度计测定1:2.5的土壤-水悬浮液的pH值。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化外加热滴定法测定,土壤全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定(CleverChem Anna全自动间断化学

分析),土壤全磷含量采用钼锑抗比色法(722型可见分光光度计)。

#### 1.4 数据处理与分析

使用以下公式计算重要值(IV)、物种丰富度(R)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、Pielou均匀度指数(E)和根冠比(A:B)

$$IV=(RH+RC+RB)/3;$$

$$R=S;$$

$$H=-\sum_{i=1}^s(P_i \ln P_i);$$

$$P_i=n_i/N;$$

$$E=H/\ln S;$$

$$B:A=BB/AB.$$

式中:RC是相对盖度;RH是相对高度;RB是相对地上生物量。

S是物种的数量; $P_i$ 是*i*物种的相对多度; $n_i$ 是*i*物种的个体数;N是群落的总个体数。

E是群落均匀度指数。

B:A是根冠比;AB是地上生物量;BB是地下生物量。

图表中数据为平均值±标准误差,运用OriginPro 2021和Canoco 5.0对数据进行处理及统计分析。研究中的单因素方差分析、相关性分析、作图等均由OriginPro 2021软件完成。冗余分析(RDA)由Canoco 5.0完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同样地草地的植被特征

在黑土滩退化草地、人工草地和天然草地共鉴定出草地植物40种(表1),其中黑土滩20种,人工草地25种,天然草地31种。黑土滩退化草地重要值居前3位的物种是臭蒿、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)和黄帚橐吾;植被重建12年人工草地重要值居前3位的物种是垂穗披碱草、冷地早熟禾和黄帚橐吾;植被重建19年人工草地重要值居前3位的物种是垂穗披碱草、矮生嵩草和高山嵩草;天然草地重要值前3位的物种是矮生嵩草、高山嵩草和线叶嵩草。4个样地草地植物共有9种:其中禾本科3种,垂穗披碱草、冷地早熟禾和针茅(*Stipa capillata*);莎草科3种,矮生嵩草、高山嵩草和黑褐穗苔草;菊科2种,细叶亚菊和黄帚橐吾;玄参科1种,肉果草(*Lancea tibetica*)。不同样地间植

物物种组成差异较大,黑土滩的优势种主要是毒杂草类植物,人工草地的优势种主要是禾本科类和莎草科类植物,天然草地的优势物种是莎草科类植物。

天然草地和人工草地地上生物量显著高于黑土滩。天然草地地下生物量最高,人工草地和黑土滩地下生物量间差异不显著。根冠比表现为天然草地>黑土滩>人工草地,不同草地类型的根冠比间差异显著,植被重建12年人工草地和植被重建19年人工草地根冠比间差异不显著。不同样地植物物种多样性存在差异,物种丰富度、多样性和均匀度均表现为天然草地>黑土滩>植被重建19年人工草地>植被重建12年人工草地。黑土滩和人工草地物种丰富度和均匀度均显著低于天然草地。

### 2.2 不同样地草地土壤C、N、P含量及其化学计量变化特征

土壤有机碳质量分数为21.81~82.66 g/kg,变化特征为天然草地>植被重建19年人工草地>植被重建12年人工草地>黑土滩,天然草地土壤有机碳质量分数显著高于人工草地和黑土滩。全氮质量分数为2.49~5.27 g/kg,变化特征与有机碳一致。全磷质量分数为0.92~1.71 g/kg,变化特征为天然草地>植被重建12年人工草地>植被重建19年人工草地>黑土滩,人工草地和黑土滩的全磷质量分数间无显著差异。

C:N、C:P、N:P在不同草地土壤中的变化范围分别为8.18~14.19、23.69~42.86、2.78~3.38。其中,C:N和N:P在不同样地间无差异显著;C:P的变化特征为天然草地>植被重建19年人工草地>黑土滩>植被重建12年人工草地,人工草地和黑土滩的全磷质量分数间无显著差异。植被重建12年人工草地C:N:P比例最小,天然草地C:N:P比例最大。

对不同样地土壤碳、氮、磷元素及其计量比进行相关性分析,结果显示,不同样地土壤有机碳、全氮和全磷质量分数三者之间显著相关,C:N和C:P两者之间显著相关。其中,有机碳和全氮质量分数、有机碳和全磷质量分数、全氮和全磷质量分数、C:N和C:P之间呈现良好的线性拟合关系(图1)。

### 2.3 环境因子对植物群落的影响

对环境因子与群落物种重要值进行相关分析,结果表明,禾本科、蔷薇科和玄参科植物重要值与土壤

表1 不同样地草地物种组成及其重要值

Table 1 This species composition and the important values of different sample areas

植物种类	重要值				
	BSL	12a	19a	ND	
禾本科 Gramineae	垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	3.30	13.27	9.21	6.73
	冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	6.04	8.56	6.84	5.12
	针茅 <i>Stipa capillata</i>	2.44	1.22	6.72	4.36
	中华羊茅 <i>Festuca sinensis</i>	—	4.89	6.97	5.22
	洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	—	—	—	0.35
莎草科 Cyperaceae	矮生嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	8.00	4.87	9.05	10.65
	高山嵩草 <i>K. pygmaea</i>	6.19	3.96	7.37	15.38
	黑褐穗嵩草 <i>Carex atrofusca</i>	1.14	5.90	3.57	1.79
	线叶嵩草 <i>K. capillifolia</i>	4.43	—	—	8.45
菊科 Compositae	臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>	8.67	5.46	0.88	—
	细叶亚菊 <i>Ajania tenuifolia</i>	8.33	3.20	3.61	2.43
	矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	5.93	—	—	3.64
	乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i>	6.62	—	—	3.65
	美丽风毛菊 <i>Saussurea pulchra</i>	4.64	—	—	1.19
	冷蒿 <i>A. frigida</i>	1.53	—	—	0.93
	黄帚橐吾 <i>Ligulariavir gaurea</i>	8.24	6.86	2.66	2.77
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	—	4.90	4.12	0.65
	圆萼刺参 <i>Morina chinensis</i>	7.67	—	—	0.36
龙胆科 Gentianaceae	龙胆 <i>Gentiana scabra</i>	—	3.08	2.17	1.88
	秦艽 <i>G. macrophylla</i>	—	4.16	6.05	3.47
	獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i>	—	—	—	0.54
	湿生扁蕾 <i>Gentianopsis paludosa</i>	—	0.89	1.10	1.76
	喉毛花 <i>Comastoma pulmonarium</i>	—	—	2.97	—
蔷薇科 Rosaceae	蕨麻 <i>Potentilla anserina</i>	—	3.34	4.80	2.83
	多裂委陵菜 <i>P. multifida</i>	—	—	—	1.10
	二裂委陵菜 <i>P. bifurca</i>	—	—	—	1.22
	朝天委陵菜 <i>P. supina</i>	—	3.18	4.59	—
毛茛科 Ranunculaceae	金莲花 <i>Trollius chinensis</i>	—	—	—	0.35
	毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i>	—	—	1.93	—
	伏毛铁棒锤 <i>Aconitum flavum</i>	3.51	—	—	2.18
玄参科 Scrophulariaceae	甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i>	—	4.13	2.33	2.10
	肉果草 <i>Lancea tibetica</i>	4.95	5.56	6.69	2.74
其他 Others	车前 <i>Plantago asiatica</i>	—	4.33	—	1.13
	大戟 <i>Euphorbia pekinensis</i>	4.09	—	—	0.56
	长叶微孔草 <i>Microula trichocarpa</i>	—	2.11	1.46	—
	黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	—	6.12	5.42	4.46
	狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>	2.60	—	—	—
	石竹 <i>Dianthus chinensis</i>	—	—	0.26	—
	香薷 <i>Elsholtzia ciliata</i>	—	—	2.13	—
	西伯利亚蓼 <i>Polygonum sibiricum</i>	2.01	—	—	—

注:BSL表示黑土滩;12AG表示建植12年的人工草地;19AG表示建植19年的人工草地;NG表示天然草地,下同

pH值呈负相关,与土壤含水量呈正相关;菊科植物重要值与土壤pH值呈正相关,与土壤含水量呈负相关;莎草科和毛茛科植物重要值也与土壤含水量呈负相关,与土壤容重呈正相关(图2)。

对物种重要值和环境因子进行冗余分析,探讨土

壤理化性质对物种分布特征的影响。RDA分析的轴1解释变量66.4%的方差,轴2解释变量22.9%的方差,表明土壤理化性质对物种分布得到很好的解释(图3)。其中,土壤pH对植物群落组成解释37%的方差( $P=0.002$ ),土壤含水量对植物群落组成解释29%

表 2 不同样地草地植被特征

Table 2 The characteristics of grassland vegetation in different sample areas

项目	BSL	12 a	19 a	ND
地上生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	294.13±31.98 <sup>b</sup>	735.50±61.74 <sup>a</sup>	625.80±74.06 <sup>a</sup>	534.33±43.15 <sup>a</sup>
地下生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	472.67±20.82 <sup>b</sup>	517.12±45.23 <sup>b</sup>	509.62±37.04 <sup>b</sup>	1093.79±80.88 <sup>a</sup>
根冠比	1.62±0.16 <sup>b</sup>	0.71±0.12 <sup>c</sup>	0.82±0.11 <sup>c</sup>	2.02±0.02 <sup>a</sup>
丰富度	20.83±2.23 <sup>b</sup>	16.73±1.53 <sup>b</sup>	19.48±2.60 <sup>b</sup>	28±2.56 <sup>a</sup>
多样性	1.86±0.19 <sup>ab</sup>	1.53±0.06 <sup>b</sup>	1.79±0.09 <sup>ab</sup>	2.39±0.17 <sup>a</sup>
均匀度	0.82±0.05 <sup>b</sup>	0.75±0.04 <sup>b</sup>	0.76±0.05 <sup>b</sup>	0.93±0.08 <sup>a</sup>

注:同行不同的小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同

表 3 不同样地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

Table 3 Soil stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in different sample areas

项目	BSL	12 a	19 a	ND
SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	21.81±2.22 <sup>b</sup>	28.87±3.64 <sup>b</sup>	31.78±2.45 <sup>b</sup>	82.66±12.08 <sup>a</sup>
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.49±0.33 <sup>b</sup>	3.56±0.22 <sup>b</sup>	3.79±0.15 <sup>b</sup>	5.27±0.96 <sup>a</sup>
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.92±0.17 <sup>b</sup>	1.24±0.14 <sup>b</sup>	1.14±0.18 <sup>b</sup>	1.71±0.12 <sup>a</sup>
C:N	8.92±1.97 <sup>a</sup>	8.18±1.55 <sup>a</sup>	8.39±0.32 <sup>a</sup>	14.19±3.72 <sup>a</sup>
C:P	24.01±3.80 <sup>b</sup>	23.69±5.68 <sup>b</sup>	28.41±6.33 <sup>ab</sup>	42.86±9.18 <sup>a</sup>
N:P	2.78±0.76 <sup>a</sup>	2.88±0.22 <sup>a</sup>	3.38±0.65 <sup>a</sup>	3.11±0.70 <sup>a</sup>
C:N:P	24.8:2.8:1	23.6:2.9:1	28.4:3.4:1	44.1:3.1:1

注:TN表示土壤全氮;TOC表示土壤有机碳;TP表示土壤全磷。下同

的方差( $P=0.016$ ),土壤全氮质量分数对植物群落组成解释 21% 的方差( $P=0.002$ ),土壤全磷质量分数对植物群落组成解释 19% 的方差( $P=0.004$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 黑土滩草地群落特征对重建年限的响应

草地植被特征是衡量其生态稳定性的重要指标<sup>[21]</sup>。本研究自黑土滩、人工草地和天然草地共调查发现草地植物 40 种,其中黑土滩退化草地 20 种,优势种为臭蒿,伴生种为细叶亚菊和黄帚橐吾;人工草地 25 种,优势种为垂穗披碱草,伴生种为冷地早熟禾、矮生嵩草、高山嵩草和黄帚橐吾;天然草地 31 种,优势种为矮生嵩草,伴生种为高山嵩草和线叶嵩草。3 种不同类型的草地植物群落组成存在一定的差异,植被重建后的人工草地随着建植年限的增加,植物群落中垂穗披碱草和冷地早熟禾的重要值不断下降,矮生嵩草和高山嵩草等原生植物的重要值增加,这与张耀生<sup>[22]</sup>和武胜男<sup>[23]</sup>的研究结果一致。植物的地上部分和地下部分,既相互协调又相互制约,一起构成统一的有机体。地下部分不仅是植物吸收水分和矿质元素的主要器官,还是植物体内多种激素、有机酸和氨基酸

合成的重要场所,地上部分是植物光合作用的主要场所,为地下部分提供光合产物以确保根系功能的正常运行。植物在无诱导和无胁迫的条件下,其地上生物量与地下生物量等速生长,两者呈正相关<sup>[24]</sup>。本研究发现人工草地的生物量总体表现为地上高,地下低。地上生物量显著高于黑土滩,地下生物量显著低于天然草地,两者都随着建植年限的增加而下降。这主要是因为青藏高原独特的气候条件,低温限制了植物的生长和根的分解,植被重建的人工草地生长年限较短,根的积累量较少。另一方面人工草地群落结构不断发生改变,植物群落结构由生产稳定性向生态稳定性转化,种植的禾草逐渐失去竞争优势,其根系的周转速率下降导致地下生物量降低<sup>[25-26]</sup>。

#### 3.2 黑土滩草地土壤化学计量特征对重建年限的响应

土壤作为陆地生态系统的重要载体,土壤碳、氮和磷与植被之间相互影响,碳、氮和磷是植物正常生长发育的重要生源元素,植物凋落物又是土壤碳、氮和磷的主要来源<sup>[27]</sup>。研究表明,在植被重建恢复的过程中,土壤有机碳和全氮都会随着植物的新陈代谢作用而提高,随着建植年限的增加而增加。这与欧延升

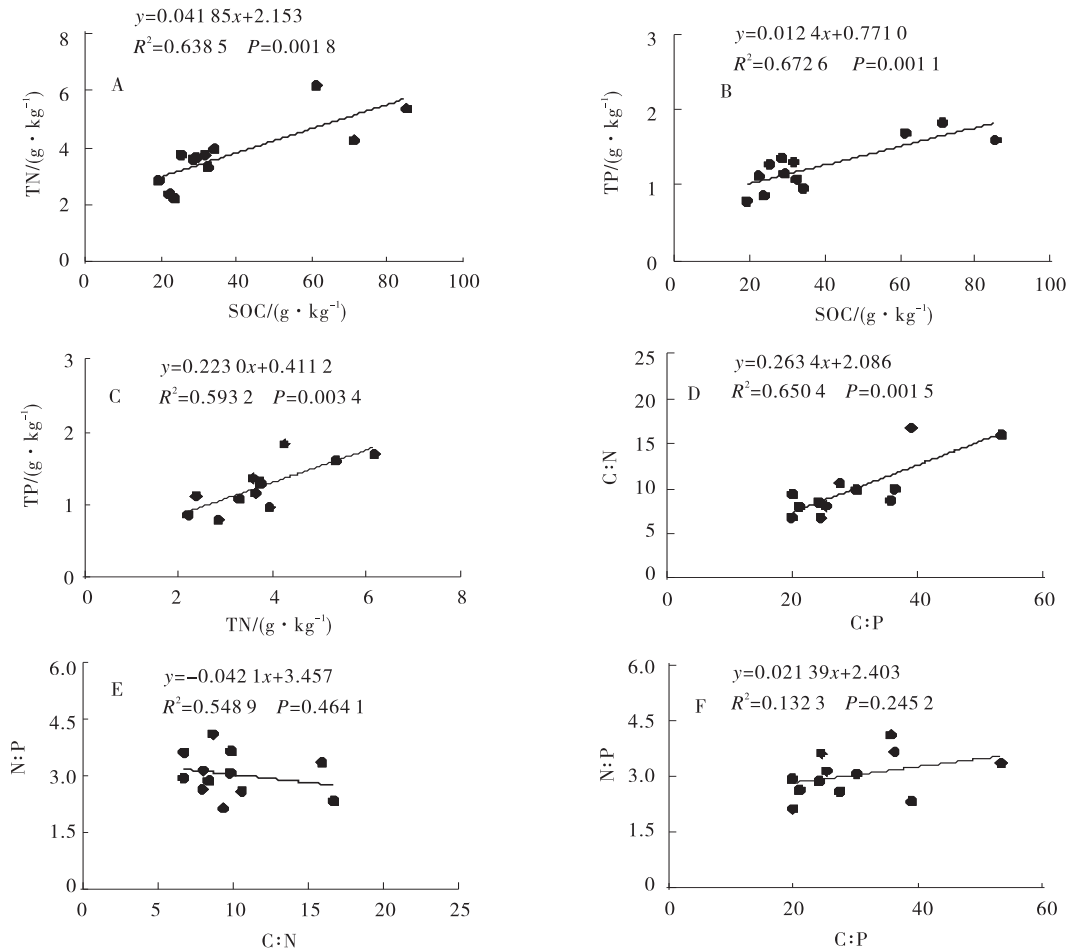


图1 不同样地土壤碳、氮、磷元素及其计量比的相关性

Fig.1 Correlation of carbon, nitrogen, phosphorus and their metrological ratio in different sample areas

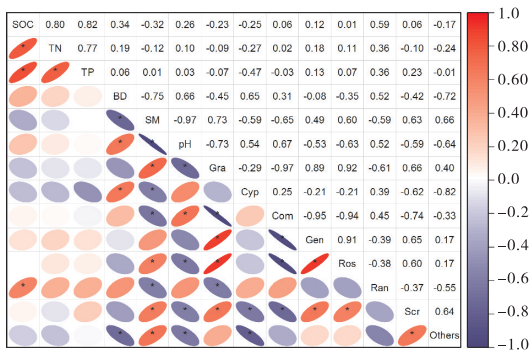


图2 土壤生态化学计量特征及植物群落的相关性矩阵

Fig.2 Soil stoichiometric characteristics and correlation matrix of plant communities

注:Gra表示禾本科;Cyp表示莎草科;Com表示菊科;Gen表示龙胆科;Ros表示蔷薇科;Ran表示毛茛科;Scr表示玄参科;Others表示其他科。\*表示显著相关( $P < 0.05$ )

等<sup>[28]</sup>研究结果一致。土壤中的有机碳主要来源于植物凋落物和地下根系分泌物<sup>[29]</sup>。植被重建使黑土滩退化草地植被生产力得到恢复和提升,植物凋落物和根系分泌物质的量也随之增加,有利于有机碳积累增

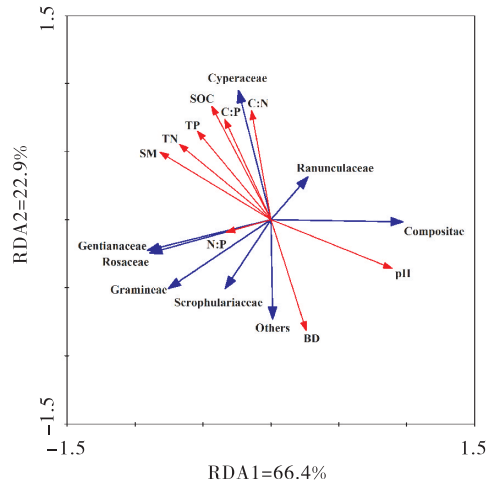


图3 土壤生态化学计量特征及植物群落的RDA分析  
Fig.3 Soil stoichiometric characteristics and RDA analysis of plant communities

长。不同建植年限的人工草地和黑土滩有机碳含量差异不显著,植被重建19年的人工草地土壤有机碳平均含量为31.78 g/kg,显著低于天然草地,还未达到天然草地相对稳定的水平。土壤中的氮素作为植物生长发育必不可少的矿质营养元素,一部分来自于动植

物残体微生物分解后被植物吸收利用,另一部分是生物固氮作用使大气中的氮元素通过氮循环被植物利用<sup>[30]</sup>。植被重建的初期,草本植物生长发育未成熟,需从土壤中消耗部分氮素,黑土滩退化草地土壤全氮含量较低,需要外源添加氮素。随着建植年限的增加,微生物分解动植物凋落物向土壤补充了氮素,使得土壤中全氮含量增加<sup>[31]</sup>。另一方面,植被重建使黑土滩退化草地植物多样性增加,生物固氮作用增强,土壤氮含量增加。凋落物作为植物与土壤之间物质、能量交换的枢纽,是土壤养分归还的有效途径<sup>[32]</sup>。凋落物的归还和岩石的风化作用是土壤中磷元素的主要来源途径,其含量受成土母质、气候、生物等因素影响<sup>[33]</sup>。植被重建能提高黑土滩退化草地土壤磷含量,人工草地土壤磷含量随着建植年限的增加而下降,这可能与青藏高原土层发育较年轻,土壤磷含量较低,人工草地生产力较高,对磷元素矿化作用较高,导致土壤磷含量下降。土壤碳、氮和磷化学计量比是衡量土壤有机质组成和预测有机质分解速率的重要指标<sup>[10]</sup>。土壤C:N是衡量土壤氮素矿化能力的指标,土壤C:N越小,越有利于氮矿化及养分释放,从而进一步促进植被对氮素的吸收<sup>[34-35]</sup>。本研究中,植被重建的人工草地土壤C:N均值为8.24,黑土滩退化草地土壤C:N均值为8.92,低于中国土壤C:N平均水平(10~12)<sup>[36]</sup>。同样地之间的土壤碳、氮含量呈显著正相关,C:N保持相对稳定,这说明两者同时作为结构性成分时紧密相关,且在累积和消耗的过程中维持着相对稳定的比值<sup>[37]</sup>。土壤C:P被认为是指示土壤磷素矿化能力的重要指标,可以衡量土壤有机质矿化释放磷或吸收固持磷的潜力,较高的C:P不利于微生物在有机质分解过程中的养分释放,使土壤中有效磷的含量减少<sup>[38]</sup>。本研究中,天然草地土壤C:P为42.86,黑土滩和人工草地土壤C:P无显著差异,变化为23.69~28.41,低于我国陆地土壤的平均水平(52.70)<sup>[39]</sup>。C:P较低时表明有机质分解时释放的养分较多,磷素矿化减弱,有效磷释放较多。土壤N:P是判断氮、磷限制性作用的重要指标之一,用于确定生态系统养分元素限制的阈值<sup>[40]</sup>。本研究中,土壤N:P的变化为2.78~3.38,低于全国土壤N:P的平均水平(9.36)<sup>[41]</sup>。青藏高原地理位置比较特殊,土壤磷素

含量相对稳定,较低的N:P说明人工草地土壤氮素匮乏,植物生长受氮素的限制。

## 4 结论

黑土滩退化草地在植被重建后,植物群落优势种由杂类草转变成了禾本科类和莎草科类植物,优良牧草比例提高,地上生物量大幅增加,地下生物量无显著变化,根冠比显著小于黑土滩退化草地和天然草地。通过植被重建能使黑土滩退化草地的植物群落发生改变,优良牧草比例增加,是黑土滩退化草地生态恢复的有效措施之一。土壤有机碳、全氮和全磷含量均随建植年限的推移而增加,但与天然草地之间还有一定的差距。氮是该地区限制植物生长发育的主要元素,建议在黑土滩退化草地植被重建的过程中适量的施加肥料以提高土壤中养分含量,确保草地恢复效果。

### 参考文献:

- [1] 贺金生,韩兴国.生态化学计量学:探索从个体到生态系统的统一化理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6.
- [2] 刘岑薇,郑向丽,王俊宏,等.陆生和水域生态系统植物的C、N、P生态化学计量特征研究综述[J].中国农学通报,2017,33(17):70-75.
- [3] ELSER J J, BRACKEN M, CLELAND E E, *et al*, Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecology letters, 2007, 10(12): 35-42.
- [4] 饶丽仙.宁夏典型草原区退耕草地优势植物及土壤C、N、P生态化学计量学特征研究[D].银川:宁夏大学,2017:16-17.
- [5] HEATH R T. Cycling of carbon, nitrogen, sulfur and phosphorus in terrestrial and aquatic ecosystems [J]. Geoderma, 1982, 33(2): 169-169.
- [6] 周涛,蒋壮,耿雷.大气氧化态活性氮循环与稳定同位素过程:问题与展望[J].地球科学进展,2019,34(9):922-935.
- [7] JENKINSON D S, 黎裕.全球氮循环[J].土壤学进展,1992,20(1):27-30.
- [8] 吴桢,吴思枫,刘永,等.湖泊氮磷循环的关键过程与定量识别方法[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(1):218-228.
- [9] 周国逸,闫俊华.鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输

- 人对森林生态系统存在和发育的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(12): 2002—2012.
- [10] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937—3947.
- [11] 刘文亭, 卫智军, 吕世杰, 等. 中国草原生态化学计量学研究进展[J]. 草地学报, 2015, 23(5): 914—926.
- [12] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484—5492.
- [13] 马玉寿. 三江源区“黑土型”退化草地形成机理与恢复模式研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006: 8—8.
- [14] 温璐, 董世魁, 朱磊, 等. 环境因子和干扰强度对高寒草甸植物多样性空间分异的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1844—1854.
- [15] 石红霄, 侯向阳, 师尚礼, 等. 高山嵩草草甸初级生产力、多样性与土壤因子的关系[J]. 草业学报, 2015, 24(10): 40—47.
- [16] 陈淑燕, 张德罡. 不同退化阶段高寒草甸草地土壤钾素的变化分析[J]. 草原与草坪, 2013, 33(3): 74—77.
- [17] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 等. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 254—260.
- [18] 刘淑丽, 林丽, 杜岩功, 等. 青海省高寒草甸不同退化阶段土壤无机碳分异特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1290—1296.
- [19] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 等. 三江源区不同建植年代人工草地群落演替与土壤养分变化[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(6): 737—744.
- [20] BURKART S E, LEÓN R J C, MARÍACC, *et al.* Plant species diversity in remnant grasslands on arable soils in the cropping Pampa [J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(6): 1009—1024.
- [21] 刘思洋, 李雪华, 骆永明, 等. 围封和放牧草地植物多样性对氮添加的响应差异[J]. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3635—3641.
- [22] 张耀生, 赵新全, 黄德清. 青藏高原高寒牧区多年生人工草地持续利用的研究[J]. 草业学报, 2003, 12(3): 22—27.
- [23] 武胜男, 张曦, 高晓霞, 等. 三江源区“黑土滩”型退化草地人工恢复植物群落的演替动态[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 2444—2453.
- [24] 满欣雨, 郭亚蓉, 葛红娟, 等. 植物地下部与地上部远端相互调控研究进展[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 931—942.
- [25] 胡中民, 樊江文, 钟华平, 等. 中国草地地下生物量研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(9): 1095—1101.
- [26] 景馨, 地下净初级生产力及根系动态对不同草地恢复措施的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2018: 62—62.
- [27] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411—2416.
- [28] 欧延升, 汪霞, 李佳, 等. 不同恢复年限人工草地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 38—45.
- [29] 张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 41—47.
- [30] DENGL, SHANGGUAN Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(1): 151—165.
- [31] 林栋, 张德罡. 草地轮作年限和季节对土壤不同组分有机氮含量的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(3): 23—29.
- [32] CROSSW, BENSTEAD J, FROSTP, *et al.* Ecological stoichiometry in freshwater benthic systems: recent progress and perspectives [J]. *Freshwater Biology*, 2005, 50(11): 1895—1912.
- [33] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N、P的化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64—71.
- [34] 王振, 王子煜, 韩清芳, 等. 黄土高原苜蓿草地土壤碳、氮变化特征研究[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1073—1079.
- [35] 张良侠, 樊江文, 张文彦, 等. 京津风沙源治理工程对草地土壤有机碳库的影响——以内蒙古锡林郭勒盟为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 374—380.
- [36] CLEVELANDC, LIPTZIN D, C: N: P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235—252.
- [37] ÅGREN G, Stoichiometry and Nutrition of Plant Growth in Natural Communities [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39(39): 153—170.
- [38] 张萍, 章广琦, 赵一婷, 等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5087—5098.
- [39] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANGC, *et al.* Pattern and variation of C: N: P ratios in China’s soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1—3): 139—151.
- [40] GÜSEWELLS, KOERSELMAN W, VERHOEVEN J,



Biomass N:P ratios as indicators of nutrient limitation for plant populations in wetlands [J]. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 372–384.

latitudinal patterns of plant fine-root nitrogen and phosphorus [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 7362–7366.

[41] YUAN Z Y, CHEN H Y H, REICH P. Global-scale

## Response of community and soil stoichiometric characteristics of black soil land grassland to reconstruction years

XING Yun-fei<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-li<sup>1,2</sup>, SHI Jian-jun<sup>1,2\*</sup>, WANG Hai-bo<sup>3</sup>, WU Jian-li<sup>4</sup>,  
LI Si-yao<sup>1,2</sup>

(1. Qinghai University, Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xining 810016, China;  
2. Ministry of Education Key Laboratory for Alpine Grassland Ecology in the three-river-source region, Xining 810016, China; 3. Glog Tibetan of Qinghai Provincial Grassland Workstation, Maqin 814000, China;  
4. Qinghai Huansen Engineering Technology Consulting Co., Xining 810007, China)

**Abstract:** The study on the plant community and soil stoichiometric characteristics of artificial grassland is helpful for us to evaluate the restoration effect of degraded grassland in the three-river-source region. In this experiment, black soil land was used as control, and the plant community and soil stoichiometric characteristics were compared with native grassland and artificial grassland for 12 and 19 years. The effects of environmental factors on the species composition of the community were also analyzed. The results show that: (1) Vegetation reconstruction changed the community composition of degraded grassland on black soil land, and the proportion of excellent forage increased. The dominant species of artificial grassland were *Elymus nutans*, *Kobresia humilis* and *Kobresia pygmaea*, but the dominant species of black soil land were *Artemisia hedinii*, *Ajania tenuifolia* and *Ligularia virgaurea*. The vegetation richness, diversity index and evenness index displayed a definite trend: native grassland > black soil land > artificial grassland. (2) The trends of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus content was as follows: native grassland > artificial grassland > black soil land. There were significantly correlations among soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus ( $P < 0.05$ ). Likewise, there was a significantly correlation between Soil C:N and C:P ( $P = 0.0015$ ). (3) The results of redundancy analysis (RDA) showed that soil pH, soil moisture, total nitrogen and total phosphorus were the main factors affecting plant species distribution. Soil pH explained 29% ( $P = 0.002$ ), soil water content explained 21% ( $P = 0.016$ ), and soil total nitrogen explained 16% ( $P = 0.002$ ) of the variance of plant community composition. Soil total phosphorus explained 13% of the variance of plant community composition ( $P = 0.004$ ). Combined with the characteristics of vegetation community and ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus, the plant community of artificial grassland established for 19 years was relatively stable, but it was not completely recovered to the state of native grassland. Therefore, the nitrogen addition and soil improvement of artificial grassland should be strengthened in the future.

**Key words:** artificial grassland; vegetation characteristics; stoichiometry; limiting factor