DOI: 10.5846/stxb202104231063
段成伟, 李希来, 柴瑜, 徐文印, 苏乐乐, 马盼盼, 杨鑫光.不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响.生态学报,2022,42(18):7652-7662.
Duan C W, Li X L, Chai Y, Xu W Y, Su L L, Ma P P, Yang X G.Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source.Acta Ecologica Sinica,2022,42(18):7652-7662.

不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响

段成伟[1], 李希来[1,*], 柴 瑜[1], 徐文印[1], 苏乐乐[1], 马盼盼[1], 杨鑫光[2]
1 青海大学农牧学院, 西宁 810016
2 青海民族大学生态环境与资源学院, 西宁 810007

摘要:为了揭示退化高寒草甸逆向转变的驱动因子,通过野外调查和室内分析相结合的方法探究了黄河源不同修复措施(施有机肥 F、免耕补播 N、施有机肥+免耕补播 FN)处理高寒草甸植物群落特征、土壤理化性质和两者相关性的变化规律,阐明不同修复措施对黄河源退化高寒草甸植物群落与土壤养分的影响。结果表明:免耕补播显著增加草甸物种丰富度指数($P<0.05$);施有机肥+免耕补播显著增加草甸植物盖度、总生物量、Shannon Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀度指数($P<0.05$)。不同人工修复后草甸植物功能群地上、地下生物量变化趋势基本一致(除豆科)。和对照相比,莎草科,杂类草地上和地下生物量含量在 N、FN 处理分别降低 83.04%、73.86% 、30.43%、92.37%和 96.51%、84.09%、85.68%、95.36%;禾本科地上和地下生物量含量在 F、N 和 FN 处理分别增加 7.29%、23.45%、17.93% 和 6.04%、4.03%、10.52%;豆科地上生物量含量基本保持不变,地下生物量含量在 F、N 和 FN 处理分别降低 24.43%、82.19% 和 42.61%。F 显著增加土壤有机碳含量($P=0.033$);N 显著降低土壤 NO_3^--N 含量($P=0.009$);FN 显著降低土壤 pH 和增加土壤速效磷含量($P=0.024$);F 和 FN 显著增加土壤含水量($P=0.000$),N 则显著降低土壤含水量($P=0.000$);F 显著降低土壤容重($P=0.018$)。相关性分析表明植物 Shannon Wiener 多样性和 Pielous 均匀度与土壤速效磷含量呈显著正相关($P=0.037$;$P=0.033$),土壤有机碳和含水量与总生物量呈显著正相关($P=0.027$;$P=0.032$),pH 与盖度呈显著负相关($P=0.049$)。冗余度分析结果表明土壤有机碳含量和含水量显著影响了植物群落结构特征,解释率分别为 30.3%和 19.7%。研究结果表明,因地制宜进行退化高寒草甸施有机肥+免耕补播修复措施,能够明显提高草地生产力,改善草甸植物群落及其土壤养分和水分环境。

关键词:高寒草甸;植物群落;土壤养分;施有机肥;免耕补播;恢复措施

Effects of different rehabilitation measures on plant community and soil nutrient of degraded alpine meadow in the Yellow River Source

DUAN Chengwei[1], LI Xilai[1,*], CHAI Yu[1], XU Wenyin[1], SU Lele[1], MA Panpan[1], YANG Xinguang[2]
1 *College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining* 810016, *China*
2 *College of Eco-environment and Resources, Qinghai Nationalities University, Xining* 810007, *China*

Abstract: In this study, the dynamic changes of plant community characteristics, soil physicochemical properties and their correlations in severely degraded alpine meadow by different restoration measures (fertilization i.e. F, no-tillage reseeding i.e. N, fertilization+no-tillage reseeding i.e. FN) in the Yellow River source, China were investigated by field investigation and laboratory studies. The aims were to elucidate the driving factors of the reverse transformation of the degraded alpine

基金项目:青海省科技厅项目(2020-ZJ-904);国家自然科学基金项目(U21A20191);高等学校学科创新引智计划(D18013);青海省科技创新创业团队项目“三江源生态演变与管理创新团队”
收稿日期:2021-04-23; **采用日期**:2022-04-03

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xilai-li@163.com

meadow. Results showed that the rehabilitation measure of no-tillage reseeding (N) significantly increased the richness index of the meadow ($P<0.05$), while fertilization+no-tillage reseeding (FN) significantly increased the coverage, total biomass, Shannon Wiener diversity index and Pielous evenness index of the alpine meadow ($P<0.05$). The change trend of aboveground and underground biomass of plant functional groups was the same after different artificial restorations (except Leguminosae). Compared with control treatment, the aboveground and underground biomasses of Cyperaceae and weeds under no-tillage reseeding (N) and fertilization+no-tillage reseeding (FN) decreased by 83.04%, 73.86%, 96.51%, 84.09% and 30.43%, 92.37%, 85.68%, 95.36%, respectively. The aboveground and underground biomasses of Gramineae under fertilization (F), no-tillage reseeding (N) and fertilization+no-tillage reseeding (FN) increased by 7.29%, 23.45%, 17.93%, and 6.04%, 4.03%, 10.52%, respectively. The aboveground biomass of Leguminosae remained basically unchanged, and the belowground biomass under fertilization (F), no-tillage reseeding (N) and fertilization+no-tillage reseeding (FN) decreased by 24.43%, 82.19% and 42.61%, respectively. Fertilization (F) significantly increased soil organic carbon content ($P=0.033$); No-tillage reseeding (N) significantly decreased soil nitrate nitrogen content ($P=0.009$); Fertilization+no-tillage reseeding (FN) significantly affected soil pH and available phosphorus content ($P=0.024$); Fertilization (F) and fertilization+no-tillage reseeding (FN) reseeded significantly increased soil water content ($P=0.000$), while no-tillage reseeding (N) significantly decreased soil water content ($P=0.000$); Fertilization (F) significantly inhibited soil bulk density ($P=0.018$). Correlation analysis showed that plant Shannon Wiener diversity index and Pielous evenness index were significantly positively correlated with soil available phosphorus content ($P=0.037$; $P=0.033$). Soil organic carbon and water content were significantly positively correlated with plant total biomass ($P=0.027$; $P=0.032$), and soil pH was significantly negatively correlated with plant coverage ($P=0.049$). Redundancy analysis showed that soil organic carbon content and water content were the most significant factors affecting vegetation characteristics, the interpretation rates were 30.3% and 19.7%, respectively. In conclusion, fertilization+no-tillage reseeding (FN) could significantly improve grassland productivity, plant community, soil nutrient and water environment of the severely degraded alpine meadow in the Yellow River source, China.

Key Words: alpine meadow; plant community; soil nutrient; fertilization; no-tillage reseeding; rehabilitation measures

高寒草甸是我国面积最大、分布最广的典型高寒生态系统[1]。近年来,随着气候变化和人类活动干扰引起的高寒草甸生态系统退化,进而影响到牧民的生存和畜牧业的发展。翻耕建植人工草地、施肥、免耕补播、围栏封育、休牧、啮齿动物防控等措施可以恢复三江源区不同退化程度草地[2—6]。大量研究表明,氮肥补给养分对退化高寒草地植被恢复具有促进作用[7—9]。党永智等[10]研究发现连续两年施用有机肥对于提高牧草生物量的效果明显好于单年。还有研究表明,施有机肥和氮磷钾肥、补播禾本科植物等均可明显增加草地盖度和生物量,是加速退化高寒草甸恢复重建的重要措施[11]。土壤养分和水分是制约植物生长的主要因素[12]。有很多研究表明,草甸在恢复过程中植被特征和土壤性质存在一定的相关性。罗琰等[13]对草甸植被群落特征及其与土壤因子关系的研究表明,土壤养分含量及变化对草甸植被群落特征具有一定影响。植被恢复过程中土壤养分含量有所提高,而土壤养分的改善又会促进植被的恢复[14]。植被与土壤有直接的密切关系,尤其是在植被演替和土壤变化的过程中,二者相互影响。因此,研究不同修复措施下退化高寒草甸植物群落组成、土壤养分变化及二者相互关系尤为重要。

天然草地人为施加有机肥和免耕补播是简单易行、投资少、见效快的草地改良措施,能快速并明显增加植被种类、草地覆盖度和提高牧草产量及品质[15]。目前,对于退化高寒草甸恢复与改良相关研究主要体现在各种化学肥料和补播牧草等改良措施对地上植物生长特征和土壤化学性质方面[16—17],但有机肥和免耕补播对植被和土壤养分的影响研究较少且尚没有普适性结论[18]。为此,本研究选取黄河源区典型重度退化高寒草甸,通过人为输入土壤养分和免耕补播改良技术,利用 Pearson 相关和冗余分析(RDA)等进行综合分析,旨在

研究:(1)不同恢复措施处理后高寒草甸植物群落和土壤环境的相关性;(2)不同恢复措施处理后高寒草甸植物群落的演替特征及其驱动因子。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省河南县多松乡黄河二级流域永曲河流域退化高寒草甸阳坡缓坡坡地,地理坐标:34°18′43.30″—34°19′59.54″ N,101°22′24.98″—101°28′19.26″ E,海拔 3418—3567 m,样地坡向南偏东 15°—18°,坡度为 3°—5°,整个地势呈东高西低。属高原大陆性气候,全年四季变化不明显,常年多为大风天气。年均温为 0.5℃,最冷月均温为-10.0℃,最热月均温为 9.4℃。年降水量 597.0—615.5 mm,年均蒸发量 1350 mm。年日照时数 2551—2577 h,日照率 60%。研究区高寒草甸已发生重度退化,高原鼠兔活动频繁,植被盖度<20%,裸露秃斑面积>60%,属于重度退化草地[19—20]。土壤为山地草甸土,土壤有机质含量 81.99 g/kg,全氮 4.3 g/kg,全磷 0.74 g/kg,NO_3^--N 26.74 mg/kg,NH_4^+-N 4.97 mg/kg,速效磷 6.75 mg/kg,pH 值为 7.85,草地类型为高寒草甸。原生植被均以莎草科的矮生嵩草(*Kobresia humilis*)和青藏苔草(*Carex moorcroftii*)、禾本科的垂穗披碱草(*Elymus nutans*),中华羊茅(*Festuca sinensis*)和冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、豆科的黄花棘豆(*Oxytropis ochrocephala*)等为优势种,蔷薇科的鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)为常见种,并伴有其他杂草的典型高寒草甸。

1.2 样地设置

研究区选择发生重度退化、退化程度相对一致、质地均一、地势较为平坦的阳坡缓坡高寒草甸。试验地基本概况见表 1。在灭鼠的基础上采用免耕补播、施有机肥和围栏封育的技术措施开展退化草地修复治理工作。试验区自 2020 年 6 月起围栏封育,防止放牧家畜以及其他大型草食动物的干扰。2020 年 6 月初在试验区选取地形、土壤和植被一致的草地,在追施种肥的基础上分别进行设置施有机肥(F)、免耕补播(N)及施有机肥+免耕补播(FN)等修复措施,同时选取面积相同且只经过种肥处理的草地作为对照(Ck),每个样地处理面积为 33333.5 m^2(182.57 m×182.57 m)。种肥施肥方式为人工撒施,有机肥施肥方式为免耕补播机机械施肥,补播方式为机械免耕补播,施有机肥+免耕补播处理为将有机肥和补播牧草草种按比例混合后用免耕补播机一次性补播,补播后不再进行后续改良措施。免耕补播机型号为:GB/T 25421。

表 1 试验地基本概况

Table 1 Basic information in study areas

处理 Treatment	编号 Number	经纬度 Latitude and longitude	海拔/m Altitude	地势地貌 Topography	坡向 Slope aspect	坡度 Slope gradient
对照 Control	Ck	34°18′43.30″N 101°22′24.98″E	3418	滩地	南偏东 18°	3°—5°
施有机肥 Fertilization	F	34°18′51.28″N 101°24′47.19″E	3529	滩地	南偏东 15°	3°—5°
免耕补播 No-tillage reseeding	N	34°18′46.20″N 101°24′49.00″E	3528	滩地	南偏东 15°	3°—5°
施有机肥+免耕补播 Fertilization+no-tillage reseeding	FN	34°19′59.54″N 101°28′19.26″E	3567	滩地	南偏东 17°	3°—5°

种肥种类为尿素(总氮≥46.0%,执行标准:GB 2440—2001):0.2 kg/hm^2,磷酸二铵(总养分($N+P_2O_5$)≥64%,执行标准:GB 10205—2009):0.4 kg/hm^2。施肥种类为有机肥(有机质≥45%,有机碳含量为 261.02 g/kg,水份≤30%,总养分($N+P_2O_5+K_2O$)≥5.0%,N+P+K 含量为 50 g/kg,执行标准:NY525—2012):900 kg/hm^2;免耕补播处理为草地牧草混播,草种为垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)及冷地早熟禾(*Poa crymophila*)三种当地优势草种,垂穗披碱草:15 kg/hm^2,中华羊茅:7.5 kg/hm^2,冷地早熟禾:7.5 kg/hm^2,混播比例为 2:1:1。种子均由当地草籽繁殖场生产,种肥购于云南云天化股份有限公司,有机肥购于

睿泽科技有限公司。

1.3　样品采集

2020 年 8 月中旬在上述 4 块样地植物生长旺盛期进行取样。在每个样地内间隔 10 m 设置 4 条长 50 m 的样线,分别在每条样线的 0 m、10 m、20 m、30 m、40 m 处设置 50 cm×50 cm 的样方,进行植被调查并采集植物和土壤样品。植被调查时,记录样方内植物物种的种类、密度、高度、分盖度和总盖度。植被调查结束后,将地上植被按物种齐平地面刈割,分装进信封;地下生物量采用内径 5 cm 土钻采集 0—20 cm 土层土壤样品,然后将地下生物量清洗后装入信封袋,地上和地下生物量带回实验室 60℃、48 h 烘干至恒重,并称质量[21]。用环刀在 0—20 cm 土层垂直剖面水平方向采集土壤样品进行土壤容重测定。利用土钻法[22]采集 0—20 cm 土层土壤样品,每个样方用内径 5 cm 的土钻钻取 5 钻土样,然后每条样线 25 钻土样混合为 1 个土壤样品,每个样地 4 个重复,做好标记,放入有冰袋的采集箱中运回实验室。其中一部分样品过 1 mm 筛后保存于 4 ℃保温箱用于测定土壤 pH、NH_4^+-N、NO_3^--N 和含水量,另一部分置于阴凉通风处风干后过 0.149 mm 筛用于测定土壤有机碳含量和速效磷含量。

1.4　测定项目与方法

根据植被调查数据,计算重要值和群落结构特征指数。群落多样性指数(Shannon-Wiener 指数,H';Simpson 指数,D)、丰富度指数(Patrick 指数,$Pa=S$)、均匀度指数(Pielous 指数,J')公式[21]:

相对重要值:
$$P_i=\frac{n_i/N+c_i/C+h_i/H}{3}\times 100\%;$$

Shannon-Wiener 多样性指数:
$$H'=-\sum_{i=1}^{S}P_i\ln P_i;$$

Simpson 多样性指数:
$$D=1-\sum_{i=1}^{S}P_i^2;$$

Pielous 均匀度指数:
$$J'=H'/\ln S;$$

Patrick 丰富度指数:
$$Pa=S。$$

式中,P_i为第 i 种植物的重要值;n_i为第 i 种植物个体数;c_i为第 i 种植物盖度;h_i为第 i 种植物高度;N 为样方内总个体数;C 为样方总盖度;H 为样方内植物高度; H'为多样性指数;J'为均匀度指数;S 为样地物种数;D 为生态优势度指数。

土壤理化性质测定[23]:土壤 pH:电位法(土水比 1:2.5);土壤有机碳:重铬酸钾—H_2SO_4氧化外加热法;土壤 NO_3^--N:双波长紫外分光光度法;土壤 NH_4^+-N:KCl 浸提—靛酚蓝比色法;土壤速效磷:$NaHCO_3$浸提—钼锑抗比色法;土壤含水量:烘干法;土壤容重:环刀。

1.5　数据分析

使用 Excel 2010 软件整理数据,运用 OriginPro 2021(OriginLab,北安普顿,马萨诸塞州,美国)进行绘图和相关性分析。采用 SPSS 26.0(IBM 公司,纽约州,美国)进行单因素方差分析(ANOVA),再进行 Duncan 差异显著性检验($P<0.05$)。采用 Canoco 5 统计软件对土壤性质和植被特征进行 RDA(Redundancy analysis)分析。

2　结果与分析

2.1　不同恢复措施下高寒草甸植物群落特征

与对照相比,免耕补播处理后草甸丰富度指数显著增加 32.33%($F=4.439$,$P=0.016$)。施有机肥+免耕补播处理后草甸 Shannon Wiener 多样性指数显著高于施有机肥处理 41.57%($F=3.535$,$P=0.035$)。施有机肥+免耕补播处理后草甸 Pielous 均匀度指数分别显著高于施有机肥和免耕补播处理 27.50%和 25.93%($F=4.523$,$P=0.015$),但后者之间差异不显著(表 2,表 3)。

与对照相比,免耕补播和施有机肥+免耕补播处理后草甸植物盖度显著增加 20.21%和 21.74%($F=9.450$,$P=0.001$),草甸植物盖度分别在施有机肥+免耕补播处理和对照处理达最高和最低。施有机肥+免耕

补播处理后草甸总生物量显著增加 53.09%($F=4.087$,$P=0.028$),草甸总生物量分别在施有机肥+免耕补播处理和对照处理达最高和最低(表 2,表 3)。

表 2 人工修复后退化高寒草甸植被群落特征

Table 2 Vegetation community characteristics of degraded alpine meadow after artificial restoration

处理 Treatment	Shannon Wiener 指数 Shannon Wiener's index	Pielous 指数 Pielou's index	Patrick 指数 Patrick index	Simpson 指数 Simpson index	盖度 Coverage/%	总生物量 Total biomass/(g/m^2)
Ck	2.08±0.13ab	0.90±0.03ab	10.33±2.07b	0.85±0.02a	80.83±9.94b	605.81±20.55b
F	1.78±0.08b	0.80±0.05b	9.33±1.37b	0.77±0.03a	83.50±7.09b	807.90±18.20ab
N	2.09±0.20ab	0.81±0.04b	13.67±2.34a	0.83±0.04a	97.17±4.02a	615.72±15.56b
FN	2.52±0.77a	1.02±0.23a	11.80±2.86ab	0.77±0.16a	98.40±2.07a	927.49±14.22a

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

表 3 人工修复后退化高寒草甸植被群落特征 *P* 值和 *F* 值

Table 3 *P* and *F* values of vegetation community characteristics of degraded alpine meadow after artificial restoration

指标 Index	*P*	*F*	指标 Index	*P*	*F*
Shannon Wiener 指数 Shannon Wiener's index	0.035	3.535	Simpson 指数 Simpson index	0.204	1.687
Pielous 指数 Pielou's index	0.015	4.523	盖度 Coverage	0.001	9.450
Patrick 指数 Patrick index	0.016	4.439	总生物量 Total biomass	0.028	4.087

2.2 不同恢复措施下植物功能群生物量的变化

不同人工修复后草甸植物功能群地上、地下生物量变化趋势基本一致(除豆科)。与对照相比,莎草科地上和地下生物量在免耕补播、施有机肥+免耕补播处理分别降低 83.04%、73.86%和 96.51%、84.09%($F=272.911$,$P=0.000$;$F=909.486$,$P=0.000$),莎草科地上和地下生物量在施有机肥处理分别增加 24.81%和 5.98%($F=272.911$,$P=0.000$;$F=909.486$,$P=0.000$);杂类草地上和地下生物量在施有机肥、免耕补播和施有机肥+免耕补播处理分别降低 84.43%、30.43%、92.37% 和 86.77%、85.68%、95.36%($F=454.805$,$P=0.000$;$F=5062.306$,$P=0.000$);禾本科地上和地下生物量在施有机肥、免耕补播和施有机肥+免耕补播处理分别增加 7.29%、23.45%、17.93% 和 6.04%、4.03%、10.52%($F=545.803$,$P=0.000$;$F=441.999$,$P=0.000$);豆科地上生物量基本保持不变($F=1.187$,$P=0.340$),地下生物量在施有机肥、免耕补播和施有机肥+免耕补播处理分别降低 24.43%、82.19% 和 42.61%($F=84.859$,$P=0.000$)。与对照相比,施有机肥、免耕补播和施有机肥+免耕补播处理后禾本科、莎草科和杂类草生物量差异均显著($P=0.000$);豆科地上生物量差异均不显著,地下生物量差异均显著($P=0.000$)(图 1,图 2)。

2.3 不同恢复措施下高寒草甸土壤养分的变化

与对照相比,施有机肥处理后土壤有机碳含量显著增加 52.82%($F=3.837$,$P=0.033$),且其含量高于免耕补播和施有机肥+免耕补播。免耕补播对 NO_3^--N 呈抑制作用,其中免耕补播处理下 NO_3^--N 含量显著降低 44.80%($F=6.210$,$P=0.009$),且其含量低于施有机肥和施有机肥+免耕补播。施有机肥+免耕补播处理后速效磷含量显著增加 30.37%($F=4.560$,$P=0.024$)。施有机肥和免耕补播对土壤 pH 没有显著影响,施有机肥+免耕补播处理后土壤 pH 显著降低 8.03%($F=11.475$,$P=0.001$),土壤更趋于中性。施有机肥、免耕补播和施有机肥+免耕补播均显著影响土壤含水量($F=56.070$,$P=0.000$),施有机肥和施有机肥+免耕补播分别显著增加土壤含水量 13.07%和 23.13%($F=56.070$,$P=0.000$),免耕补播则显著降低土壤含水量 23.66%($F=56.070$,$P=0.000$)。施有机肥处理后土壤容重显著降低 16.53%($F=4.989$,$P=0.018$)(表 4,表 5)。

2.4 不同恢复措施下高寒草甸植被特征与土壤理化性质相关性分析

不同人工恢复措施处理后土壤理化指标与草甸植被特征间具有一定的关系。为进一步明确环境因子对群落物种多样性、盖度及总生物量特征指标影响程度大小,通过相关分析法对群落物种多样性、盖度及总生物量与其土壤环境因子的关系进行了相关性分析。结果表明,植物 Shannon Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀

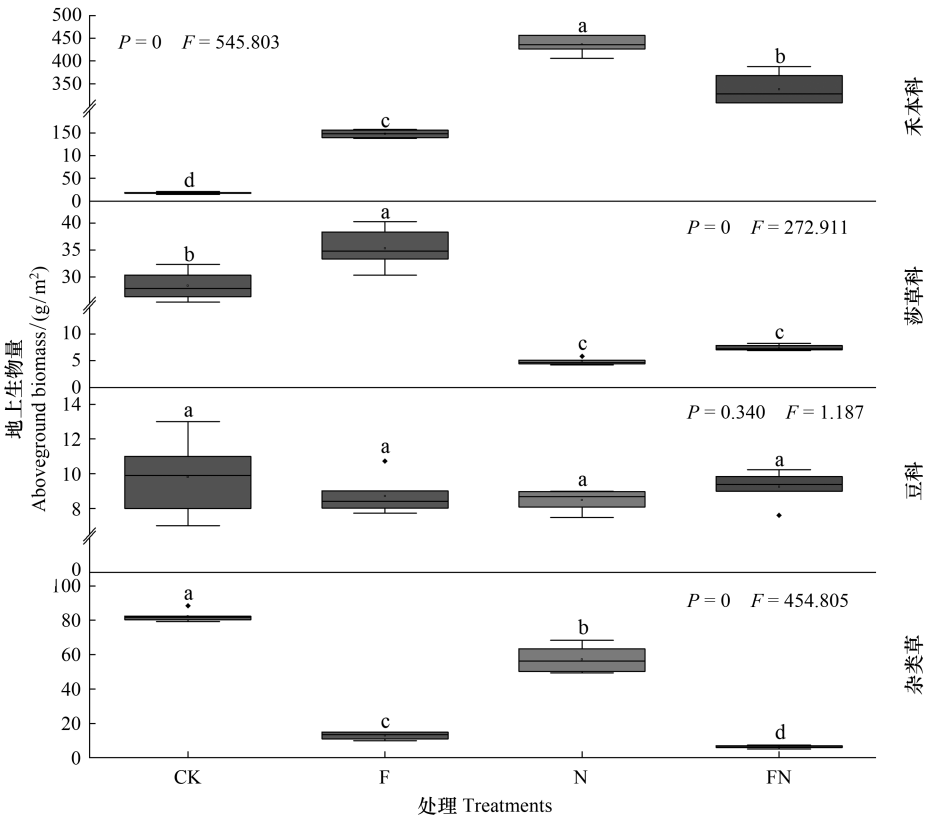


图 1　人工修复后退化高寒草甸植物功能群地上生物量组成

Fig.1　Composition of aboveground biomass of plant functional groups in degraded alpine meadow after artificial restoration

不同小写字母表示差异显著(P<0.05);Ck:对照 Control;F:施有机肥 Fertilization;N:免耕补播 No-tillage reseeding;FN:施有机肥+免耕补播 Fertilization+ no-tillage reseeding

度指数与土壤速效磷含量呈显著正相关(P=0.037)(P=0.033),有机碳和土壤含水量与总生物量呈显著正相关(P=0.027)(P=0.032),pH 与盖度呈显著负相关(P=0.049)(图 3)。

表 4　人工修复后退化高寒草甸土壤理化性质

Table 4　Soil physical and chemical properties of degraded alpine meadow after artificial restoration

处理 Treatment	pH	有机碳 Organic carbon/(g/kg)	NO_3^--N/(mg/kg)	NH_4^+-N/(mg/kg)	速效磷 Available P/(mg/kg)	土壤含水量 Soil water content/%	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm³)
Ck	7.85±0.04a	42.56±10.44b	26.74±2.69a	4.97±1.00a	6.75±0.33b	28.15±0.02c	1.21±0.04a
F	7.80±0.06a	65.04±10.12a	21.34±3.32a	6.74±0.17a	7.35±0.56ab	31.83±0.01b	1.01±0.15b
N	7.86±0.05a	47.18±6.17ab	14.76±1.91b	5.82±1.33a	6.27±0.72b	21.49±0.01d	1.23±0.03a
FN	7.22±0.34b	63.70±12.92ab	23.73±6.69a	5.79±0.86a	8.80±0.32a	34.66±0.02a	1.08±0.11ab

不同小写字母表示差异显著(P<0.05)

表 5　人工修复后退化高寒草甸土壤理化性质 *P* 值和 *F* 值

Table 5　*P* and *F* values of soil physical and chemical properties of degraded alpine meadow after artificial restoration

指标 Index	*P*	*F*	指标 Index	*P*	*F*
pH	0.001	11.475	速效磷 Available P	0.024	4.560
有机碳 Organic carbon	0.033	3.837	土壤含水量 Soil water content	0.000	56.070
NO_3^--N	0.009	6.210	土壤容重 Soil bulk density	0.018	4.989
NH_4^+-N	0.261	1.514			

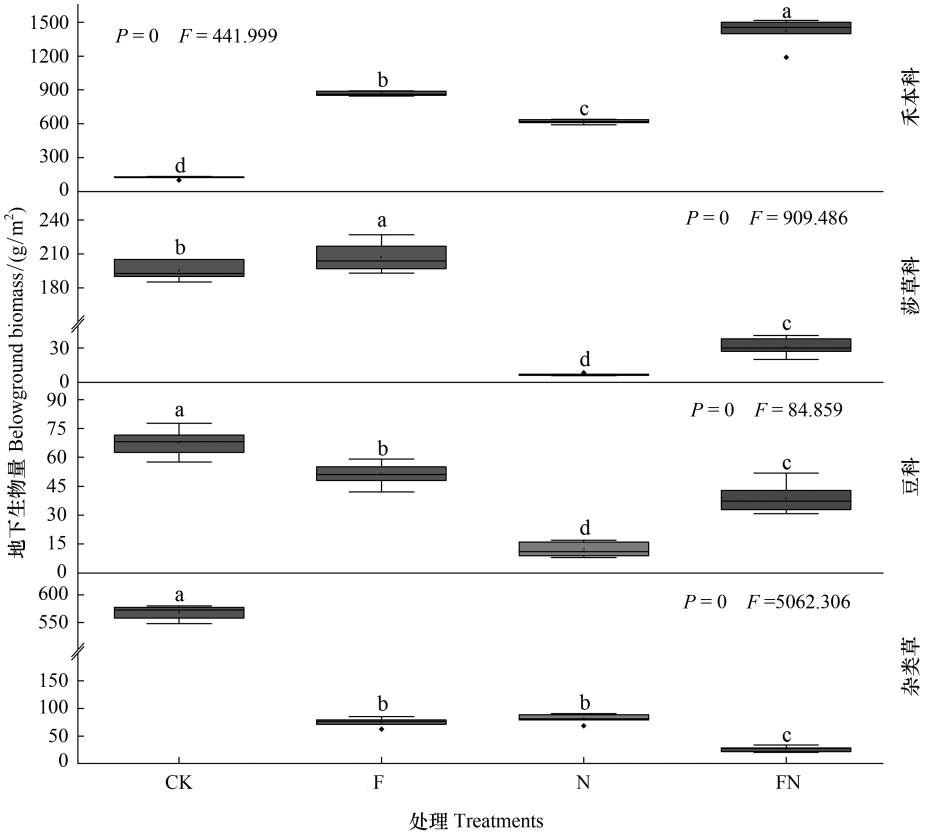


图 2 人工修复后退化高寒草甸植物功能群地下生物量组成

Fig.2 Composition of underground biomass of plant functional groups in degraded alpine meadow after artificial restoration

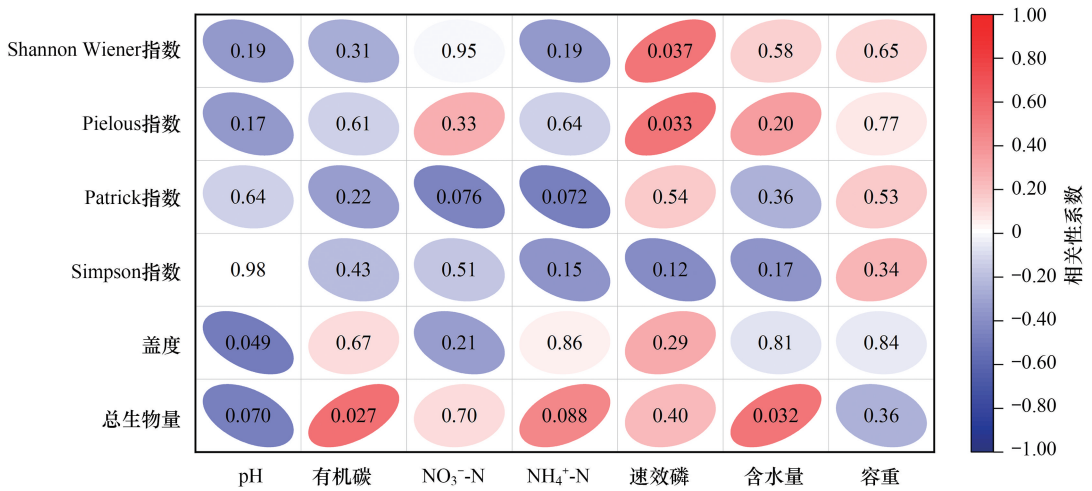


图 3 人工修复后退化高寒草甸植被特征与土壤理化性质相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between vegetation characteristics and soil physical and chemical properties of degraded alpine meadow after artificial restoration

2.5 植被特征与土壤环境因子的 RDA 排序分析

冗余分析(RDA)可进一步深入探究人工修复后高寒草甸植物群落特征的变化规律及其影响因子[14]。对人工草地植物群落特征与土壤理化指标进行了 RDA 排序(图 4),轴 1 和轴 2 分别解释总变异的 64.11%和 0.01%。土壤有机碳、土壤含水量、NH_4^+-N、pH、容重、速效磷和 NO_3^--N 分别解释了植物群落特征总变异的30.3%、

19.7%、13.3%、11.2%、2.7%、0.8%和 0.1%,其中土壤有机碳含量和含水量是影响植物群落特征的最显著因子(F=6.10,P=0.022)(F=4.20,P=0.044)(表 6)。

3　讨论

3.1　不同修复措施对植物群落组成的影响

植物群落特征变化能够反映草地的恢复状况,对高寒草甸植物群落结构和功能进行不断了解和研究才能实现高寒草甸的快速恢复和合理利用[24—25]。本研究中,群落物种的丰富度指数在免耕补播草甸较高,施有机肥草甸较低;多样性指数和均匀度指数在施有机肥+免耕补播草甸较高,施有机肥草甸较低,这与相关学者研究结果一致[10]。但与陈文业等[26]对甘南沙化高寒草甸植物群落特征及生产力的关系研究不一致,陈文业等研究表明,物种多样性指标在有机肥不同水平处理中均随施肥量增加而增大,钾肥不同水平处理对多样性变化均没有显著影响,造成这种差异可能与草甸优势植物、施肥种类、浓度及处理时间有关。免耕补播和施有机肥+免耕补播对草甸植物盖度和总生物量有促进作用。主要原因是补播牧草为乡土先锋植物,适应性较强、生长状况良好,从而提高草甸植被盖度和地上生物量[27]。免耕补播后可显著提高草地有益草类地上生物量,植物覆盖度明显增加,提高草地生产能力,改善草地的质量,使草地向良性方向发展。物种多样性能够反映出自然地理条件与群落间相互关系,物种多样性与物种的均匀度和丰富度密切相关[28]。免耕补播措施下群落丰富度指数较施有机肥草甸明显增加,这是因为补播打破草甸物种原有生态位,导致原来植物群落的空间格局发生变化,人工补种的新牧草形成了新的生态位空间,从而使草甸物种种类增加,植物群落丰富度指数得到提高[29]。补播草地植物群落多样性是免耕补播新添加物种[26]、恢复原有植被的综合作用[30]。同时,试验草甸位于干旱半干旱地区,降水较少,而蒸发量较大,年平均气温较低,植物生长普遍较慢,加上补播后恢复时间较短,物种的均匀度、优势度变化较小[31—32],这也可能是导致补播草地和施肥草地物种多样性、优势度及均匀度差异不大的另一个可能[16],这还有待于进一步长期观测。

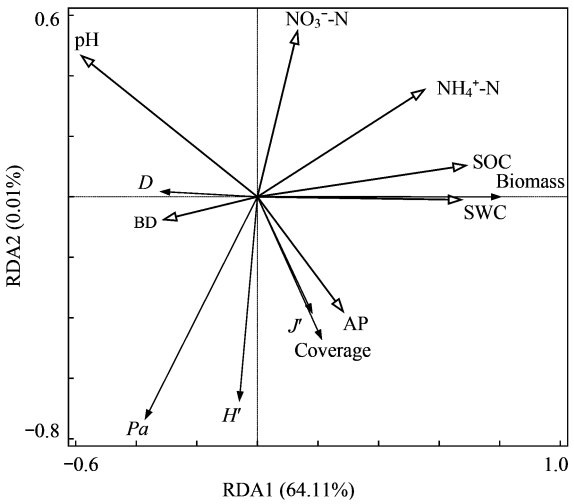


图 4　人工修复后退化高寒草甸土壤理化性质与植被特征的冗余分析

Fig. 4　Redundancy analysis of soil physicochemical properties and vegetation characteristics of degraded alpine meadow after artificial restoration

H': Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener index; D: Simpson 多样性指数 Simpson index; J': Pielous 均匀度指数 Pielous index; Pa: Patrick 丰富度指数 Patrick index; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; SWC: 土壤含水量 soil water content; BD: 容重 soil bulk density; AP: 速效磷 available P; NO_3^--N: 硝态氮 nitrate nitrogen; NH_4^+-N: 铵态氮 ammonia nitrogen; Biomass: 总生物量; Coverage: 盖度

表 6　土壤理化指标对植物生长的贡献率

Table 6　Contribution rate of soil physicochemical properties indicators to vegetation growth

因子 Factors	解释率 Explains/%	贡献率 Contribution/%	F	P
有机碳 Organic carbon	30.3	47.3	6.1	0.022
土壤含水量 Soil water content	19.7	32.4	4.2	0.044
pH	11.2	17.5	2.5	0.166
NH_4^+-N	13.3	20.7	3.5	0.070
土壤容重 Soil bulk density	2.7	4.2	0.7	0.454
速效磷 Available P	0.8	1.3	0.2	0.666
NO_3^--N	0.1	0.2	0.1	0.888

依据生态位互补效应,群落中一种功能群数量下降会为其他功能群提供空间和资源,使其迅速生长。本研究中,不同人工修复后草甸植物功能群地上、地下生物量的变化趋势基本一致(除豆科)。莎草科和杂类草在植物群落中的含量逐渐降低;禾本科含量逐渐增加;豆科地上生物量基本保持不变,地下生物量逐渐降低。这说明免耕补播和施有机肥+免耕补播禾本科牧草对退化高寒草甸恢复具有促进作用。禾本科与杂草之间存在互补效应,禾本科和豆科能更好地用特定资源创造更高的生产力[33]。

3.2 不同修复措施与土壤理化性质的关系

土壤养分是植物生长发育所必须的物质基础,对植物群落的结构和功能起决定性作用。土壤有机碳、氮和磷是土壤主要的养分指标,而且有机碳是形成土壤结构的首要因素,直接决定土壤肥力状况和土壤容重[34—35]。生态恢复措施能使土壤理化性质发生变化,地上植被群落与土壤性状相互影响相互作用[36]。研究表明,施肥在一定程度上能增加草地土壤有机碳、全氮和速效养分含量,并能提高牧草产量和品质[37]。免耕补播通过植入适合当地环境条件的牧草品种,进而改善和提高草地产量与品质,显著促进退化草地植被恢复[38]。施肥和免耕补播是草地恢复最有效、快速的措施之一,且能迅速提高草地生产力。本研究中,施有机肥+免耕补播显著降低土壤 pH,施有机肥和施有机肥+免耕补播显著增加土壤含水量,表明施有机肥和免耕补播缓解了高寒草甸的退化,降低了土壤水分的蒸发量,盐分不会聚表,导致土壤 pH 和电导率逐渐降低。研究表明,土壤中施加有机物可以给微生物供给足够的底物,从而加速土壤原有机碳的矿化,释放更多的活性碳组分促进土壤碳循环[39]。本试验中,施加有机肥短期内显著增加了土壤有机碳含量,表明退化草地施加有机肥有利于补充有机碳含量,促使植物生长,这与其他研究结果一致[40]。姬万忠等[31]对高寒退化草地进行补播试验发现,补播显著提高土壤有机碳含量,这与本研究结果相反,免耕补播和施有机肥+免耕补播有机碳含量差异不显著的主要原因可能是试验年限较短,这还需要长时间的试验来探究。施有机肥显著降低土壤容重,这与相关研究结果一致[41],原因可能是,施用有机肥使土壤有机碳含量增加,有利于大团聚体的形成,增加了土壤孔隙、土壤的通水和通气状况,从而降低土壤容重。还有研究表明,补播有效降低了土壤容重,是由于补播后草地群落植被盖度增加,减少了地表裸露部分及表层土壤蒸发量[31]。而本研究免耕补播没有显著影响土壤容重,一方面是由于免耕补播没有破坏土壤结构,另一方面是因为免耕补播试验年限较短,这还需要长时间的试验来探究。土壤氮素和磷素是衡量土壤肥力和植被生产力的重要指标。本研究发现,免耕补播能显著降低土壤硝态氮含量,这与相关学者研究结果相反[31,42],可能是由于免耕补播年限较短。施有机肥+免耕补播显著增加土壤速效磷含量,这与王伟研究结果一致[12],说明施有机肥+免耕补播对改良高寒草甸土壤速效磷含量具有明显的作用。

对于增施有机肥修复措施,退化高寒草甸土壤有机碳含量、NH_4^+-N 含量、土壤含水量和土壤容重能得到明显改善;免耕补播措施可有效改善土壤 NO_3^--N 含量和含水量;施有机肥+免耕补播措施则明显改善土壤 pH、速效磷含量和土壤含水量。施有机肥和免耕补播后草地群落植被盖度和生物量增加,减少了地表裸露部分及表层土壤蒸发量,说明土壤水分含量是评价快速修复退化高寒草甸的关键指标。退化草地经过人工施有机肥、免耕补播后,土壤 pH 降低,含水量增加,说明其保水性能得到了改善[42],这是其有机碳含量增加、土壤结构得到改善综合作用的结果[28]。

3.3 不同修复措施下植物群落特征与土壤环境因子的关系

植物与土壤是相互作用、相互影响的有机整体,植物的生长需要不断地从土壤中获取养分和水分,同时植物产生的凋落物不仅可以改善土壤的结构,还可以明显改善土壤养分含量。然而,植物和土壤之间的关系受植被类型、立地条件和演替阶段等因素的影响较为复杂,不同研究者得出的试验结果也各异[43]。大量研究表明,植物群落多样性和生物量不仅与其结构和功能有关,还与土壤速效氮、有机质和含水量因子等化学性质有关[44—45]。本研究表明,速效磷含量是影响植物群落物种 Shannon Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀度指数环境因子,pH 影响植物群落盖度,有机碳含量和含水量影响总生物量。土壤有机碳含量和含水量对高寒草甸植物群落特征的影响最显著。有些变量之间差异不显著的原因可能是因为施肥、补播年限较短,本试验修复措

施处理时间为两个月,土壤中一些养分的恢复和植被群落特征变化仍需长期时间来进行验证。但是,短期内施有机肥和免耕补播修复措施对于土壤养分的改良和植被群落特征变化具有一定促进作用。

4　结论

免耕补播显著增加草甸植物丰富度指数,施有机肥+免耕补播显著增加草甸植物 Shannon Wiener 多样性指数和 Pielous 均匀度指数,免耕补播和施有机肥+免耕补播显著增加草甸植物盖度,施有机肥+免耕补播显著增加草甸总生物量,草甸植物盖度和总生物量均在施有机肥+免耕补播达最高。

不同人工修复后草甸植物功能群地上、地下生物量变化趋势基本一致(除豆科)。人工修复后,莎草科和杂类草在植物群落中的含量逐渐降低;禾本科含量逐渐增加;豆科地上生物量基本保持不变,地下生物量逐渐降低。

施有机肥显著增加土壤有机碳含量;免耕补播显著降低土壤 NO_3^--N 含量;施有机肥+免耕补播显著降低土壤 pH 和增加土壤速效磷含量;施有机肥和施有机肥+免耕补播显著增加土壤含水量,免耕补播则显著降低土壤含水量;施有机肥对土壤容重有显著抑制作用。

施有机肥+免耕补播措施在短期内快速修复退化高寒草甸效果最好,土壤理化性质与植物生物量及盖度等植物群落特征正向演替促进了高寒草甸的恢复,土壤有机碳含量和含水量是此阶段恢复演替的主导因子。

参考文献(References):

[1] 张中华, 周华坤, 赵新全, 姚步青, 马真, 董全民, 张振华, 王文颖, 杨元武. 青藏高原高寒草地生物多样性与生态系统功能的关系. 生物多样性, 2018, 26(2): 111-129.

[2] 宾振钧, 张仁懿, 张文鹏, 徐当会. 氮磷硅添加对青藏高原高寒草甸垂穗披碱草叶片碳氮磷的影响. 生态学报, 2015, 35(14): 4699-4706.

[3] 段敏杰, 干珠扎布, 郭佳, 高清竹, 万运帆. 施肥对藏北高寒草地植物多样性及生产力的影响. 西北农业学报, 2016, 25(11): 1696-1703.

[4] Lu X Y, Yan Y, Sun J, Zhang X K, Chen Y C, Wang X D, Cheng G W. Carbon, nitrogen, and phosphorus storage in alpine grassland ecosystems of Tibet: effects of grazing exclusion. Ecology and Evolution, 2015, 5(19): 4492-4504.

[5] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 王启兰. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响. 生态学报, 2013, 33(10): 3103-3113.

[6] 宗宁, 石培礼, 蒋婧, 孟丰收, 马维玲, 熊定鹏, 宋明华, 张宪洲. 施肥和围栏封育对退化高寒草甸植被恢复的影响. 应用与环境生物学报, 2013, 19(6): 905-913.

[7] Liu Y W, Xu-Ri, Xu X L, Wei D, Wang Y H, Wang Y S. Plant and soil responses of an alpine steppe on the Tibetan Plateau to multi-level nitrogen addition. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 515-529.

[8] 杨倩, 王娓, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响. 植物生态学报, 2018, 42(4): 430-441.

[9] 刘学敏, 罗久富, 邓东周, 陈德朝, 王丽娜, 周金星. 氮添加对不同退化程度高寒草地生态系统的影响. 草业科学, 2018, 35(12): 2773-2783.

[10] 党永智, 李欣, 权欣, 德科加, 张明, 芦光新. 施用有机肥对高寒草甸地上生物量及物种多样性的影响. 青海畜牧兽医杂志, 2015, 45(6): 4-6.

[11] 陈文业, 赵明, 李广宇, 魏强, 王芳, 刘振恒, 朱丽, 张继强, 孙飞达. 不同类型施肥水平对甘南沙化高寒草甸植物群落特征及生产力的影响. 自然资源学报, 2012, 27(2): 254-267.

[12] 王伟, 德科加. 不同补播年限下河南县高寒草甸地上生物量、群落多样性与土壤养分特征的相关性研究. 青海畜牧兽医杂志, 2017, 47(2): 12-16.

[13] 罗琰, 苏德荣, 纪宝明, 吕世海, 韩立亮, 李兴福. 辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系. 草业学报, 2018, 27(3): 33-43.

[14] Garcia C, Hernandez T, Albaladejo J, Castillo V, Roldan A. Revegetation in semiarid zones: influence of terracing and organic refuse on microbial activity. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(3): 670-676.

[15] 李良臣, 柯建武, 呼和. 盐碱化草牧场改良试验报告. 内蒙古草业, 2003, 15(4): 36-37.

[16] Onipchenko V G, Makarov M I, Akhmetzhanova A A, Soudzilovskaia N A, Aibazova F U, Elkanova M K, Stogova A V, Cornelissen J H C. Alpine plant functional group responses to fertiliser addition depend on abiotic regime and community composition. Plant and Soil, 2012, 357(1/

2): 103-115.
[17] Baruah G, Molau U, Jägerbrand A K, Alatalo J M. Impacts of seven years of experimental warming and nutrient addition on neighbourhood species interactions and community structure in two contrasting alpine plant communities. Ecological Complexity, 2018, 33: 31-40.
[18] 张燕堃, 张灵菲, 张新中, 冶娜娜, 江小雷. 不同草地恢复措施对高寒草甸植物根系特征的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 2014, 50(1): 107-111.
[19] 任继周. 草业科学研究方法. 北京: 中国农业出版社, 1998.
[20] 魏卫东, 李希来. 三江源区不同退化程度高寒草地土壤特征分析. 湖北农业科学, 2012, 51(6): 1102-1106.
[21] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 唐志尧, 贺金生, 于丹, 江源, 王志恒, 郑成洋, 朱江玲, 郭兆迪. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
[22] 白可喻, 戎郁萍, 杨云卉, 林长存. 北方农牧交错带草地生物多样性与草地生产力和土壤状况的关系. 生态学杂志, 2013, 32(1): 22-26.
[23] 张韫. 土壤·水·植物理化分析教程. 北京: 中国林业出版社, 2011.
[24] 李学斌, 马琳, 杨新国, 宋乃平, 许冬梅, 谢应忠. 荒漠草原典型植物群落枯落物生态水文功能. 生态环境学报, 2011, 20(5): 834-838.
[25] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 董全民, 吴海艳, 盛利, 杨时海, 李世雄. 黄河源区高寒草甸不同植被生物量及土壤养分状况研究. 草地学报, 2011, 19(1): 1-6.
[26] 陈文业, 赵明, 李广宇, 魏强, 王芳, 刘振恒, 朱丽, 张继强, 孙飞达. 不同类型施肥水平对甘南沙化高寒草甸植物群落特征及生产力的影响. 自然资源学报, 2012, 27(2): 254-267.
[27] 杨增增, 张春平, 董全民, 杨晓霞, 褚晖, 李小安, 魏琳娜, 张艳芬. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响. 草地学报, 2018, 26(5): 1071-1077.
[28] 孙树青. 乌珠穆沁沙质退化草地人工补播调查研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
[29] Kawata M. Invasion of vacant niches and subsequent sympatric speciation. Proceedings Biological Sciences, 2002, 269(1486): 55-63.
[30] 吴旭东, 蒋齐, 俞鸿千, 王占军, 何建龙. 沙质草地植物群落及土壤质地对补播和翻耕措施的响应. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 246-251.
[31] 姬万忠, 王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响. 草业科学, 2016, 33(5): 886-890.
[32] Tilman D. Niche tradeoffs, neutrality, and community structure: a stochastic theory of resource competition, invasion, and community assembly. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 10854-10861.
[33] 杨军, 刘秋蓉, 王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4067-4072.
[34] 星学军. 黄河源区高寒草甸不同退化阶段草地特征研究. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10578-10580, 10616.
[35] 周华坤, 赵新全, 周立, 刘伟, 李英年, 唐艳鸿. 青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究. 草业学报, 2005, 14(3): 31-40.
[36] 郝文芳, 杜峰, 陈小燕, 梁宗锁. 黄土丘陵区天然群落的植物组成、植物多样性及其与环境因子的关系. 草地学报, 2012, 20(4): 609-615.
[37] 宝音陶格涛, 刘美玲, 包青海, 呼格吉勒图. 氮素添加对典型草原区割草场植物群落结构及草场质量指数的影响. 草业学报, 2011, 20(1): 7-14.
[38] 曹子龙, 郑翠玲, 赵廷宁, 孙保平. 补播改良措施对沙化草地植被恢复的作用. 水土保持研究, 2009, 16(1): 90-92, 97.
[39] 张璐, 张文菊, 徐明岗, 蔡泽江, 彭畅, 王伯仁, 刘骅. 长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响. 中国农业科学, 2009, 42(5): 1646-1655.
[40] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 林治安, 李燕婷, 杨相东, 李志杰. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 118-127.
[41] 马阳, 吴敏, 王艳群, 周加森, 张世卿, 王继唯, 彭正萍, 郭丽果. 不同耕作施肥方式对夏玉米氮素利用及土壤容重的影响. 水土保持学报, 2019, 33(5): 171-176.
[42] 蒋德明, 苗仁辉, 押田敏雄, 周全来. 封育对科尔沁沙地植被恢复和土壤特性的影响. 生态环境学报, 2013, 22(1): 40-46.
[43] 华青措. 氮磷钾不同施肥配方对高寒草甸植物养分及土壤养分的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2017(5): 144-145.
[44] Verdoodt A, Mureithi S M, Ye L M, Ranst E V. Chronosequence analysis of two enclosure management strategies in degraded rangeland of semi-arid Kenya. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 129(1/2/3): 332-339.
[45] 李凯辉, 胡玉昆, 王鑫, 范永刚, 吾买尔.吾守. 不同海拔梯度高寒草地地上生物量与环境因子关系. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2019-2024.