

网络出版日期:2018-04-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20180416.0904.020.html>

# 高寒草甸退化草地植被与土壤因子关系冗余分析

刘育红, 魏卫东, 杨元武, 张 英

(青海大学 农牧学院, 西宁 810016)

**摘 要** 旨在研究高寒草甸退化草地植被与土壤因子的关系, 设置研究样地、观测植物群落特征、采集土样、分析土壤主要物理化学性质, 依据数量生态学基本原理, 利用退化草地植被—土壤因子数据矩阵进行冗余分析。结果表明: 高寒草甸群落莎草科高山嵩草、禾本科垂穗披碱草优势度随草地退化程度的加剧而降低, 杂类草黄帚橐吾、豆科黄花棘豆优势度则呈相反变化趋势; RDA 排序图中, 第 1 排序轴反映高寒草甸退化程度及土壤温度、容质量、土壤含水量、全氮等因子的综合变化; 第 2 排序轴反映土壤机械组成的综合变化。第 1、第 2 排序轴解释 74.5% 的植被变化和 83.2% 的植被—土壤因子关系, 并表明退化草地植被与土壤因子间极显著相关; 莎草科、禾本科植物与土壤有机碳、全氮、土壤含水量等极显著正相关, 与容质量、土壤温度极显著负相关; 杂类草及豆科植物与土壤有机碳、全氮、土壤含水量等极显著负相关, 而与容质量、土壤温度极显著正相关; 13 个土壤因子边际作用检验表明, 土壤温度、容质量、有效氮、全氮等与退化草地植被的关系更密切。利用退化草地植被—土壤因子数据进行冗余分析反映出退化草地植被与土壤因子间关系密切, 不同土壤因子对草地植被分布的影响不同。

**关键词** 高寒草甸; 退化草地; 植被; 土壤因子; 冗余分析; 相关性

**中图分类号** S812

**文献标志码** A

**文章编号** 1004-1389(2018)04-0480-11

高寒草甸在恶劣的环境因素和不合理的人类利用共同驱动下出现退化问题<sup>[1]</sup>, 使得其生态环境恶化, 生态、生产功能受到较大影响, 区域生态保护和社会发展功能被削弱<sup>[2]</sup>。由此, 研究人员针对高寒草甸退化、退化草地土壤特征等问题开展相应研究, 并取得一定成果。一段时间以来, 研究主要集中在退化草地植物群落及特征与土壤性质或土壤环境关系方面<sup>[3-5]</sup>; 不同退化阶段土壤化学性质变化方面<sup>[6-8]</sup>, 退化草甸土壤有机碳、有机碳组分、土壤碳储量、土壤微生物量碳方面<sup>[9-13]</sup>; 退化草地土壤粒径等物理性质方面<sup>[14-17]</sup>; 退化草地土壤酶活性、土壤呼吸方面<sup>[18-19]</sup>。但是, 这些研究侧重探讨的是退化高寒草甸植物群落以及土壤中碳、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, 而将退化草地土壤多个理化因子相结合, 深入探讨退化草地植被与土壤理化因子间关系的研究较少。从高寒草甸不同退化程度草地植被与草地土壤理化因子关

系角度看, 存在的主要科学问题有: 退化草地植被与土壤理化因子间呈现怎样的关系, 退化草地植被与土壤理化因子间关系的密切程度, 哪些土壤因子能够更敏感地反映退化草地植被的变化。基于这些科学问题, 选择具有典型高寒草甸特征的研究样地, 进行草地退化现状调查、植物群落特征观测、土壤样品采集及测定, 同时运用数量生态学中的冗余分析(redundancy analysis, RDA)方法, 研究高寒草甸退化草地植被与草地土壤因子的内在联系, 以期高寒草甸退化草地的相关研究和生态治理提供理论依据, 也为高寒地区草地群落、物种与环境间关系的研究提供实例。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区在青海省果洛藏族自治州(以下简称果洛州)玛沁县(MQ)、甘德县(GD)、达日县(DR)。果洛州(N32°21'~35°45', E96°56'~101°

收稿日期:2017-08-18 修回日期:2017-10-16

基金项目:国家自然科学基金(31460151, 31560167);青海省科技厅应用基础研究计划(2015-ZJ-715)。

第一作者:刘育红,女,硕士,教授,从事高寒草地土壤学研究。E-mail:469964723@qq.com

通信作者:魏卫东,男,硕士,教授,主要从事高寒草地生态环境研究。E-mail:qhweidong@163.com

45')总面积 7.6 万 km<sup>2</sup>,可利用草地面积 585.6 万 hm<sup>2</sup>,其中高寒草甸占 56.3%;全州平均海拔 4 200 m,大气含氧量仅为海平面的 60%;果洛州属高原大陆型气候,气温低、温差大、辐射强、年均温 -4 ℃,年均降水量 513.2 mm,年均蒸发量 1 462.4 mm,年均日照时数 2 260.3 h,全年无绝对无霜期;果洛州境内河流纵横、湖泊众多、黄河自西至东横穿全境;境内高寒草甸草地植物群落中莎草科高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)等为优势种,伴生种以禾本科(Gramineae)、菊科(Compositae)、龙胆科(Gentianaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Leguminosae)等植物为主;高寒草甸草地土壤类型以高山草甸土分布最多。

## 1.2 样地设置

在具有典型高寒草甸特征的果洛州玛沁县、

甘德县、达日县天然草地设置研究样地(表 1),利用空间分布代替时间演替的方法研究高寒草甸退化草地植被与土壤因子的关系。依据任继周<sup>[20]</sup>、赵新全<sup>[21]</sup>关于草地退化程度划分的方法,结合草地类型、土壤侵蚀现状、啮齿动物危害等情况综合评价样地的退化程度。研究样地处于阳坡,坡度 11°~21°;为高山嵩草草地型,主要植物为高山嵩草、矮嵩草、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等;土壤为高山草甸土;分为 4 种退化程度,即:未退化(un-degradation, UD)、轻度退化(light degradation, LD)、中度退化(moderate degradation, MD)和重度退化(heavy degradation, HD)。每个研究样地大小为 50 m×50 m,在每个样地内进行植物群落数量特征观测时随机设置观测样方,重复 6 次。

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of plots

样地号 Plot No.	地点 Location	退化程度 Degradation degree	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	植被盖度/% Vegetation coverage	地上生物量/(g/m <sup>2</sup> ) Aboveground biomass
1	MQ	UD	100°24'23"	34°38'48"	3 825	91.5	563.70
2	MQ	LD	100°16'09"	34°24'23"	3 748	89.9	537.96
3	MQ	MD	100°17'26"	34°16'32"	4 020	67.3	325.35
4	MQ	MD	99°26'05"	33°58'54"	4 226	77.7	379.37
5	GD	UD	100°12'18"	34°08'54"	4 025	93.4	619.72
6	GD	UD	100°11'29"	34°09'32"	4 031	90.5	561.65
7	GD	LD	99°31'08"	33°58'15"	4 051	87.8	511.78
8	GD	LD	99°52'10"	33°55'10"	4 049	85.9	474.82
9	GD	MD	101°2'26"	33°39'11"	4 107	71.6	348.01
10	GD	HD	101°01'39"	33°48'21"	4 076	49.1	213.01
11	GD	HD	101°12'43"	33°05'17"	4 083	45.4	187.93
12	DR	UD	100°01'39"	33°32'10"	4 201	92.1	587.48
13	DR	UD	100°26'27"	33°16'21"	4 179	91.6	572.92
14	DR	LD	100°50'13"	33°36'32"	3 972	87.0	502.60
15	DR	LD	100°52'54"	33°22'54"	4 536	82.1	460.78
16	DR	MD	100°4'33"	33°40'54"	4 210	68.5	312.14
17	DR	MD	101°18'3"	33°21'49"	4 037	64.0	283.93
18	DR	HD	100°14'20"	33°44'43"	3 914	37.7	119.79
19	DR	HD	100°36'46"	33°21'49"	4 334	42.2	165.41
20	DR	HD	101°25'48"	33°23'27"	3 892	40.8	136.32

## 1.3 测定项目与方法

2016 年 8 月,在各研究样地随机设置 6 个 1 m<sup>2</sup>的观测样方,对每个样方进行植物群落特征

调查。包括植被总盖度(多人目测平均法)、植物物种数及不同物种盖度、高度(自地表至植株顶端自然高度,每样方测定 20 株,不足 20 株的物种按

实际株数测定)、地上生物量(分物种齐地面刈割称鲜质量)等;重要值作为退化草地植物优势度指标。

重要值 = (相对盖度 + 相对高度 + 相对生物量) / 3。

完成植物群落特征调查后,在每个样方内土钻采集 0~30 cm 土层的土样,同一样地不同样方土样混合为 1 个土壤样品,带回实验室自然风干后用于测定土壤性质。在采集土样的同时,环刀法测定土壤容质量,测温计测定土壤温度,水分测定仪(TDR 300)测定土壤含水量。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法<sup>[22]</sup>测定;土壤全氮采用半微量凯氏定氮法、土壤全磷采用钼锑抗比色法<sup>[23]</sup>测定;土壤有效氮采用比色法、土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法、土壤全钾和土壤有效钾采用火焰光度法<sup>[22]</sup>测定;采用比重计法<sup>[24]</sup>测定粘粒比例(粒径 < 0.002 mm)和砂粒比例(0.05 mm < 粒径 < 2 mm);土壤 pH 采用水土体积比 2.5 : 1 的电位法<sup>[22]</sup>测定。

#### 1.4 数据分析方法

应用 Canoco 4.5 软件基于线性模型对退化草地植被—土壤因子进行冗余分析<sup>[25]</sup>。其中物种数据为 26 种植物构建的 26 × 20 维重要值矩阵;退化草地土壤主要理化因子构建 13 × 20 维土壤环境因子矩阵,包括有机碳(soil organic carbon, SOC)、全氮(total nitrogen, TN)、有效氮(available nitrogen, AN)、全磷(total phosphorus, TP)、有效磷(available phosphorus, AP)、全钾(total potassium, TK)、有效钾(available potassium, AK)、容质量(bulk density, BD)、土壤含水量(soil water content, SWC)、土壤温度(soil temperature, ST)、粘粒比例(clay, 以下简称粘粒)、砂粒比例(sand, 以下简称沙粒)、pH 共 13 个指标。进行冗余分析时,对退化草地植被数据进行中心化和标准化,排序轴特征值采用 Monte Carlo permutation test 检验显著性;通过前向选择法(forward selection) Monte Carlo permutation test 随机置换 999 次检验 13 个土壤因子边际作用(marginal effects)<sup>[26]</sup>,以此反映土壤因子对退化草地植被影响的显著性,并按照其特征值(eigenvalues)进行重要性排序;Cano Draw 绘制植被—土壤因子 RDA 二维排序图;SPSS 20.0 进行 Spearman 相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 高寒草甸退化草地植物群落组成

植被是高寒草甸生态系统的重要组成部分。随着高寒草甸退化程度的变化,植物种类、物种重要值均发生相应变化。在退化程度不同的研究样地,物种总数呈 LD > MD > UD > HD 的变化趋势;UD 样地,莎草科高山嵩草、矮嵩草、青藏苔草和禾本科垂穗披碱草具有较高优势度,杂类草及豆科植物优势度较低且种类相对较少;LD、MD 样地杂类草和豆科植物开始大量出现,植物种类最多;HD 样地高山嵩草、青藏苔草等退出,黄帚橐吾、全缘叶绿绒蒿等杂类草成为优势种。莎草科植物重要值总体随草地退化程度的加剧而减小,禾本科垂穗披碱草重要值也具同样规律,说明随着草地退化,优良牧草在植物群落中的优势地位逐渐消失;杂类草中美丽风毛菊、乳白香青、钉柱委陵菜等重要值在中度退化时较大,黄帚橐吾、全缘叶绿绒蒿、矮生忍冬、细叶亚菊等则在重度退化时较大,反映出随着草地退化,杂类草在植物群落中逐渐占优势,草地生产功能随之降低乃至丧失(表 2)。

### 2.2 高寒草甸植被与草地退化的关系

利用研究样地植被—土壤因子数据矩阵进行冗余分析发现,RDA 排序图中不同退化程度样地分布在 4 个区域。样地号为 1、5、6、12、13 的退化程度为 UD, 2、7、8、14、15 为 LD, 3、4、9、16、17 为 MD;样地号为 10、11、18、19、20 为 HD。说明 RDA 排序图第 1 排序轴主要反映退化程度,自左向右草地退化程度加剧。另外,沿第 1 排序轴水平方向 UD、LD 样地位置临近,并与 MD、HD 样地位置相对较远,说明不同退化程度间存在差异(图 1)。

从植物在退化草地的分布格局看,26 种植物呈明显的区域分布。物种 S1、S2、S3、S4、S5、S12、S14 集中分布在 UD 样地,与 UD 样地关联度较高;物种 S6、S7、S8、S9、S11、S13、S22、S23、S25、S26 集中分布在 MD 样地,与 MD 样地关联度较高;物种 S10、S15、S16、S17、S18、S19、S20、S21、S24 则集中分布在 HD 样地,与 HD 样地关联度较高(图 1)。沿第 1 排序轴,物种由分布在 UD 样地的高山嵩草、矮嵩草等向分布在 HD 样地的黄帚橐吾等转变,说明植物物种分布不同,植物物种分布与草地退化程度相关。

表 2 高寒草甸不同退化程度草地植物物种组成及重要值

Table 2 Species composition and important value of alpine meadow plants on different degraded grassland

高寒草甸植物群落 Alpine meadow plant community	物种代号 Species code	重要值 Importance value			
		UD	LD	MD	HD
高山嵩草 <i>Kobresia pygmaea</i>	S1	27.42	13.09	10.87	/
矮嵩草 <i>Kobresia humilis</i>	S2	15.56	17.42	4.03	2.38
线叶嵩草 <i>Kobresia capillifolia</i>	S3	4.96	1.19	/	/
青藏苔草 <i>Carex moorcroftii</i>	S4	7.15	2.02	1.85	/
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	S5	6.91	3.65	2.89	2.45
草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	S6	1.46	1.85	3.29	/
美丽风毛菊 <i>Saussurea pulchra</i>	S7	2.85	3.22	6.02	3.52
乳白香青 <i>Anaphalis lactea</i>	S8	2.04	2.66	3.58	2.81
矮火绒草 <i>Leontopodium nanum</i>	S9	1.65	2.17	3.02	2.56
细叶亚菊 <i>Ajania tenuifolia</i>	S10	1.11	1.25	2.32	8.06
钉柱委陵菜 <i>Potentilla saundersiana</i>	S11	2.15	2.73	3.82	/
三脉梅花草 <i>Parnassia trinervis</i>	S12	2.27	3.27	/	/
高山唐松草 <i>Thalictrum alpinum</i>	S13	2.23	2.95	2.95	/
圆穗蓼 <i>Polygonum macrophyllum</i>	S14	6.05	4.32	2.87	2.17
矮生忍冬 <i>Lonicera minuta</i>	S15	/	2.18	2.95	8.60
全缘叶绿绒蒿 <i>Meconopsis integrifolia</i>	S16	/	1.44	1.78	8.79
唐古特虎耳草 <i>Saxifraga tangutica</i>	S17	1.99	2.13	2.62	7.92
短穗兔耳草 <i>Lagotis brachytachya</i>	S18	/	2.06	3.10	6.53
黄帚橐吾 <i>Ligularia virgaurea</i>	S19	/	2.5	4.54	12.92
甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i>	S20	/	1.68	3.70	6.17
铁棒锤 <i>Aconitum pendulum</i>	S21	/	2.80	3.24	6.32
麻花艽 <i>Gentiana straminea</i>	S22	/	2.08	2.98	/
白苞筋骨草 <i>Ajuga lupulina</i>	S23	/	1.61	3.44	1.23
黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i>	S24	1.55	1.84	3.07	7.51
甘肃棘豆 <i>Oxytropis kansuensis</i>	S25	/	1.97	3.40	/
肾形子黄芪 <i>Astragalus weigoldianus</i>	S26	1.80	1.85	2.53	/
物种总数 Total		17	26	24	16

注:“/”表示该物种未出现。

Note:“/” Species did not appear.

综上所述,当高寒草甸草地退化加剧时,植被中莎草科嵩草属植物在群落中的优势地位逐渐被菊科、豆科的毒杂草植物取代,黄帚橐吾、细叶亚菊、黄花棘豆等毒杂草是表征草地重度退化的重要物种。

### 2.3 高寒草甸退化草地植被与土壤因子的关系

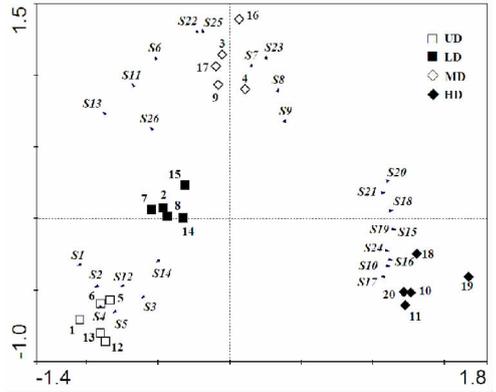
对研究样地植被—土壤因子数据进行冗余分析,结果表明:第 1、第 2 排序轴特征值分别为 0.504、0.240,2 个排序轴共解释 74.5% 的草地植被变化和 83.2% 的植被—土壤因子关系。说明第 1、第 2 排序轴较好地反映退化草地植被与土

壤因子间的关系。退化草地植被与土壤因子相关系数在第 1、第 2 排序轴分别为 0.995、0.982,说明退化草地植被与土壤因子关系密切;Monte Carlo permutation test 也表明第 1 排序轴及所有排序轴反映的退化草地植被与土壤因子间呈极显著相关关系( $P < 0.01$ ) (表 3)。

冗余分析结果显示,土壤温度、容质量与第 1 排序轴正相关,相关系数分别为 0.947、0.915;土壤有效氮、土壤含水量、全氮、全磷与第 1 排序轴负相关,相关系数分别为 -0.899、-0.881、-0.880、-0.818,说明第 1 排序轴主要反映土壤

温度、容质量、土壤含水量以及全氮、全磷等因子的综合变化,沿第 1 排序轴自左到右,土壤温度升高、容质量增大、有效氮、全氮、全磷含量降低、土壤含水量减少。土壤粘粒、有效钾与第 2 排序轴正相关,相关系数分别为 0.851、0.804;土壤沙粒与第 2 排序轴负相关,相关系数为-0.896,说明第 2 排序轴主要反映土壤机械组成的综合变化,沿第 2 排序轴自下向上,粘粒比例、有效钾含量增加,沙粒比例减少(表 4、图 2)。

对 13 个土壤因子边际作用检验后发现,不同土壤因子对草地植被分布的影响不同。依据土壤因子特征值排序为土壤温度>容质量>有效氮>全氮>土壤含水量>全磷>有机碳>有效钾>粘粒>沙粒>有效磷>pH>全钾,说明土壤温度、有效氮等理化指标对不同退化程度草地植被的分布更重要(表 4)。



图中数字代表样地号, S1—S26 分别代表不同植物物种  
Numbers represent the plots, S1—S26 represents the different plant species

图 1 研究样地及植被 RDA 二维排序图  
Fig. 1 RDA two-dimensional ordination diagram of plots and vegetation

表 3 退化草地植被与土壤因子 RDA 排序结果

Table 3 RDA results of soil factors and degradation grassland vegetation

排序轴 Axis	特征值 Eigenvalues	植被-土壤 因子相关系数 Vegetation-soil correlation coefficient	植被变化累 积百分比/% Vegetation cumulative percentage variance	植被-土壤因子变化 累积百分比/% Vegetation-soil cumulative percentage variance	特征值总和 Sum of all eigenvalues	典范特 征值总和 Sum of all canonical eigenvalues	Monte carlo permutation test	
							第一典范轴 P 值 Significance of first canonical axis	所有典范轴 P 值 Significance of all canonical axis
Axis1	0.504	0.995	50.4	56.3	1.000	0.895	F=6.103	F=3.939
Axis2	0.240	0.982	74.5	83.2			P=0.002	P=0.002
Axis3	0.052	0.964	79.6	89.0				
Axis4	0.031	0.898	82.7	92.4				

表 4 植被与土壤因子 RDA 相关系数及土壤因子排序

Table 4 Correlation coefficient between vegetation and soil factors RDA and soil factors sort

土壤因子 Soil factor	相关系数 Correlation coefficient		边际作用 Marginal Effect	
	Axis 1	Axis 2	特征值 Eigenvalue	土壤因子排序 Soil factors sort
SOC	-0.788	-0.289	0.34	7
TN	-0.880	-0.259	0.41	4
AN	-0.899	-0.303	0.44	3
TP	-0.818	-0.147	0.35	6
AP	-0.406	0.527	0.17	11
TK	0.098	0.056	0.03	13
AK	-0.484	0.804	0.28	8
pH	-0.146	0.536	0.09	12
BD	0.915	0.211	0.45	2
SWC	-0.881	-0.132	0.4	5
ST	0.947	-0.087	0.46	1
Clay	-0.410	0.851	0.27	9
Sand	0.327	-0.896	0.26	10

图 2 反映退化草地植被-土壤因子冗余分析二维排序结果。结合图 2、图 1 可以看出,UD 样地中有效氮、全氮、土壤含水量、有机碳、全磷较其他土壤因子对物种 S1、S2、S3、S4、S5、S12、S14 的影响更大;LD、MD 样地中有效钾、粘粒、有效磷、pH 较其他土壤因子对物种 S6、S7、S8、S9、S11、S13、S22、S23、S25、S26 的影响更大;HD 样地中,土壤温度、容质量、沙粒、全钾较其他土壤因子对物种 S10、S15、S16、S17、S18、S19、S20、S21、S24 的影响更大。说明随着草地退化程度的加剧,在土壤有效氮、全氮等因子水平减小,土壤温度、容质量等因子水平增大的背景下,草地植被由莎草科、禾本科逐步过渡到杂类草,最终演替为毒杂草群落。同时,当土壤有效氮、全氮、土壤含水量等水平较高,土壤温度、容质量等水平较低时,有利于高山嵩草、垂穗披碱草等高寒草甸优势种植物在群落中的分布;反之,则有利于黄帚橐吾、矮生忍冬等毒杂草植物在群落中的分布。说明草地植被演替与土壤因子变化相关。

不同植物与不同土壤因子间的相关性分析表明:莎草科高山嵩草、青藏苔草,禾本科垂穗披碱草与有机碳、全氮、有效氮、全磷、土壤含水量极显著正相关( $P < 0.01$ ),与容质量、土壤温度极显著负相关( $P < 0.01$ );杂类草中,细叶亚菊、唐古特虎耳草等与有机碳、全氮、有效氮、全磷、土壤含水量极显著负相关( $P < 0.01$ ),与容质量、土壤温度极显著正相关( $P < 0.01$ );豆科植物中黄花棘豆同样与有机碳、全氮、有效氮、全磷、土壤含水量极显著负相关( $P < 0.01$ ),而与容质量、土壤温度极显著正相关( $P < 0.01$ )(表 5)。进一步说明不同土壤因子对不同植物分布的影响不同。其次,与研究样地植被存在极显著、显著相关较多的土壤因子是全氮、有效氮、全磷、有机碳、容质量、土壤温度、土壤含水量,这一结果与冗余分析中对土壤因子边际作用检验并按照特征值排序的结果一致(表 5)。

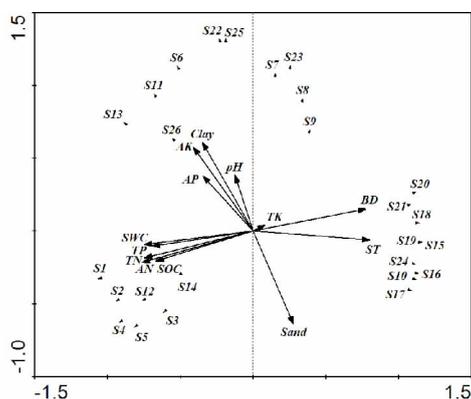


图 2 退化草地植被与土壤因子 RDA 二维排序图

Fig. 2 Degraded grassland vegetation and RDA two-dimensional ordination diagram of soil factors

### 3 结论与讨论

青藏高原高寒草甸由于受独特的气候、地理等因素综合作用,生态系统结构相对简单,易受环境和人为因素的扰动而发生草地退化,导致草地植被与土壤因子间相互响应与反馈。同时,由于草地植被物种间存在的种间、种内关系,以及土壤因子间的互作,共同使退化草地植被与土壤因子的关系以复杂的动态变化形式存在。

本研究基于冗余分析方法对高寒草甸退化草地植被与土壤因子的关系进行分析,将退化草地研究样地、样地植被、样地土壤因子有机结合,通过 RDA 二维排序图直观揭示样地、物种、土壤因

子间的关系,主要表现为:高寒草甸群落中,植物优势度在草地退化演替格局中发生变化,莎草科、禾本科植物优势度总体随草地退化程度的加剧而降低,杂类草、豆科植物优势度总体随退化程度的加剧而逐渐增加,植被在不同退化程度草地进行的这种演替,使得高寒草甸的生产功能降低甚至丧失。利用退化草地植被—土壤因子数据矩阵进行冗余分析能够较好反映草地植被与土壤因子的关系。在 RDA 二维排序图中,第 1 排序轴反映高寒草甸退化程度,沿第 1 排序轴草地退化程度加剧,土壤温度升高、容质量增大、有效氮、全氮、全磷含量降低、土壤含水量减少。第 2 排序轴则主要反映土壤机械组成的综合变化。第 1、第 2 排序轴能够解释 74.5% 的退化草地植被变化和 83.2% 的植被—土壤因子关系且反映出退化草地植被与土壤因子极显著相关( $P < 0.01$ )。不同土壤因子在草地植被分布时的重要性不同,土壤有效氮、全氮等含量较高,土壤温度、容质量水平较低时,有利于高山嵩草、矮嵩草、垂穗披碱草等高寒草甸优势种植物的分布;杂类草及豆科植物在土壤温度、容质量等因子处于较高水平且土壤有效氮、土壤含水量等因子处于较低水平时更易在群落中分布。13 个土壤因子的边际作用检验也表明,土壤温度、容质量、有效氮、全氮、全磷等与退化草地植被间的关系更密切。

冗余分析应用于草地植被与土壤因子间、环境与土壤因子关系的研究已有报道。王兴等<sup>[27]</sup>在荒漠草原弃耕地对草地土壤与植被间关系进行 RDA 分析,认为土壤碳酸钙表征土壤沙化程度和退化阶段,弃耕地植物分布格局是在土壤退化状态约束下物种扩散竞争的结果;白晓航等<sup>[28]</sup>将 RDA 分析用于亚高山草甸群落特征与环境因子间关系研究中,认为群落分布格局与坡向、土壤温度、海拔等因子极显著相关( $P < 0.01$ ),坡向、土壤温度等因子对植被类型的形成具有关键作用;郚威等<sup>[29]</sup>对辽宁南部太子河流域河岸带土壤理化特征与环境因子关系进行冗余分析,认为海拔、年降水量等是影响土壤空间差异的主导因子。由此看出,虽然不同研究人员在不同地区针对不同研究对象的研究结论不同,但是植被与土壤因子间的相关性均集中体现在土壤化学性质、地形地貌、气象因素等方面。而本研究在选取影响植被分布的因子时,侧重选择土壤物理、化学性质,而坡向、海拔、降水量等地形、气象因素未纳入分析

表 5 高寒草甸退化草地植被与土壤因子相关性

Table 5 Correlation between vegetation of degraded alpine grassland and soil factors

物种代号 Species code	SOC	TN	AN	TP	AP	TK	AK	pH	BD	SWC	ST	粘粒 Clay	砂粒 Sand
S1	++	++	++	++					--	++	--		
S2	+	++	++	++	+				--	++	--		
S3	++	++	++	++					--	++	--		
S4	++	++	++	++					--	++	--		
S5	++	++	++	++					--	++	--		
S6					++		++					++	--
S7							+					+	
S8		--	-	-				+	++	-	++		
S9									-		+		
S10	--	--	--	--					++	--	++		
S11					+		++					++	--
S12	+	++	++	++					--	++	--		
S13					++		++	+				++	--
S14								-	-		-		
S15	--	--	--	--					++	--	++		
S16	--	--	--	--					++	--	++		
S17	--	--	--	--					++	--	++		
S18	--	--	--	--					++	--	++		
S19	--	--	--	--					++	--	++		
S20	--	--	--	--					++	--	++		
S21	--	--	--	--					++	--	++		
S22					++		++					++	--
S23					+		++					++	--
S24	--	--	--	--					++	--	++		
S25					++		++	-				++	--
S26												+	--

注: ++表示极显著正相关( $P < 0.01$ ), +表示显著正相关( $P < 0.05$ ), --表示极显著负相关( $P < 0.01$ ), -表示显著负相关( $P < 0.05$ )。

Note: ++ Very significantly positive correlation( $P < 0.01$ ), + significantly positive correlation( $P < 0.05$ ), -- very significantly negative correlation( $P < 0.01$ ), - significantly negative correlation( $P < 0.05$ ).

中,应在今后的研究中给予补充。

冗余分析应用于植被与环境间关系的研究也存在不足。高寒草甸植被退化与土壤退化互为因果,植被退化与土壤退化耦合导致草地退化。在高寒草甸退化进程中植被退化与土壤退化存在时间差,由于土壤具有相对较强的抗退化能力,草地植被异质化出现一段时间后,才引起土壤中某些性质的异质化。但是在退化高寒草甸应用冗余分析时,不能反映不同退化程度下植被与土壤因子的时间顺序问题。

目前,关于植被与土壤因子间关系研究更多

的是探讨植被群落多样性、群落特性等与土壤环境因子间的相关性<sup>[30-33]</sup>。赵景学等<sup>[34]</sup>研究藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子之间的关系,发现高寒草地土壤有机质、全氮、有效氮、全磷与多样性指数及丰富度指数呈极显著正相关( $P < 0.01$ );保娅等<sup>[35]</sup>研究高山嵩草群落生物多样性与土壤养分的相关性,发现土壤全氮、全钾、pH对 Simpson 指数影响较大,全氮、pH对 Shannon-Wiener 指数影响较大,说明土壤全钾、pH影响植物物种在群落中的分布,与本研究得到的植被与 pH、全钾间未表现显著相关的结论

不一致,可能的原因在于高山嵩草草甸空间分布范围广、高山草甸土空间异质性大、样地退化程度不一致所导致。罗亚勇等<sup>[36]</sup>也以高寒草甸退化草地为对象,研究草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系,结果表明,群落物种多样性和生产力与土壤有机碳、全氮、土壤含水量等呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),这一结论中认为群落生产力与诸多土壤因子正相关,与本研究得到的莎草科、禾本科植物的分布与有机碳、全氮、土壤含水量等因子间极显著正相关( $P < 0.01$ )的结论实质是一致的。

目前,在高寒草甸退化草地植物物种与土壤环境因子研究领域,尚未见相关文献报道,但有研究人员在亚热带稻田弃耕湿地方面开展类似研究,反映出丁香蓼(*Ludwigia prostrata*)—水竹叶(*Murdannia triquetra*)物种组主要分布在土壤有效钾含量较高区域,小白草(*Conyza canadensis*)—双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*)物种组的分布则与土壤有效磷含量、pH正相关<sup>[37]</sup>。

本研究发现,莎草科、禾本科植物与土壤全氮、土壤含水量等因子极显著正相关( $P < 0.01$ ),与容质量、土壤温度间极显著负相关( $P < 0.01$ ),杂类草中的很多物种与全氮、土壤含水量间极显著负相关( $P < 0.01$ ),而与容质量、土壤温度间极显著正相关( $P < 0.01$ )。这一研究结果仅仅表明在土壤全氮、土壤含水量等因子相对较高,土壤容质量等相对较低时更有利于莎草科、禾本科植物的分布与生长;而当土壤全氮、土壤含水量等因子含量相对较低,土壤容质量相对较高时对杂类草分布和生长的影响要小于莎草科等植物,并不代表杂类草就适合在较低氮磷含量条件下分布与生长。从高寒草甸退化实际看,当草地土壤养分匮乏、土壤退化严重时,草地植物群落中所有植物都受到极为不利的影 响,植被总盖度往往低于20%<sup>[38]</sup>,群落地上部生物量大幅度减少,而这种状态在添加氮、磷等养分后可以得到改善<sup>[39]</sup>。

高寒草甸生态系统在青藏高原空间异质性强,草地退化情况以及土壤因子变化极其复杂,在今后开展关于高寒草地植被与土壤因子相关性研究时,应以更多的研究样地为样本,纳入更多的土壤因子指标,如土壤微生物、土壤活性有机碳、土壤基础呼吸等,以期在更广的维度反映自然规律,深刻揭示高寒草甸植物与土壤因子间的关系,揭示草地退化时植被退化、土壤退化的发生机理,为

研究和治理高寒草甸生态系统问题提供科学依据。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 周丽,张德罡,负旭江,等.退化高寒草甸植被与土壤特征[J].草业科学,2016,33(11):2196-2201.  
ZHOU L,ZHANG D G,YUN X J,*et al.* The vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadow[J]. *Pratacultural Science*,2016,33(11):2196-2201.
- [2] 张法伟,王军邦,林丽,等.青藏高原高寒嵩草草甸植被群落特征对退化演替的响应[J].中国农业气象,2014,35(5):504-510.  
ZHANG F W,WANG J B,LIN L,*et al.* Response of plant community of alpine *Kobresia* meadow to degradation succession in Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*,2014,35(5):504-510.
- [3] 林丽,李以康,张法伟,等.高寒矮嵩草群落退化演替系列氮磷生态化学计量学特征[J].生态学报,2013,33(17):5245-5251.  
LIN L,LI Y K,ZHANG F W,*et al.* Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humilis* meadows in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2013,33(17):5245-5251.
- [4] 宗宁,石培礼,蒋婧,等.浅耕对西藏高原退化草甸土壤和植物群落特征的影响[J].草业科学,2014,31(1):8-14.  
ZONG N,SHI P L,JIANG J,*et al.* Effects of shallow plowing on soil and plant community of degraded alpine meadow in Tibetan Plateau[J]. *Pratacultural Science*,2014,31(1):8-14.
- [5] 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.  
SHI H X,HOU X Y,SHI SH L,*et al.* Relationships between plant diversity, soil property and productivity in an alpine meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*,2015,24(10):40-47.
- [6] 张生楹,张德罡,柳小妮,等.东祁连山不同退化程度高寒草甸土壤养分特征研究[J].草业科学,2012,29(7):1028-1032.  
ZHANG SH Y,ZHANG D G,LIU X N,*et al.* Soil nutrient characteristics of alpine meadow at different degradation degrees in eastern Qilian Mountains[J]. *Pratacultural Science*,2012,29(7):1028-1032.
- [7] 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.  
CHEN SH Y,ZHANG D G. Potassium variation in alpine meadow soil at different degeneration stages[J]. *Grassland and Turf*,2013,33(3):74-77.
- [8] 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.  
LUO Y Y,ZHANG Y,ZHANG J H,*et al.* Soil stoichiometry characteristics of alpine meadow at its different degrada-

- tion stages[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 254-260.
- [9] 刘淑丽, 林丽, 张法伟, 等. 放牧季节及退化程度对高寒草甸土壤有机碳的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(1): 11-18.  
LIU SH L, LIN L, ZHANG F W, *et al.* Effects of grazing season and degradation degree on the soil organic carbon in alpine meadow[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 11-18.
- [10] 刘育红, 魏卫东, 温小成, 等. 退化高寒草甸土壤有机碳组分特征[J]. *西北农业学报*, 2015, 24(2): 168-174.  
LIU Y H, WEI W D, WEN X CH, *et al.* Characteristics of soil organic carbon fractions in alpine meadow with different degradation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2015, 24(2): 168-174.
- [11] 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.  
LIU SH L, LIN L, DU Y G, *et al.* The variation of soil inorganic carbon of alpine meadow at different degeneration stages in Qinghai province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1290-1296.
- [12] 林丽, 张法伟, 李以康, 等. 高寒矮嵩草草甸退化过程土壤碳氮储量及 C/N 化学计量学特征[J]. *中国草地学报*, 2012, 34(3): 42-47.  
LIN L, ZHANG F W, LI Y K, *et al.* The soil carbon and nitrogen storage and C/N metrological characteristics of chemistry in *Kobresia humilis* meadow in degradation succession stages[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(3): 42-47.
- [13] 魏卫东, 刘育红. 不同退化程度高寒草地土壤微生物量碳特征分析[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(2): 205-210.  
WEI W D, LIU Y H. Characteristics analysis of soil microbial biomass carbon on different degraded degree on alpine grassland[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(2): 205-210.
- [14] 孙哲, 王一博, 刘国华, 等. 基于多重分形理论的多年冻土区高寒草甸退化过程中土壤粒径分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 980-990.  
SUN ZH, WANG Y B, LIU G H, *et al.* Heterogeneity analysis of soil particle size distribution in the process of degradation of alpine meadow in the permafrost regions based on multifractal theory[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 980-990.
- [15] 魏茂宏, 林慧龙. 江河源区高寒草甸退化序列土壤粒径分布及其分形维数[J]. *应用生态学*, 2014, 25(3): 679-686.  
WEI M H, LIN H L. Soil particle size distribution and its fractal dimension among degradation sequences of the alpine meadow in the source region of the Yangtze and Yellow River, Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 679-686.
- [16] 尤全刚, 薛娟, 彭飞, 等. 高寒草甸草地退化对土壤水热性质的影响及其环境效应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1183-1192.
- YOU Q G, XUE L, PENG F, *et al.* Alpine meadow degradation effect on soil thermal and hydraulic properties and its environmental impacts[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(5): 1183-1192.
- [17] 张泉, 刘咏梅, 杨勤科, 等. 祁连山退化高寒草甸土壤水分空间变异特征分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 88-94.  
ZHANG Q, LIU Y M, YANG Q K, *et al.* Analysis of the spatial variability of soil moisture in degrading alpine meadow in the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 88-94.
- [18] 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J]. *草业学报*, 2014, 23(3): 8-19.  
HU L, WANG CH T, WANG G X, *et al.* Changes in the activities of soil enzymes and microbial community structure at different degradation successional stages of alpine meadows in the headwater region of Three Rivers, China[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2014, 23(3): 8-19.
- [19] 魏卫东, 刘育红. 三江源区高寒草甸退化对土壤呼吸的影响[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014(19): 102-105.  
WEI W D, LIU Y H. Effects of alpine meadow degradation on soil respiration in the source area of Three Major Rivers of China[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014(19): 102-105.
- [20] 任继周. *草业科学研究方法*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 95.  
REN J ZH. *Research Methods of Pratacultural Science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 3-15.
- [21] 赵新全. 三江源区退化草地生态系统恢复与可持续管理[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 127-128.  
ZHAO X Q. *Ecosystem Restoration and Sustainable Management of Degraded Grassland in the Source Area of Three Major Rivers of China*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 127-128.
- [22] 张甘霖, 龚子同. *土壤调查实验室分析方法*[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 38-80.  
ZHANG G L, GONG Z T. *Soil Survey Laboratory Methods*[M]. Beijing: Science Press, 2012: 38-80.
- [23] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-38.  
BAO SH D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 30-38.
- [24] 陈丽琼. 比重计法测定土壤颗粒组成的研究[J]. *环境科学导刊*, 2010, 29(4): 97-99.  
CHEN L Q. Research on structure of soil particle by hydrometer method[J]. *Environmental Science Survey*, 2010, 29(4): 97-99.
- [25] FRANKLIN J, WISER S K, DRAKE D, *et al.* Environment, disturbance history and rain forest composition across the islands of Tonga, Western Polynesia[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2006, 17: 233-244.

- [26] LEGENDRE P, LEGENDRE L. Numerical Ecology [M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 126.
- [27] 王 兴, 宋乃平, 杨新国, 等. 荒漠草原弃耕地恢复草地土壤与植被的 RDA 分析[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 90-97. WANG X, SONG N P, YNAG X G, *et al.* Redundancy analysis of soil vegetation of recovered grassland on abandoned land in the desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2): 90-97.
- [28] 白晓航, 张金屯, 曹 科, 等. 小五台山亚高山草甸的群落特征及物种多样性[J]. 草业科学, 2016, 33(12): 2538-2543. BAI X H, ZHANG J T, CAO K, *et al.* Community characteristics and species diversity of subalpine meadows in Xiaowutai Mountain [J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(12): 2538-2543.
- [29] 郇 威, 卢振兰, 孔维静, 等. 太子河河岸带土壤理化性质特征及其与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2013, 32(1): 90-97. LI W, LU ZH L, KONG W J, *et al.* Physical and chemical properties of riparian soils in the Taizi river basin and their relationship with environmental factors [J]. *Ecological Science*, 2013, 32(1): 90-97.
- [30] 李立新, 陈英智. 退化演替对高山草地植被和土壤理化特性影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 40-43. LI L X, CHEN Y ZH. Effect of degradation succession on vegetation and soil physical and chemical characteristics in alpine grassland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4): 40-43.
- [31] 许加星, 徐力刚, 姜加虎. 鄱阳湖典型洲滩植物群落结构变化及其与土壤养分的关系[J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 186-191. XU J X, XU L G, JIANG J H. Change of vegetation community structure and the relationship between it and soil nutrients in typical beaches in Poyang lake area[J]. *Wetland Science*, 2013, 11(2): 186-191.
- [32] 张发伟, 郭竹筠, 李以康, 等. 青海湖芨芨草干草原植被退化对土壤温湿特征的影响[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 219-225. ZHANG F W, GUO ZH J, LI Y K, *et al.* Effect of soil temperature and volumetric moisture content on vegetation degeneration over the *Achnatherum splendens* steppe around the Qinghai Lake[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(2): 219-225.
- [33] 刘 蓉, 张卫国, 江小雷, 等. 垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 96-103. LIU R, ZHANG W G, JIANG X L, *et al.* Study on the characteristics of degradation succession of *Elymus nutans* community and its correlation to soil properties[J]. *Pratacultural Science*, 2010, 27(10): 96-103.
- [34] 赵景学, 曲广鹏, 多吉顿珠, 等. 藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 105-108. ZHAO J X, QU G P, DUO JIDUNZHU, *et al.* Relationship between species diversity and soil factors of alpine grasslands in north Tibet[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(6): 105-108.
- [35] 保 娅, 达哇卓玛. 高山嵩草群落生物多样性与土壤养分的相关性研究[J]. 青海草业, 2015, 24(2): 12-15. BAO Y, DAWAZHUMA. Study on relationship between *Kobresia pygmaea* community biodiversity and soil nutrition [J]. *Qinghai Pratacultural*, 2015, 24(2): 12-15.
- [36] 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1298-1305. LUO Y Y, MENG Q T, ZHANG J H, *et al.* Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadows in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1298-1305.
- [37] 彭 亿, 李裕元, 李忠武, 等. 亚热带稻田弃耕湿地土壤因子对植物群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1543-1550. PENG Y, LI Y Y, LI ZH W, *et al.* Effects of soil factors on vegetation community structure in an abandoned subtropical paddy wetland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1543-1550.
- [38] 辛有俊, 杜铁瑛. 青海天然草地退化及恢复研究[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2013, 53. XIN Y J, DU T Y. Natural Grassland Degradation and Its Rehabilitation in Qinghai [M]. Xining: Qinghai People Press, 2013: 53.
- [39] 杨元武, 周华坤, 李希来, 等. 高寒草甸物种多样性和生产力对样方添加的初期响应[J]. 西北农业学报, 2017, 26(2): 159-166. YANG Y W, ZHOU H K, LI X L, *et al.* Initial response of species diversity and productivity to nutrients addition on alpine mesdow [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(2): 159-166.

# Redundancy Analysis on Relationships Between Grassland Vegetation and Soil Factors on Degraded Alpine Meadow

LIU Yuhong, WEI Weidong, YANG Yuanwu and ZHANG Ying

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract** In order to study the relationships between vegetation and soil factors on alpine meadow degraded grassland, the study plots were set up to observe the characteristics of plant community. Soil samples were collected and the main physical and chemical properties of soil were analyzed. Using degraded grassland vegetation-Matrix and based on the basic principles of quantitative ecology, the redundancy analysis was conducted. The results showed that the dominance degree of alpine meadow plant community decreased with aggravation of the grassland degradation, such as *Kobresia pygmaea* of sedge family and *Elymus nutans* of the grass family. On the contrary, poisonous forbs showed conspicuous increasing tendency, such as *Ligularia virgaurea* of forb and *Oxytropis ochrocephala* of pea family. In the RDA sorting map, the first ordinal axis reflected the degradation degree of alpine meadow and the synthesize variation of soil temperature, bulk density, soil water content, total nitrogen and other factors; the second order axis reflected the comprehensive change of soil mechanical composition. The first and second sorting axes could explain 74.5% of the vegetation variation and 83.2% of the vegetation-soil relationship. The results also showed that extremely significant correlation between the degraded grassland vegetation and soil factors, extremely significant positive correlation between Cyperaceae and Gramineae plants with soil organic carbon, total nitrogen and soil water content, and extremely significant negative correlation with bulk density and soil temperature. In addition, there was a extremely significant negative correlation between forbs and leguminous plants with soil organic carbon, total nitrogen and soil water content, an extremely significant positive correlation with bulk density and soil temperature. The results of 13 soil factors marginal test also showed that soil temperature, bulk density, available nitrogen, total nitrogen were more closely related to degraded grassland vegetation. Redundancy analysis of degraded grassland vegetation-soil factor data reflected the close relationship between degraded grassland vegetation and soil factors, and different soil factors had different effects on grassland vegetation distribution.

**Key words** Alpine meadow; Degraded grassland; Vegetation; Soil factor; Redundancy analysis; Correlation

**Received** 2017-08-18      **Returned** 2017-10-16

**Foundation item** The National Natural Science Foundation of China(No. 31460151, No. 31560167); the Project of Applied & Basic Research of Qinghai Science and Technology Department(No. 2015-ZJ-715).

**First author** LIU Yuhong, female, master, professor. Research area: soil science of alpine grassland. E-mail:469964723@qq.com

**Corresponding author** WEI Weidong, male, master, professor. Research area: ecological environment of alpine grassland. E-mail:qhweidong@163.com