

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0407

孙华方, 李希来, 金立群, 张静. 黄河源区建植 17 年栽培草地退化响应因子分析. 草业科学, 2019, 36(5): 1240-1248.

SUN H F, LI X L, JIN L Q, ZHANG J. Analysis of degradation response factors of a 17-year-old pasture in the source area of the Yellow River. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1240-1248.

黄河源区建植 17 年栽培草地退化响应因子分析

孙华方¹, 李希来^{1,2}, 金立群¹, 张静¹

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院西北高原生物研究所 / 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 青海 西宁 810008)

摘要: 为防止高寒地区栽培草地的退化, 以黄河源区玛沁县大武滩建植 17 a 的单播垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 栽培草地为研究对象, 调查栽培草地不同退化区 (重度退化、中度退化、对照区) 土壤养分和植物群落特征, 共 18 个响应指标。研究表明: 重度退化、中度退化、未退化 (对照) 栽培草地土壤养分含量之间差异不显著 ($P > 0.05$); 未退化栽培草地垂穗披碱草、禾本科 (Poaceae)、杂类草 (Forbs) 盖度分别与中度、重度退化之间具有极显著差异 ($P < 0.01$), 中度退化区植物多样性指数最大, 未退化与退化草地之间 Simpson 指数差异显著 ($P < 0.05$)。利用随机森林法分析不同退化指标对退化程度敏感度大小的响应, 结果发现: 植物群落特征禾本科盖度、生殖枝数量对退化程度响应最敏感, 禾本科植物盖度小于 65% 以下时不能作为监测栽培草地是否发生退化的重要指标; 而土壤有机质含量、全氮含量对退化程度响应不敏感, 说明建植 17 年栽培草地的土壤理化性质已趋于稳定。故在监测调查栽培草地退化时, 禾本科植物盖度可作为重要的评价依据。

关键词: 栽培草地; 不同退化程度; 响应因子; 敏感性; 随机森林法; 植被群落特征; 土壤特征

中图分类号: S812 文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2019)05-1240-09

Analysis of degradation response factors of a 17-year-old pasture in the source area of the Yellow River

SUN Huafang¹, LI Xilai^{1,2}, JIN Liqun¹, ZHANG Jing¹

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;

2. Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Regions of Qinghai Province / Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: To study the degradation of pastures in the alpine region, a 17-year-old pasture (dominant species was *Elymus nutans*) in the DaWu source area of the Yellow River was studied. We investigated the soil nutrients and plant community characteristics of pastures degraded to different degrees (severe degradation, moderate degradation, and non-degradation control area), which included 18 response factors. The results showed that there was no significant difference in soil nutrients among the non-degradation, moderate, and severe degradation pastures ($P > 0.05$). The difference in the coverage of *E. nutans*, Poaceae, and forbs between the moderate and severe degradation pastures was highly significant ($P < 0.01$). The plant diversity index in the moderate degradation area was higher than that of the other two pastures, and there was a significant difference in the Simpson index between the non-degradation and degradation pastures ($P < 0.05$). The different

收稿日期: 2018-07-02 接受日期: 2019-01-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501903); 青海省科技厅项目 (2017-HZ-802、2017-S-1-01、2018-ZJ-781); 青海省“高端创新人才千人计划”; 教育部长江学者和创新团队发展计划 (IRT_17R62); 高等学校学科创新引智计划 (D18013)

第一作者: 孙华方 (1991-), 女, 山东东明人, 在读硕士生, 主要从事草地生态与环境保护方面的研究。E-mail: 1219493914@qq.com

通信作者: 李希来 (1964-), 男, 河南孟津人, 博导, 教授, 博士, 主要从事高寒草甸生态学和高原生态修复的研究。E-mail: xilai-li@163.com

<http://cykx.lzu.edu.cn>

responses of 18 factors of the degraded pasture were analysed with the random forest method. Plant community characteristics such as *E. nutans* coverage and reproductive branch number were found to be more sensitive to degradation than the other response factors. Poaceae coverage less than 65% could not be used as an indicator to monitor the degradation of pastures. Soil organic matter content and total nitrogen content were insensitive to the degree of degradation, which indicated that the soil physical and chemical properties of pastures had stabilised during the past 17 years. Therefore, the coverage of Poaceae plants could be used as an important evaluation base for monitoring and investigating the degradation of pastures.

Keywords: pasture; degradation degree; response factor; sensitivity; random forest method; plant community characteristics; soil characteristics

Corresponding author: LI Xilai E-mail: xilai-li@163.com

近年来，由于全球气候变化和频繁的人类活动干扰，草原生态系统不断退化，中度退化草地约占青藏高原草地面积的55.4%^[1]。草地退化已严重影响青藏高原生态平衡及我国大部分区域的生态安全。黄河源地区处青藏高原腹地，环境恶劣，生境脆弱，该地区草地同样面临着严峻的退化现象。目前退化草地的恢复措施有多种，主要可分为两种，一是充分依靠原有植被，进行人工干预，通过补播改良措施、围栏封育等形式建立半栽培草地；二是通过农艺耕作措施，进行翻耕建立栽培草地^[2-4]。建立栽培草地、半栽培草地等恢复措施能够明显改善土壤理化性质，增加表层土壤养分^[5-7]，提高地上生物量与草地生产力^[8]，是恢复退化天然草地的有效途径^[9]。栽培草地与天然草地不同，其生态结构单一，系统稳定性差，极易发生退化，再次形成“黑土滩”^[10]，所以研究与分析栽培草地的退化现象十分重要。

黄河源区栽培草地的利用方式多为放牧利用，放牧的频率与强度决定草地的演替方向。适宜的放牧强度下，栽培草地逐渐趋于正向演替，不合理的利用栽培草地极易发生退化。本研究栽培草地利用方式为冬季放牧，由于利用比较合理，栽培草地得以维持，其生态系统逐渐稳定。通过对栽培草地群落结构及土壤理化性质的调查研究，能够及时掌握栽培草地演替的动态变化，对退化栽培草地适时人工干预，能够有效地促进栽培草地健康发展，促使其逐渐恢复形成天然草地。目前，已有学者对三江源退化栽培草地植物群落结构、土壤理化性质等方面^[11-12]进行研究，但大部分栽培草地由于建植年限较短，草地植物群落结构、土壤理化性质不稳定，栽培草地容易发生退化。对

于建植时间较长、稳定性较强的栽培草地是否会出现退化，退化状况与关键因子分析鲜有文献报道。本研究选取黄河源区果洛州玛沁县大武滩上建植17年且局部已经发生不同程度退化的单播垂穗披碱草(*Elymus nutans*)栽培草地为研究对象，通过对该栽培草地不同退化程度区域地上植被与土壤养分的调查研究，分析不同退化程度植被与土壤养分变化规律，为退化栽培草地的治理提供参考依据。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区域概况

栽培草地位于果洛州大武镇(34°28.28' N, 100°13.57' E)，海拔3 752 m。年平均气温-0.6℃，最高气温26.6℃，最低气温-34.9℃。最大温差22.4℃，属高原大陆性气候。年均降水量443 mm，平均蒸发量1 462.4 mm，最大冻土深度246 cm，土壤为高山草甸土。

调查样地为单播垂穗披碱草栽培草地，建植时间为2000年5月，建植面积约为2.5 hm²，试验调查面积为100 m × 100 m，栽培草地建植之前属于典型“黑土滩”退化草地，原生植被不足10%，且优势种莎草科(Cyperaceae)植物被毒杂草取代，主要有铁棒槌(*Aconitum szechenyianum*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)等。栽培草地所用草种由当地草籽繁殖场提供，垂穗披碱草播量为45 kg·hm⁻²，施肥量为45 kg·hm⁻²磷酸二铵复合肥。农艺措施为：深翻—耙平—施肥—撒种—覆土—镇压—围栏封育，并使用

C-型肉毒素控制高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*) 种群密度, 详见马玉寿等^[13]报道。该栽培草地利用方式为冬季放牧(每年 12 月至次年 4 月), 生长季围栏封育, 完全禁牧。

1.2 研究方法

1.2.1 样方调查及植物多样性计算方法

2017 年 8 月在样地上采用样线样方调查法获取数据。栽培草地退化等级的判断参照《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级标准》(GB19377-2003)^[14]; 确定样地内未退化 (no degradation, ND) 区域、中度退化 (moderate degradation, MD) 区域、重度退化 (severe degradation, SD) 区域, 调查区各退化面积分别约为 0.77、0.06、0.17 hm²。以未退化栽培草地区域为中心, 设置长 30 m 样线, 确保样线经过中度退化区和重度退化区, 分别在不同退化区域中部, 距离样线 0.5 m 处设置 1 个 0.5 m × 0.5 m 的样方调查, 样线重复 6 次, 每个退化区各取 6 个样方, 共 18 个样方。地上植被特征指标包括植被总盖度, 不同功能类群(禾本科、莎草科、杂类草)分盖度、高度、生殖枝数量, 生物土壤结皮 (biological soil crusts, BSCs) 盖度及厚度。

植物多样性计算:

重要值 $P_i = (n_i / N + c_i / C + h_i / H) / 3$;

Shannon-Wiener 指数: $H' = -\sum P_i \times \ln P_i$;

Pielous 均匀度指数: $J' = H' / \ln S$;

Simpson 指数: $D = 1 - \sum P_i^2$ 。

式中: P_i , 第 i 种植物的重要值; n_i , 第 i 种植物个体数; c_i , 第 i 种植物盖度; h_i , 第 i 种植物高度; N , 样方内总个体数; C , 样方总盖度; H , 样方内植物高度; H' , 多样性指数; J' , 均匀度指数; S , 群落中植物的种数; D , 生态优势度指数。

1.2.2 土壤采集及化学性质测定方法

在调查植被后, 用小铲随机挖取同一样方内 3 个位置的 0–10 cm 土样混合, 自封袋封装, 记号笔标记带至实验室分析。野外采取土样时注意去除所调查样方内取土位置的地表覆盖植被(包括生物土壤结皮)以及凋落物。测定所采集土壤的全氮 (total nitrogen, TN)、全磷 (total phosphorus, TP)、全钾 (total potassium, TK)、速效氮 (available nitrogen, AN)、速效磷 (available phosphorus, AP)、速效钾 (available potassium, AK)、有机质 (soil organic matter, SOM)、pH

等指标。

电位法测定土壤 pH; 重铬酸钾–H₂SO₄ 氧化–(油浴) 外加热法测定土壤有机质; 半微量凯氏定氮法测定全氮; “碱解–钼锑抗比色法”测定土壤全磷; “碱熔–火焰光度”法测定土壤全钾; “碱解–扩散”法测定土壤速效氮; “盐酸–硫酸浸提法”测定土壤速效磷; “中性 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提–火焰光度法”测定土壤速效钾, 具体参照张万儒^[15]的《森林土壤分析法》。

1.2.3 统计分析

运用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析 (ANOVA), 使用 R 语言调用随机森林程序分析各个响应因子对栽培草地退化的敏感性。

随机森林分析法: 随机森林 (random forest, RF), 是由 Leo Breiman 和 Adele Cutler 最早提出的一种利用随机抽样进行决策树构建的集成算法^[16], 该分析方法可以定量分析自变量与因变量之间的相互关系, 一般评价指标为平均准确率降低度与平均基尼指数递减度。随机森林法能同时处理大量数据, 并且在数据缺失的情况下还能保持高的准确度, 而且该方法简单易学, 故广泛应用于各个领域。

2 结果与分析

2.1 退化栽培草地土壤及植被的调查

未退化、中度退化、重度退化栽培草地表层 (0–10 cm) 土壤养分无显著差异 ($P > 0.05$) (表 1)。全氮、全磷、速效钾随着退化分别从 4.45 g·kg⁻¹、1.43 g·kg⁻¹、257.5 mg·kg⁻¹ 降低至 4.21 g·kg⁻¹、1.29 g·kg⁻¹、205.00 mg·kg⁻¹, 全钾、速效氮、有机质、速效磷含量随着退化呈“V”字型分布。土壤 pH 随着退化逐渐接近 7。总体趋势来看, 未退化区的土壤养分含量略高于其他退化的土壤养分含量。

不同退化程度区域植物群落特征调查发现 (表 2), 未退化区和中度退化区的地上植被总盖度无显著差异 ($P > 0.05$), 但未退化区显著高于重度退化区的总盖度 ($P < 0.05$)。随着草地的退化, 植物多样性增加。各退化区的禾本科盖度随着退化加剧迅速下降, 且差异极显著 ($P < 0.01$)。未退化区的禾本科植物盖度高达 80% 以上, 中度退化区的禾本科盖度降为未退化区的一半, 而重度退化区的禾本科盖度仅有 6%。莎草科植物主要分布在

表 1 不同退化程度土壤养分调查结果
Table 1 Effect of different degrees of degradation on soil nutrients

退化程度 Degree of degradation	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	速效氮 Available nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(mg·kg ⁻¹)	土壤有机质 Soil organic matter/(g·kg ⁻¹)	pH
未退化 No degradation	4.45 ± 0.36a	1.43 ± 0.08a	24.64 ± 1.37a	272.67 ± 41.56a	5.97 ± 2.01a	257.5 ± 40.08a	70.01 ± 7.88a	7.26 ± 0.31a
中度 Moderate degradation	4.06 ± 0.47a	1.31 ± 0.18a	24.19 ± 1.51a	233.00 ± 61.85a	4.33 ± 0.95a	205.17 ± 55.32a	63.80 ± 11.74a	7.06 ± 0.19a
重度 Severe degradation	4.21 ± 0.66a	1.29 ± 0.07a	24.48 ± 0.72a	244.83 ± 71.19a	4.63 ± 1.53a	205.00 ± 47.95a	66.91 ± 10.88a	7.06 ± 0.05a

同列不同小写字母表示表层土壤不同退化程度间差异显著(P < 0.05)。

Different lowercase letter in the same column indicates significant differences among different degradations at the 0.05 level.

表 2 不同退化程度植物群落特征调查结果
Table 2 Investigation of plant community characteristics under different degrees of degradation

退化程度 Degree of degradation	总盖度 Total coverage/%	生物土壤 结皮盖度 Coverage of BSC/%	禾本科盖度 Coverage of Poaceae/%	莎草科盖度 Coverage of Cyperaceae/%	杂类草盖度 Coverage of forbs/%	生殖枝数 Number of reproductive branches/ (branch·m ⁻²)	Simpson指数 Simpson index	Shannon-Wiener指数 Shannon- Wiener index	Pielou均匀度指 Pielou index
未退 No degradation	60.83 ± 20.10Aa	34.33 ± 15.79Aa	84.33 ± 9.61Aa	0.00 ± 0.00Bb	19.83 ± 9.30Bc	401.83 ± 211.30Aa	0.66 ± 0.08Aab	1.36 ± 0.25Ab	0.30 ± 0.21Aa
中度 Moderate degradation	10.83 ± 13.57Bb	45.83 ± 18.55Aa	43.17 ± 8.01Bb	10.33 ± 10.48Aa	45.00 ± 23.61Ab	219.67 ± 125.16ABb	0.70 ± 0.14Aa	1.79 ± 0.36Aa	0.31 ± 0.21Aa
重度 Severe degradation	3.33 ± 8.16Bb	76.67 ± 8.16Ab	6.00 ± 9.49Cc	11.33 ± 11.66Aa	73.17 ± 15.17Aa	2.33 ± 5.24Bc	0.81 ± 0.03Aa	1.77 ± 0.20Aa	0.26 ± 0.04Aa

同列不同大写字母表示植被群落特征不同退化程度间差异极显著(P < 0.01); 不同小写字母表示植被群落特征不同退化程度间差异显著(P < 0.05)。

Different capital letters in vegetation characteristics indicate significant differences among different degradations at the 0.01 level. Different lowercase letters in vegetation characteristics indicate significant differences among different degradations at the 0.05 level.

有退化现象的区域，但盖度很低，仅有 10% 左右。随退化程度加剧，杂类草迅速增加，重度退化区杂草盖度高达 73.17%，是未退化区域的 3.7 倍 ($P < 0.01$)。草地退化对生物土壤结皮盖度没有显著影响。

2.2 栽培草地退化响应因子敏感度分析

18 个土壤养分与植物群落特征响应因子敏感度排列顺序如图 1 所示。结果表明，禾本科盖度、生殖枝数量、垂穗披碱草盖度、杂类草盖度等因子敏感度较大。而土壤养分如土壤有机质、土壤氮素等因子对退化的响应不敏感。这说明建植 17 年栽培草地地上植物群落特征相对于土壤养分含量对退化比较敏感，而土壤养分含量对退化的敏感度较小，这也说明建植 17 年栽培草地土壤化学特征基本趋于稳定。

基于各响应因子敏感度排序结果 (图 1) 选取禾本科盖度、生殖枝数、垂穗披碱草盖度等 6 个响应因子单独进行分析 (图 2)，结果表明禾本科盖度、生殖枝数量和群落总盖度数值越大对退化的响应越大。当禾本科植物盖度小于 64.4% 时，对草地退化不敏感，故禾本科植物盖度小于 65% 以下时不能作为监测栽培草地是否发生退化的指标；当禾本科盖度为 73.6% 时，其响应达到最大。就生殖枝

而言，当其数量在 $486 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-2}$ 时，该因子对草地退化敏感性最大。垂穗披碱草的敏感度变化趋势是先降低再升高，在盖度为 50.13% 时达到最大。杂类草的变化趋势与 Shannon-Wiener 指数相似，都呈下降趋势。总盖度对草地退化的响应程度的大小呈现急速上升的趋势。

3 讨论

3.1 不同退化栽培草地土壤与植被特征变化

由于本研究栽培草地利用方式为冬季放牧，放牧活动对草地影响较小，有利于土壤养分的积累。栽培草地退化区虽说植被覆盖度低，但地表生物土壤结皮覆盖较大，对防止风蚀、水蚀的发生以及土壤养分的积累有十分重要的作用，所以不同退化程度栽培草地土壤养分含量差异不大。栽培草地植被群落特征的变化规律与土壤养分不同，随着栽培草地退化的发生，地上植被分布具有明显差异。禾本科植物多生长在未退化区域，退化的栽培草地禾本科植物盖度迅速降低，由未退化区的 84.3% 下降到 6%。有研究表明，随着栽培草地的退化，土壤含水量降低^[16]，而毒杂草的生长趋向于干燥的地方^[17]，这与本研究结果毒杂草大多分布在退化区域一致。在退化区局部地方生长着少

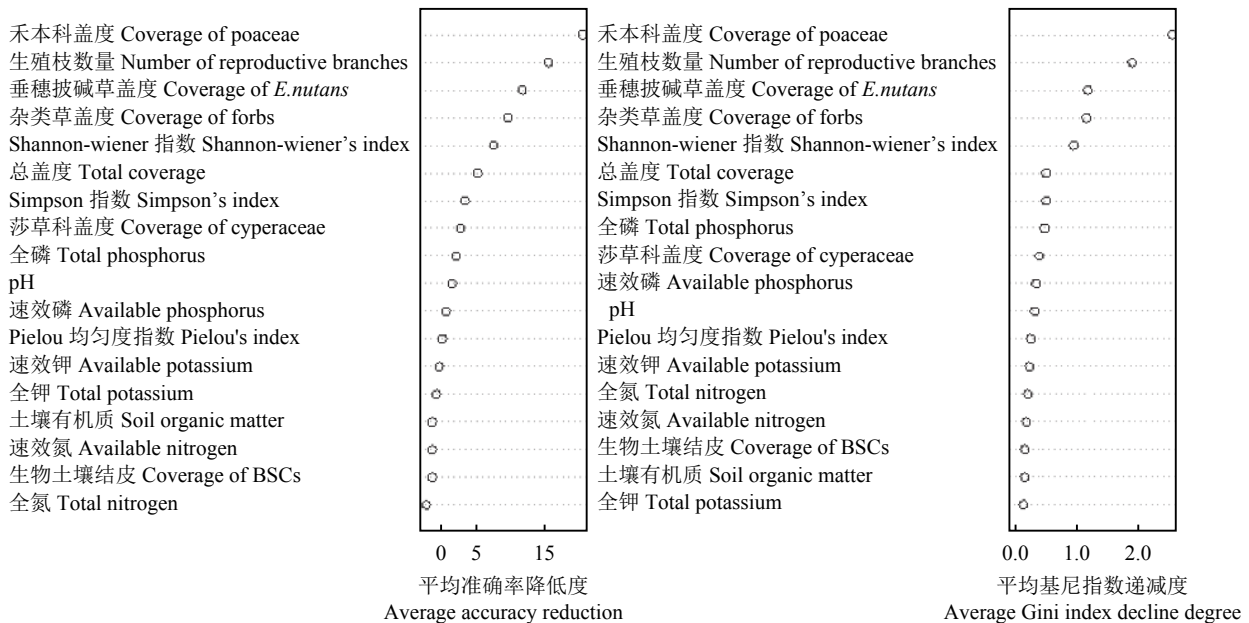


图 1 不同退化栽培草地响应因子的重要性排序
Figure 1 Rank of response factors affecting different degraded pasture

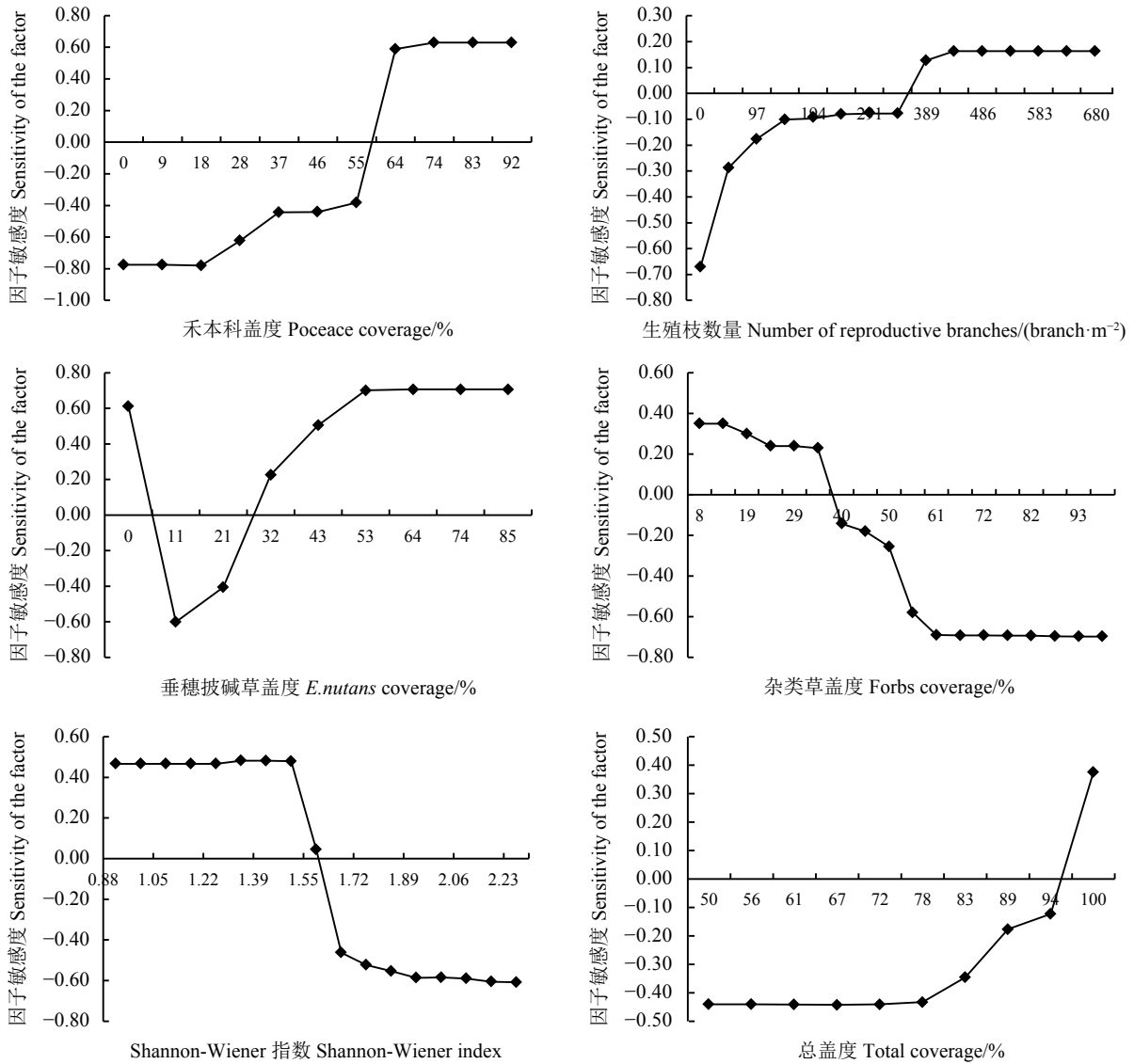


图 2 不同因子对栽培草地退化的敏感性

Figure 2 Sensitivity of different response factors on pasture degradation

量的高草属 (*Kobresia*) 植物，这是由建植初期机械作业翻耕未打碎所遗留在地表的原生草皮上的蒿草逐渐繁殖而成。随着栽培草地的退化，植物多样性增加，该结果与陈莉敏等^[18]的研究结果基本一致。引起该结果的原因可能是该样地未退化区主要以垂穗披碱草为优势种，限制了其他物种入侵，降低了植物多样性。伴随着退化情况的发生，披碱草单一物种的生态优势度逐渐降低，物种的入侵，使物种组成及群落结构多样化、复杂化，增加了物种多样性。

3.2 栽培草地退化响应因子敏感性分析

栽培草地的建立与后续演替受到诸多方面的影

响，如气候、生态因子以及人为活动(如过度放牧活动等)等。有研究表明气候变化对草地退化影响很大，贡献率为 45.51%^[19]，也有学者提出在小尺度范围内，生态因子起主要重要作用^[20]。目前，分析退化栽培草地的方法大多集中在传统的数理统计分析上，而生态因子交互性强，彼此之间相互影响，使传统方法处理结果准确性降低。本研究利用的随机森林分析法具有交互作用不敏感的优点，能够快速准确分析各个因子的重要性^[21]。

草地退化是生态系统受到严重破坏而不能自我调节^[22-23]，结构、功能丧失后，草地生态系统发生的一系列变化，植被分布特点发生改变，土壤养

分含量发生变化等,但各不同响应因子的响应程度不同。通过运用随机森林法分析各响应因子的敏感性发现(图1),植物群落特征在草地发生退化时响应较土壤迅速,这是因为植物作为地表覆盖物首先受到外界不良条件的影响,一定程度上植被可抵御外界对土壤的直接伤害,减缓了土壤性质的变化速度。通过进一步分析不同植被特征的敏感性发现,禾草类盖度、生殖枝数、垂穗披碱草盖度以及杂类草盖度等因子对栽培草地退化非常敏感。该栽培草地的主要利用方式为冬季放牧,禾草类植物作为主要优势种群,同时也作为适口性较好的优良牧草,在草场利用时,局部过重的放牧活动导致禾草类植物盖度降低,引发啮齿动物大量增多,引起草地退化,而随着草地退化,原优势种禾草类植物优势度消失,土壤水分降低,对水分敏感的杂类草迅速取代禾草类植物成为退化区的优势种植物。本研究生殖枝多为禾草类植物的生殖枝,故其变化与禾草类盖度变化趋势相似。优势种的变化代表植被向自然草甸或退化草地的演替,但植被的正向演替是一个十分漫长的过程,有时甚至需要上百年,而草地退化速度则可以很快。与之相比,建植17a的栽培草地向天然高寒草甸演替还需要很长时间。所以,人工草地中若优势植物短时间内有减少趋势时,该栽培草地可能会发生退化,补播禾草、施

加肥料^[24-25]等方法可以预防栽培草地退化。

栽培草地退化区地上禾草类植物已被大量杂草取代,并有大面积秃斑地,虽说不同退化程度土壤养分含量差异不明显,但依然呈减少趋势,该结果与伍星等^[12]、Ren等^[26]的研究结果趋势一致。本研究栽培草地原生植被优势种嵩草属植物比较少,且土壤养分含量与原生高寒草甸养分含量相差较大^[15,27],所以在栽培草地治理的过程中不仅要关注禾本科盖度、总盖度等退化敏感指标,还要施加有机肥等土壤改良措施来促进退化栽培草地恢复。

4 结论

建植17年栽培草地重度退化、中度退化、与不退化区域之间土壤养分含量无显著变化,土壤pH 7.06~7.26,总体呈中性;与此相反,植物群落特征如禾本科盖度、生殖枝数量在未退化、中度退化及重度退化区具有明显差异性($P < 0.05$),植物群落特征在栽培草地发生退化时响应较土壤养分迅速;对比各退化响应因子发现,禾本科盖度、生殖枝数量等因子对草地退化最敏感,故在监测调查栽培草地退化时,禾本科盖度($> 65\%$)可作为重要的评价依据,在治理退化栽培草地时应该从增加植被覆盖度尤其是禾本科植物盖度以及增加土壤养分含量如施加有机肥两方面同时进行。

参考文献 References:

- [1] CHEN G M. The status of the degraded pasture and its strategies of management in Black Beach of the headwater region of the Three River. *Journal of Sichuan Grassland*, 2005(10): 37-44.
- [2] LI X L, PERRY G L W, BRIERLEY G, SUN H Q, LI C H, LU G X. Quantitative assessment of degradation classifications for degraded alpine meadows (Heitutan), Sanjiangyuan, western China Land. *Degradation & Development*, 2015, 25(5): 417-427.
- [3] LI X L, PERRY G, BRIERLEY G J. Grassland ecosystems of the Yellow River Source Zone: Degradation and restoration.//Landscape and ecosystem diversity, dynamics and management in the Yellow River Source Zone. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 137-165.
- [4] LI X L, GAO J, ZHANG J. A topographic perspective on the distribution of degraded meadows and their changes on the Qinghai-Tibet Plateau, West China. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(6): 1574-1582.
- [5] 王平, 孙涛. 高山退化草地不同恢复措施对土壤理化性质的影响. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 31-34.
WANG P, SUN T. Effect of rehabilitation measures on the soil physical and chemical characteristics in the alpine rangeland. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(4): 31-34.
- [6] 王学霞, 董世魁, 李媛媛, 李小艳, 温璐. 三江源区草地退化与人工恢复对土壤理化性状的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 113-117.

- WANG X X, DONG S K, LI Y Y, LI X Y, WEN L. Effects of grassland degradation and artificial restoration on soil physicochemical properties in Three-River headwater. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4): 113-117.
- [7] WU G L, LIU Z H, LEI Z, HU T M, CHEN J M. Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a Black-Soil-type degraded grassland. *Plant & Soil*, 2010, 333(1/2): 469-479.
- [8] 王祥, 郑伟, 朱亚琼, 关正翮, 唐高溶. 人工草地建植对昭苏盆地山地草甸碳水通量特征的影响. *中国草地学报*, 2017, 39(2): 1-10.
- WANG X, ZHENG W, ZHU Y Q, GUAN Z X, TANG G R. Effects of plowing and sowing on carbon and water fluxes in mountain meadow in Zhaosu Basin. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(2): 1-10.
- [9] 牛书丽, 蒋高明. 人工草地在退化草地恢复中的作用及其研究现状. *应用生态学报*, 2004, 15(9): 1662-1666.
- NIU S L, JIANG G M. Function of artificial grassland in restoration of degraded natural grassland and its research advance. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1662-1666.
- [10] 李希来, 黄葆宁. 青海黑土滩草地成因及治理途径. *中国草地学报*, 1995(4): 64-67.
- LI X L, HUANG B N. The cause of "Black Soil Patch" grassland in Qinghai Province and management countermeasures. *Chinese Journal of Grassland*, 1995(4): 64-67.
- [11] 张蕊, 王媛, 马丽娜, 桑潮, 王力, 郭瑞英, 汪海波, 尚占环. 三江源区退化人工草地、“黑土滩”和天然草地植物群落物种多样性. *草地学报*, 2014, 22(6): 1171-1178.
- ZHANG R, WANG Y, MA L N, SANG C, WANG L, GUO R Y, WANG H B, SHANG Z H. Species diversities of plant communities of degraded artificial grassland, "Heitutan" and natural grassland in the "Three-River Headwaters" region. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(6): 1171-1178.
- [12] 伍星, 李辉霞, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究. *中国草地学报*, 2013, 35(3): 77-84.
- WU X, LI H X, FU B J, JIN T T, LIU G H. Study on soil characteristics of alpine grassland in different degradation levels in headwater regions of Three Rivers in China. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(3): 77-84.
- [13] 马玉寿, 施建军, 董全民, 王彦龙, 盛丽. 人工调控措施对“黑土型”退化草地垂穗披碱草人工植被的影响. *青海畜牧兽医杂志*, 2006(2): 1-3.
- MA Y S, SHI J J, DONG Q M, WANG Y L, SHENG L. Effect of artificial control measure on *Elymus nutans*sown grassland vegetation in "Black-Soil-type" degraded grassland. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2006(2): 1-3.
- [14] SU D X, ZHANG Z H, CHEN Z Z, HU X Z. GB19377-2003 Parameters for Degradation, Sandification and Salification of Rangelands. Beijing: Chinese Standards Press, 2003.
- [15] 张万儒. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 1999: 1210-1275.
- ZHANG W R. Analysis Method of Forest Soil. Beijing: China Standard Press, 1999: 1210-1275.
- [16] BREIMAN L. Random forests. *Machine Learning*, 2011, 45(1): 5-32.
- [17] LI Y Y, DONG S K, LIU S, WANG X, WEN L, WU Y. The interaction between poisonous plants and soil quality in response to grassland degradation in the alpine region of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant Ecology*, 2014, 215(8): 809-819.
- [18] 陈莉敏, 郑群英, 泽柏, 杨满业, 肖冰雪, 刘刚. 人工草地退化原因及恢复对策. *草业与畜牧*, 2014(1): 18-21.
- CHEN L M, ZHENG Q Y, ZE B, YANG M Y, XIAO B X, LIU G. The causes of artificial grasslands degradation and their restoration strategy. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2014(1): 18-21.
- [19] GANG C C, ZHOU W, CHEN Y Z, WANG Z Q, SUN Z G, LI J L, QI J G, ODEH I. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [20] WEN L, DONG S K, LI Y Y, SHERMAN R, SHI J J, LIU D M, WANG Y L, MA Y S, ZHU L. The effects of biotic and abiotic factors on the spatial heterogeneity of alpine grassland vegetation at a small scale on the Qinghai-Tibet Plateau (QTP), China.

- Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(10): 8051-8064.
- [21] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用: 以云南松分布模拟为例. 生态学报, 2014, 34(3): 650-659.
ZHANG L, WANG L L, ZHANG X D, LIU S R, SUN P S, WANG T L. The basic principle of random forest and its applications in ecology: A case study of *Pinus yunnanensis*. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 650-659.
- [22] SUTTLEK B, THOMSONM A, POWERM E. Species interactions reverse grassland responses to changing climate. *Science*, 2007, 315: 640-642.
- [23] PONTES L D S, MAIRE V, SCHELLBERG J, LOUAULT F. Grass strategies and grassland community responses to environmental drivers: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(4): 1297-1318.
- [24] 王大明. 试论高寒人工草地施氮的增产效应. 中国草地学报, 1994(2): 76-80.
WANG D M. A discussion on incremental response of to alpine sown pasture N-application. Grassland of China, 1994(2): 76-80.
- [25] LI F R, ZHAO W Z, LUI J L, HUANG Z G. Degraded vegetation and wind erosion influence soil carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in sandy grasslands. *Plant & Soil*, 2009, 317(1/2): 79-92.
- [26] REN G H, SHANG Z H, LONG R J, HOU Y, DENG B. Relationship of vegetation and soil differentiation during the formation of Black-Soil-type degraded meadows in the headwater of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(1): 235-245.
- [27] 冯瑞章, 周万海, 龙瑞军, 马玉寿. 江河源区不同退化程度高寒草地土壤物理、化学及生物学特征研究. 土壤通报, 2010, 41(2): 263-269.
FENG R Z, ZHOU W H, LONG R J, MA Y S. Characteristics of soil physical, chemical and biological properties on degraded alpine meadows in the headwater areas of the Yangtze and Yellow Rivers, Qinghai-Tibetan Plateau. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(2): 263-269.

(责任编辑 张瑾)

2019年第4期《草业科学》审稿专家

白小明	包玉山	曹文侠	柴国华	常生华	方向文	干友民	高英志
何学青	侯扶江	侯向阳	黄迎新	江幸福	解宏图	解新明	寇建村
李春杰	李飞	李惠霞	李金文	李世雄	林慧龙	刘华梁	刘文献
娄燕宏	吕晓涛	马红媛	马清	毛培胜	蒲小鹏	仁安芝	尚占环
孙飞达	孙涛	孙毅	涂雄兵	王建武	王静	王丽佳	王自奎
武菊英	夏方山	谢文刚	徐彬	徐炳成	许岳飞	杨成德	杨志民
姚拓	于应文	鱼小军	袁明龙	张程	张红香	张吉宇	张金林
张世挺	张兴旭	章武	赵桂琴	赵祥强			

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!

<http://cykx.lzu.edu.cn>