黄河源区人工草地植被群落和土壤养分变化

孙华方[1]，李希来[1,2,3]，金立群[1]，张 静[1]，李清德[4]

(1.青海大学 农牧学院，青海 西宁 810016；2.青海大学 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室，青海 西宁 810016；3.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；4.青海省民和县农牧局，青海 民和 810800)

摘 要：[目的] 研究黄河源区不同年限人工草地植被群落特征和土壤养分的动态变化，揭示高寒地区人工草地稳定机制与演替规律，为退化高寒草甸(湿地)的近自然恢复和缩短退化草地恢复时间提供理论依据。[方法] 选择黄河源区青海省玛沁县 3，11，17 a 单播垂穗披碱草人工草地，对植被与土壤养分特征进行调查。[结果] 随着种植年限增加，人工草地优势种垂穗披碱草盖度降低，植物总盖度、生物结皮盖度、杂类草盖度以及生殖枝数量呈倒“V”型变化，而原生植被莎草科植物盖度、物种多样性逐渐增加，17 a 人工草地中莎草科植物的盖度是 3，11 a 的 10 倍；人工草地土壤养分中全氮、全钾、速效氮、速效钾以及有机质随年限增加呈现积累趋势，土壤 pH 值逐渐趋于中性。土壤全氮含量在不同恢复年限之间差异最大，平均准确率降低度为 25.71，有机质含量次之，其平均准确率降低度为 18.55，而全钾含量及均匀度指数最小，平均准确率降低度均小于 5。[结论] 高寒地区人工草地群落结构和土壤营养随着建植时间的延长在逐渐恢复，建植 17 a 的人工草地土壤全氮、有机质含量仅是原生高寒草甸土壤的 50%左右，因此，17 a 人工草地土壤养分完全恢复还需要较长时间。

关键词：随机森林法；土壤养分；植被特征；人工草地；高寒地区

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)03-0025-06 **中图分类号**：S812

文献参数：孙华方，李希来，金立群，等.黄河源区人工草地植被群落和土壤养分变化[J].水土保持通报，2019，39(3)：25-30. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.005；Sun Huafang，Li Xilai，Jin Liqun，et al. Variation of vegetation community and soil nutrients of artificial grassland in source area of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(3)：25-30.

Variation of Vegetation Community and Soil Nutrients of Artificial Grassland in Source Area of Yellow River

Sun Huafang[1]，Li Xilai[1,2,3]，Jin Liqun[1]，Zhang Jing[1]，Li Qingde[4]

(1. *College of Agriculture and Animal Husbandry，Qinghai University，Xining，Qinghai* 810016，*China*；2. *State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture，Qinghai University，Xining，Qinghai* 810016，*China*；3. *Key Laboratory of Restoration Ecology in Cold Regions of Qinghai Province，Northwest Institute of Plateau Biology，Chinese Academy of Sciences，Xining，Qinghai* 810016，*China*；4. *Agriculture and Animal Husbandry Bureau of Minhe County，Qinghai Province，Minhe，Qinghai* 810800，*China*)

Abstract：[Objective] The variation of vegetation community and soil nutrients in artificial grassland was studied and the long-term successional mechanism of artificial grasslands was explored in order to provide theoretical basis for the near-natural restoration of degraded alpine meadow (wetland). [Methods] The vegetation communities and soil nutrients of artificial grassland with different planting years (3，11 and 17 years) were investigated in Maqin County of Qinghai Province，the source region of the Yellow River. Random forest analysis was used to determine the variation of vegetation community and soil nutrient characteristics of artificial grassland under different restoration years. [Results] The coverage of dominant species *Elymus nutans*

收稿日期：2018-11-19 **修回日期**：2018-12-20

资助项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0501903)；青海省科技厅项目(2017-HZ-802，2018-ZJ-781)；青海省创新平台建设专项计划项目(2017-ZJ-Y20)；青海省“高端创新人才千人计划”和教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R62)项目资助。

第一作者：孙华方(1991—)，女(汉族)，山东省东明县人，硕士研究生，研究方向为草地生态与环境保护。E-mail：1219493914@qq.com。

通讯作者：李希来(1964—)，男(汉族)，河南省孟津县人，博士，教授，博士生导师，主要从事高寒草甸生态学和高原生态修复研究。E-mail：xilai-li@163.com。

decreased with the increase of restoration years, while the total coverage, biological crust coverage, weed coverage and reproductive branch number showed an inverted "V" shape of variation. The Cyperaceae coverage and species richness increased gradually with the increase of restoration years. The coverage of Cyperaceae in 17 years artificial grassland was 10 times of that in 3 and 11 years. The total nitrogen, total potassium, available nitrogen, available potassium and organic matter in soil increased with the increase of restoration years. The soil pH value tended to be neutral with the increase of restoration years. The greatest differences among vegetation with different restoration years was the soil total nitrogen content, with the average accuracy degraded about 25.71. Followed by the organic matter content, the average accuracy degraded about 18.55. The differences of total potassium content and Pielou index among vegetation with different restoration years were the smallest, and the average index degraded was less than 5. [Conclusion] The vegetation community structure and soil nutrient of artificial grassland with 17 years restoration are gradually recovering, but the soil total nitrogen and organic matter content of the artificial grassland is only half of the original alpine meadow soil, and it will take a long time for the soil nutrient to recover completely.

Keywords: random forest method; soil nutrient; vegetation characteristics; artificial grassland; alpine region

黄河源区地处青藏高原腹地,是中华民族最重要的淡水资源库,也是高寒生物自然种质基因资源库[1]。随着全球气候变暖与过度人为影响,黄河源区高寒湿地、草甸发生退化,局部草甸出现破碎化、岛屿化,退化为成"黑土滩",导致土壤养分大量流失,土壤碱化、旱化,严重威胁着生态环境与人类生产活动[2-4]。目前,退化草地的人工干预治理方法大致可分为两类:第一类是充分依靠现存植被,通过补播改良措施、围栏封育等形成半人工草地;第二类是进行翻耕种植禾本科植物牧草形成人工草地[5]。大量研究表明,人工草地的建立能够短时间提高地上植被覆盖率,减少蒸发量,减少水土流失,提高草地生产力[6],但人工草地与天然草地不同,其生态系统结构单一,系统稳定性差,极易发生退化,再次形成"黑土滩"[2]。对人工草地植被群落结构及土壤理化性质的调查,能够了解人工草地植被群落及土壤养分演替状况,一定程度上可预测人工草地的演替方向。目前,三江源大部分人工草地植被群落结构、土壤理化性质等方面研究[7-9]时间尺度短,缺乏对长时间建植人工草地的系统研究。

本文拟选取黄河源区青海省果洛州玛沁县大武滩上不同建植年限(3,11,17 a)的人工草地,对植物群落特征和土壤养分分布异质性进行调查分析,旨在准确把握人工草地植被与土壤的恢复状况,找出引起不同建植年限人工草地植被特征与土壤养分差异的驱动因子,为退化高寒草甸(湿地)的近自然恢复和缩短退化草地恢复时间提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

试验地区位于青海省果洛州玛沁县,年均降水量443 mm,年平均气温-0.6 ℃,牧草生长期156 d,土壤类型为高山草甸土。

选择玛沁县乳品厂、砖瓦场、格多牧委会种植年限分别为17 a(2000年种植)、11 a(2006年种植)、3 a(2014年种植)的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)单播人工草地,面积均为100 m×100 m(表1)。人工草地建植之前属于典型"黑土滩"退化草地,优势种莎草科植物被毒杂草取代,原生植被不足10%,裸露地大面积存在,植被主要由铁棒槌(*Aconitum pendulum*)、鹅绒苇陵菜(*Potentilla anserina*)、黄帚橐吾(*Ligularia virgaurea*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等组成。人工草地所用垂穗披碱草种子由当地草籽繁殖场生产,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,详见马玉寿等[5]研究报道。人工草地冬季放牧利用(每年12月至次年4月),生长季完全禁牧,使用C-型肉毒素控制高原鼠兔种群数量。

表1 试验区人工草地概况

种植年限/a	经纬度	海拔/m	优势种	次优势种
3	34°22′N,100°28′E	3 921	垂穗披碱草	甘肃马先蒿、西伯利亚蓼(*Polygonum sibiricum*)
11	34°47′N,100°12′E	3 752	垂穗披碱草	早熟禾(*Poa annua*)、甘肃马先蒿
17	34°28′N,100°13′E	3 752	垂穗披碱草	早熟禾、中华羊茅(*Festuca sinensis*)、细叶亚菊

1.2　研究方法

2017 年 8 月,在 3 a 和 11 a 的人工草地随机设置 3 条样线,由于建植 17 a 的人工草地局部地区发生退化,设置 6 条样线进行采样。每条样线长 30 m,每隔 10 m 在样线附近布置 1 个 0.5 m×0.5 m 的样方。调查样方内植物总盖度、禾本科、莎草科、杂类草盖度、垂穗披碱草盖度、生物土壤结皮盖度,清点样方内生殖枝数量。挖取样方内 0—10 cm 土壤,自封袋封装标记带至实验室备用。计算多样性指数(Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数)[10]。土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾和 pH 值这 8 项指标由青海省农林科学院分析测试中心检测,电位法测定土壤 pH 值,重铬酸钾—H_2SO_4 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土壤全氮,“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 乙酸铵浸提—火焰光度发”测定土壤速效钾。

随机森林法:是基于分类树的一种集成算法。通常利用平均准确率降低度判断变量的重要性。平均准确率降低度是指变量取值发生轻微变化后,随机森林分析的准确性的降低程度,准确率降低度越大,代表该变量越重要。

2　结果与分析

2.1　不同种植年限人工草地植被特征

不同年限人工草地垂穗披碱草盖度差异不显著($p>0.05$)。建植年限较长(17,11 a)的人工草地上植被总盖度均在 90%以上,显著高于 3 a 样地中植被总盖度(78.33%,$p<0.01$)。莎草科植物盖度随着建植年限的增加逐渐增加,从 3 a 样地的 1%增加到 17 a 样地的 9.4%。建植 11 a 的人工草地中植物生殖枝数量最多,且多为禾本科植物生殖枝,在不同年限之间数量差异不显著($p>0.05$)。建植 11 a 和 17 a 的人工草地植物多样性指数显著高于 3 a 人工草地中多样性指数(表 2)。

表 2　不同年限人工草地植物群落特征(平均值±标准差)

不同年限/a	总盖度/%	垂穗披碱草盖度/%	生物土壤结皮盖度/%	禾本科盖度/%	莎草科盖度/%	杂类草盖度/%	生殖枝数/(个·m^{-2})	Simpson 指数	Shannon-wiener 指数	Pielou 均匀度指数
17	91.9±9.1^{Aa}	45±25.82^{Aa}	37.1±15.02^{ABa}	65.4±26.41^{Aa}	9.40±15.14^{Aa}	34.8±23.49^{Aa}	287±227.13^{Aa}	0.72±0.11^{Aa}	1.58±0.37^{Aa}	0.27±0.17^{Aa}
11	97.56±5^{Aa}	36.67±35.79^{Aa}	54.67±25.22^{Aa}	56.78±42.7^{Aa}	1.22±2^{Aa}	64.8±41.19^{Aa}	323±284.85^{Aa}	0.94±0.62^{Aa}	1.75±0.35^{Aa}	0.22±0.3^{Aa}
3	78.33±14.36^{Bb}	59.11±33.77^{Aa}	10.56±28.71^{Bb}	59.17±33.78^{Aa}	1.00±3.31^{Aa}	30.67±46.33^{Aa}	179±236.14^{Aa}	0.37±0.34^{Bb}	0.82±0.77^{Bb}	0.29±0.32^{Aa}

注:不同大写字母表示均值间差异极显著($p<0.01$);不同小写字母表示均值间差异显著($p<0.05$)。

2.2　不同种植年限人工草地土壤特征

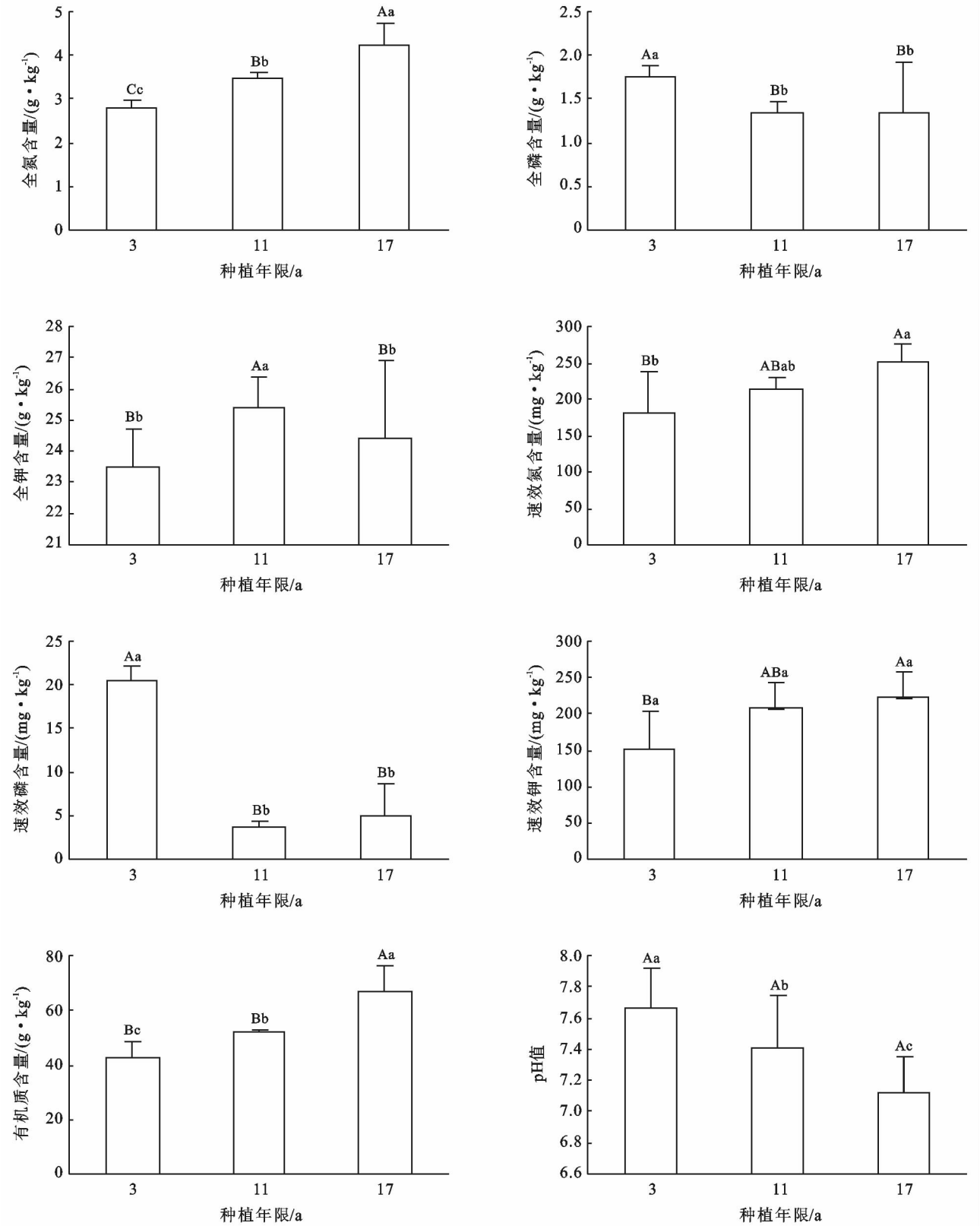
人工草地土壤全氮、速效氮、速效钾、有机质含量随着建植年限的增加而增加(见图 1)。不同年限人工草地土壤全氮含量之间差异极显著($p<0.01$),当人工草地建植 3 a 时,土壤全氮含量为 2.78 g/kg,在建植 17 a 时,土壤全 N 含量是建植 3 a 的土壤全 N 的 1.5 倍,为 4.24 g/kg。17 a 人工草地土壤速效氮含量与 3 a 人工草地土壤速效氮含量差异极显著($p<0.01$),但 3 a 人工草地土壤速效氮含量与 11 a 人工草地含量差异不大。建植 3 a 人工草地中速效钾的含量为 150 mg/kg 左右,其含量分别显著小于建植 11,17 a 人工草地土壤速效钾含量($p<0.05$)。随建植年限增加,土壤全磷含量、速效磷含量有下降趋势,建植 3 a 人工草地中土壤全磷含量、速效磷含量最高。土壤全钾含量在 11 a 人工草地土壤中含量最多(25.40 g/kg)。3,11,17a 人工草地土壤 pH 之间差异显著($p<0.05$),随着人工草地年限增加由弱碱性逐渐趋向于中性。

2.3　不同年限人工草地植被与土壤特征变化

不同年限人工草地植被和土壤特征存在差异(见图 2)。全氮的平均准确率降低度最大,为 25.71,即不同年限人工草地土壤中全氮含量差异最大;其次是有机质,为 18.55;生物土壤结皮不同年限人工草地中的分布差异也很大,平均准确率降低度数值为13.41,pH 值为 10.28。均匀度指数、禾本科盖度在不同年限人工草地间差异较小,而土壤养分中全磷、全钾不同年限间差异最小。

如表 3 所示,人工草地中土壤全氮含量与禾本科植物盖度、莎草科植物盖度、Shannon-Wiener 指数以及速效氮、速效磷含量显著相关(相关系数分别为−0.383,0.335,0.358,0.802,−0.370;$p<0.05$),而与 Simpson 指数、速效钾含量极显著相关(0.462,0.671;$p<0.01$)。有机质含量与 Simpon 指数以及速效氮、速效钾相关性很强,且均为正相关关系(0.796,0.659,$p<0.01$)。生物土壤结皮与速效磷含量之间显示显著负相关关系(−0.416;$p<0.05$),与 Simpson 指数呈显著正相关关系(0.363;$p<0.05$)。土壤 pH 值而

与莎草科植物之间有显著负相关关系(−0.342;$p<0.05$),与速效磷之间有极显著负相关关系(−0.524;$p<0.01$)。总盖度与禾本科植物盖度、生殖枝数、速效氮以及速效磷之间有显著相关关系(0.418,0.414,0.399,−0.392;$p<0.05$),与速效钾之间具有极显著正相关关系(0.640,$p<0.01$)。



注:不同大写字母表示均值差间差异极显著($p<0.01$);不同小写字母表示均值差间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同年限人工草地土壤化学性质特征

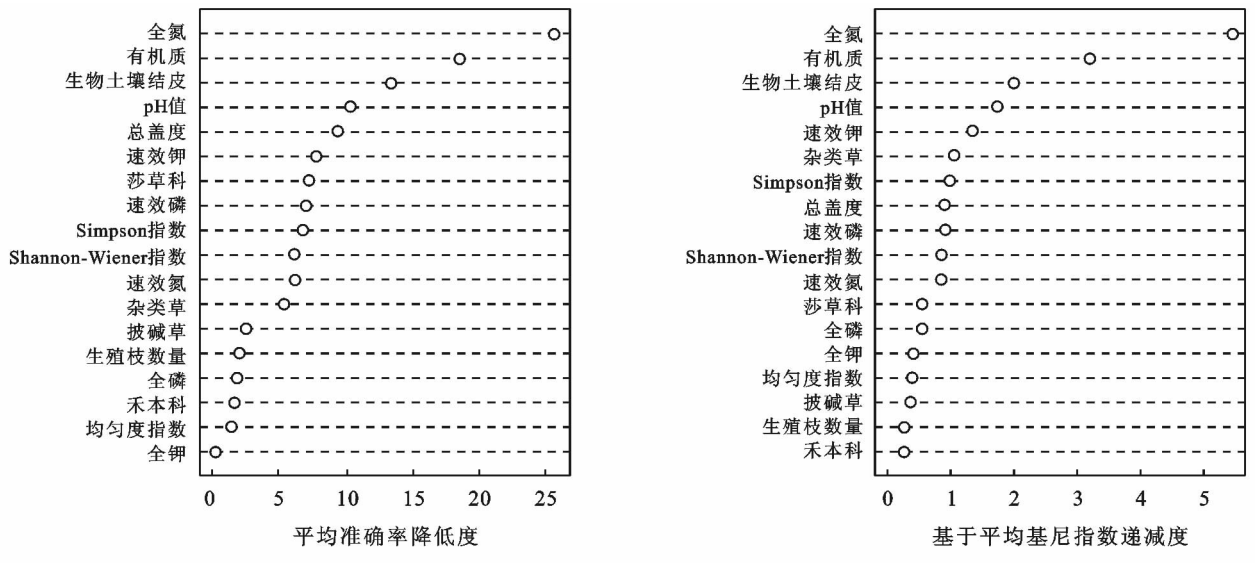


图 2　不同年限人工草地土壤养分与植被的差异性大小排序

表 3　土壤性质与植被特征的关系

相关系数	垂穗披碱草盖度%	禾本科盖度%	莎草科盖度%	Simpson指数	Shannon-Wiener指数	Pielou均匀度指数	生殖枝数/(个·m^{-2})	速效氮	速效磷	速效钾
全氮	−0.293	−0.383*	0.335*	0.462**	0.358*	0.200	0.065	0.802*	−0.370*	0.671**
有机质	−0.243	−0.109	0.313	0.413*	0.317	−0.017	−0.03	0.796**	−0.372	0.659**
生物土壤结皮盖度	−0.082	0.126	−0.129	0.363*	0.337*	−0.098	0.218	−0.034	−0.416*	0.275
pH值	−0.045	−0.056	−0.342*	−0.190	−0.190	−0.235	0.085	−0.203	−0.524**	0.377*
总盖度	0.292	0.418*	−0.093	0.218	0.194	0.120	0.414*	0.399*	−0.392*	0.640**

注:* 表示在 0.05 水平到达显著,** 表示在 0.01 水平达到显著。

3　讨论

3.1　不同年限人工草地植被特征的变化

建立人工草地是治理退化草地的一种十分有效的方法。在人工草地初期,垂穗披碱草占据优势,表现出明显的生产性。随着建植年限增加和人为放牧活动,以及外来物种侵入,人工草地土壤种子库逐渐形成,垂穗披碱草人工草地中出现了一些其他科属植物,如在建植 3 a 的人工草地中逐渐出现了少量其他的禾本科植物,如早熟禾、洽草等,物种多样性也增加,这一结果与周华坤等[11]的研究结果相似。建植初期的人工草地盖度仅在 78%左右,呈现部分裸露地表,为杂类草的生长和土壤种子库[12]的形成提供良好的条件。随人工草地覆盖度的增加,抑制了水土流失,有利于人工草地生态系统的稳定[13-15]。伴随着人工草地的逐步演替,苔藓等低等植物开始出现,还有少量的莎草科植物,如矮嵩草(*Kobresia humilis*)等,这说明人工草地开始进入自然恢复过程。随建植年限的增加,苔藓等生物结皮的盖度变大,如建植 11 a 的人工草地中苔藓结皮盖度达到了 54.67%。随着人工草地建植年限的延长,草地物种多样性增加,如 Simpson 指数从 0.37 增加到 0.94,使人工草地群落结构复杂化,说明人工草地从生产恢复型逐渐向生态恢复型转化。

莎草科植物如高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草等是高寒草甸的优势种,而 17 a 人工草地优势种依然是披碱草等禾本科类植物,莎草科植物盖度较小,说明人工草地仍处于演替中,演替至天然原生草地还需要更长的时间。

3.2　不同年限人工草地土壤特征的变化

土壤养分分布特征受多方面的影响,如植被特征、放牧活动等。不同年限人工草地植被特征不同,植被对养分的利用方式也不同,导致不同年限人工草地土壤具有异质性。调查分析,不同建植年限人工草地中土壤全氮含量差异最大,其次是有机质。全氮含量与禾本科植物盖度之间呈显著负相关关系($p<0.05$),即禾本科植物不利于土壤全氮的积累,可能与禾本科植物自身生长特征有关,首先禾本科植物需从土壤中吸收氮素维持自己的生长,其次是枯死的禾本科植物的根茬、茎干 C/N 比很高,可达到 100∶1,高的 C/N 条件下微生物对其分解的过程中,因氮素不足影响地上植被养分回归土壤[16]。所以建植初期(3 a)以禾本科植物为优势种的人工草地中土壤养分的分布主要受禾本科植物的影响。随着建植年限的

增长，植物多样性增加，禾本科植物逐渐被固氮、易降解的植物取代，与此同时，生物结皮也大量出现，促进了土壤全氮及其他养分的积累[17]。

土壤有机质是衡量土壤肥力的一个重要指标。引起土壤有机质分布差异性的原因有很多，其中放牧活动是一个重要影响因素。家畜可以通过啃食活动影响地上植被分布特征，间接影响土壤有机质的分布[18]。在建植年限较短的人工草地中，群落结构单一，耐牧性差，放牧利用后，地上生物量大量减少，影响了养分的归还，有机质与其他土壤养分积累效率降低甚至是负积累；而畜蹄的踩踏增加土壤紧实度，对土壤养分的运输和转化产生影响，与此同时，在建植年限短地表较松软的人工草地中，畜蹄的踩踏会造成地面塌陷，产生水土流失，加速土壤养分的流失。当人工草地群落结构趋于多样复杂后，草地耐牧性变强，不同生态位植物可补偿放牧带来的不良影响。此外，随着土壤环境变好，土壤微生物数量增多[19-20]，在微生物的作用下有机质向速效养分的转化效率增加，有利于速效氮与速效钾的积累，也可人为施加氮肥以促进植被生长，而植被覆盖度作为一个影响土壤养分的关键因素，可减少水土流失，保水保肥。与此同时，土壤 pH 值也逐渐趋于中性，退化草地土壤恢复趋势明显。但各建植年限人工草地土壤养分距离原生草甸土壤全氮含量(7.0～7.03 g/kg)、土壤有机质含量(103.1 g/kg)[7,21]相差很多，因此需要更长时间，人工草地的土壤才能够完全恢复。

放牧活动是青藏高原草地主要的利用方式，家畜的不同生活习性、踩踏行为都会对植被与土壤分布产生影响。本试验研究结果中土壤全氮、速效氮、速效钾、有机质含量随着建植年限的增加，逐渐积累增加，与王长庭等[22]的研究结果有些不同，随着建植年限的增加土壤全氮与有机质先减少后增加，可能是在研究样地内出现过度放牧现象，导致地上植物群落分布特征发生变化，地上生物量减少，引起植物对土壤全氮的利用方式发生了改变，导致土壤全氮的分布发生改变。本研究人工草地利用方式为生长季完全禁牧，冬季放牧，土壤全氮与有机质呈现逐渐积累的趋势。目前对放牧管理有很多方式，如禁牧、划区轮牧、自由放牧、刈割等。禁牧有利于增加物种丰富度，提高土壤质量[23]，但会造成草场浪费，而自由放牧可能会引起局部放牧过重，局部草场浪费，引起草地生态系统大的差异性，容易引起草地退化。本研究人工草地利用方式虽然实行冬季放牧，植被在生长季节能够正常生长繁殖，但局部的过度放牧使人工草地演替缓慢，尤其对建植年限较短的人工草地影响更大。所以，对不同年限人工草地的利用方式以及人工草地放牧强度的阈值问题应得到重视和进一步研究。

4 结 论

随着人工草地年限增加，垂穗披碱草优势度降低，物种多样性增加；原生高寒草甸优势种如高山嵩草、矮嵩草等莎草科植物，随着人工草地恢复年限的增加，盖度逐渐增加，人工草地趋于近自然恢复演替；人工草地土壤全氮、有机质、速效氮等养分含量随着生长年限的增加而逐渐增加，土壤 pH 值逐渐趋于中性，说明人工草地土壤也在逐渐趋于自然恢复中，但建植 17 a 的人工草地土壤全氮、有机质含量仅是原生高寒草甸土壤的一半左右，所以土壤养分达到完全恢复还需要很长时间。

不同恢复年限人工草地差异最大的是土壤全氮、有机质含量，减轻放牧强度会缩短人工草地的恢复时间，同样，优化人工草地植物群落结构，筛选适合在高寒地区生长的固氮植物或施加有机肥来促使人工草地的快速恢复，将是今后需要进一步研究的科学问题。

[参 考 文 献]

[1] 王莺，李耀辉，孙旭映. 黄河源区域生态环境演变与对策建议[J]. 干旱气象，2013，31(3)：550-557.

[2] Li Xilai, Perry G L W, Brierley G, et al. Quantitative assessment of degradation classifications for degraded alpine meadows (Heitutan), Sanjiangyuan, Western China[J]. Land Degradation & Development, 2015, 25(5): 417-427.

[3] Li Xilai, Perry G, Brierley G J. Grassland Ecosystems of the Yellow River Source Zone: Degradation and Restoration[M] // Brierley G J, Li Xilai. Landscape and Ecosystem Diversity, Dynamics and Management in the Yellow River Source Zone. Springer International Publishing, 2016: 137-165.

[4] Li Xilai, Gao J, Zhang Jing. A topographic perspective on the distribution of degraded meadows and their changes on the Qinghai-Tibet Plateau, West China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(6): 1574-1582.

[5] 马玉寿，施建军，董全民，等. 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[J]. 青海畜牧兽医杂志，2006，36(2)：1-3.

[6] 刘斌，罗全华，常文哲，等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学，2008，6(6)：68-73.

[7] 伍星，李辉霞，傅伯杰，等. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究[J]. 中国草地学报，2013，35(3)：77-84.

(下转第 38 页)

Ecology, 1998,79:94-105.
[12] 安红燕,叶茂,徐海量,等.塔里木河下游胡杨径向生长量对生态输水的响应[J].中国沙漠,2011,31(4):957-962.
[13] 王蕾,罗磊,刘鹏,等.塔里木河中下游水分干扰对胡杨林群落物种多样性的影响[J].干旱区地理,2016,39(6):1275-1281.
[14] 张绘芳,李霞.塔里木河下游胡杨种群空间分布格局分析[J].西北植物学报,2006,26(10):2125-2130.
[15] 叶茂,徐海量,龚君君,等.不同胸径胡杨径向生长的合理生态水位研究[J].地理科学,2011,31(2):172-177.
[16] 杨丽雯,何秉宇,黄培祐,等.和田河流域天然胡杨林的生态服务价值评估[J].生态学报,2006,26(3):681-689.
[17] 韩路,王家强,王海珍,等.塔里木河上游胡杨种群结构与动态[J].生态学报,2014,34(16):4640-4651.
[18] 赵振勇,张科,卢磊,等.塔里木河中游洪水漫溢区荒漠河岸林实生苗更新[J].生态学报,2011,31(12):3322-3329.
[19] 买尔当·克依木. 不同长势及年龄组胡杨的茎流日变化特征研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2014.
[20] 白玉锋,徐海量,张沛,等.塔里木河下游荒漠植物多样性、地上生物量与地下水埋深的关系[J].中国沙漠,2017,37(4):724-732.
[21] 李卫红,徐海量,艾合买提·那尤甫.塔里木河下游输水与生态恢复监测初报[J].干旱区地理,2003.26(2):122-128.
[22] 徐海量,叶茂,李吉玫,等.河水漫溢对荒漠河岸林植物群落生态特征的影响[J].生态学报,2007,27(12):4990-4998.
[23] 张绘芳. 塔里木河下游植物群落结构特征及优势种群格局研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2007.
[24] 周斌. 河水漫溢对荒漠河岸林植被及土壤的影响[D].乌鲁木齐:新疆大学,2011.
[25] 周斌,徐海量,熊黑钢.河水漫溢对塔里木河下游土壤颗粒组成的影响[J].水土保持学报,2010,24(4):177-181.
[26] 闫玉春.科尔沁沙地九种灌木苗期水分生理与抗旱性研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.

(上接第 30 页)

[8] 张蕊,王媛,马丽娜等.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[J].草地学报,2014,22(6):1171-1178.
[9] 孙磊,刘玉,武高林,等.藏北退化草地群落生物量与土壤养分的关系[J].草业科学,2016,33(6):1062-1069.
[10] 杨崇曜,李恩贵,陈慧颖,等.内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素[J].生物多样性,2017,25(12):1303-1312.
[11] 周华坤,赵新全,赵亮,等.高山草甸垂穗披碱草人工草地群落特征及稳定性研究[J].中国草地学报,2007,29(2):13-25.
[12] 赵丽娅,李元哲,陈红兵,等.科尔沁沙地恢复过程中地上定植群落与土壤种子库特征及其关系研究[J].生态环境学报,2018,27(2):199-208.
[13] 陈玫妃,曾辉,王钧,等.青藏高原高寒草地土壤水分生态特征研究现状[J].中国草地学报,2015,37(2):94-101.
[14] 白晓,张兰慧,王一博,等.祁连山区不同土地覆被类型下土壤水分变异特征[J].水土保持研究,2017,24(2):17-25.
[15] 朱美壮,王根绪,肖瑶,等.青藏高原多年冻土区高寒草甸土壤水分入渗变化研究[J].冰川冻土,2017,39(6):1316-1325.
[16] 秦莉,沈玉君,李国学,等.不同 C/N 比堆肥碳素物质变化规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(7):1388-1393.
[17] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. Soil Biology & Biochemistry. 2012,49: 96-105.
[18] 常晶晶,徐丽,薛晶月,等.放牧强度对若尔盖高寒草甸土壤有机质和微生物的影响[J].草业学报,2018,27(1):22-31.
[19] 杨希智,王长庭,字洪标,等.三江源区不同建植年限人工草地土壤微生物群落结构特征[J].应用与环境生物学报,2015,21(2):341-349.
[20] 字洪标,刘敏,阿的鲁骥,等.三江源区不同建植年限对人工草地土壤微生物功能多样性的影响[J].生态学杂志, 2017,36(4):978-987.
[21] 冯瑞章,周万海,龙瑞军,等.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[J].土壤通报, 2010,41(2):263-269.
[22] 王长庭,曹广民,王启兰,等.三江源地区不同建植期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J].应用生态学报,2007,18(11):2426-2431.
[23] 张玉萍,宋乃平,王兴,等.不同放牧制度对荒漠草原植物多样性及土壤理化性状的影响[J].北方园艺,2018(19):109-115.