

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0626

李令, 贺慧丹, 未亚西, 杨永胜, 罗谨, 李红琴, 李英年, 周华坤. 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳持水能力对退耕还草措施的响应. 草业科学, 2017, 34(10): 1999-2008.

Li L, He H D, Wei Y X, Yang Y S, Luo J, Li H Q, Li Y N. Response of vegetation community structure, soil carbon sequestration, and water-holding capacity in returning farmland to grassland plots, in the agro-pastoral transitional zone in the Three Rivers Source Region. Pratacultural Science, 2017, 34(10): 1999-2008.

## 三江源农牧交错区植被群落及土壤固碳 持水能力对退耕还草措施的响应

李 令<sup>1,2</sup>, 贺慧丹<sup>1,3</sup>, 未亚西<sup>1,3</sup>, 杨永胜<sup>1,4</sup>,  
罗 谨<sup>1,3</sup>, 李红琴<sup>1,4</sup>, 李英年<sup>1,4</sup>, 周华坤<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 青海大学, 青海 西宁 810016;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院高原生物适应与进化重点实验室, 青海 西宁 810001)

**摘要:**为探讨三江源农牧交错区植被群落演替、土壤固碳及水源涵养能力对退耕还草措施的响应,以青海省过马营镇退耕还草封育示范区为研究区域,通过野外实地监测及室内试验相结合的方法,分析了油菜(*Brassica campestris*)地经退耕还草措施后,植被群落演替、土壤固碳及持水能力的变化状况。结果显示,1)退耕还草 11 年后,其植被群落盖度、平均高度、植物分层及地上生物量均达到原生植被水平;而 Shannon-Wiener 群落多样性指数和 Pielou 均匀度指数分别达到原生植被的 80.9%和 97.5%。2)退耕还草 11 年后,0-40 cm 土层的土壤容重降低 5%,土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量分别较原生植被样地增加了 12.6、9.4 和 11.2 mm。3)退耕还草 11 年后,0-20 cm 土层土壤有机碳密度和 C/N 显著高于原生植被样地 31.85%和 37.63%( $P < 0.05$ ),土壤全氮密度与原生植被样地的无显著差异( $P > 0.05$ )。综上所述,退耕还草措施有利于农牧交错区荒漠化草地生态环境的恢复,是遏制和改善三江源区草地荒漠化的有效措施之一。

**关键词:**农牧交错带;植被恢复;群落结构;持水特征;水源涵养;容重;土壤有机质

中图分类号:S812.6<sup>+</sup>8;Q948.15 文献标志码:A 文章编号:1001-0629(2017)10-1999-10\*

### Response of vegetation community structure, soil carbon sequestration, and water-holding capacity in returning farmland to grassland plots, in the agro-pastoral transitional zone in the Three Rivers Source Region

Li Ling<sup>1,2</sup>, He Hui-dan<sup>1,3</sup>, Wei Ya-xi<sup>1,3</sup>, Yang Yong-sheng<sup>1,4</sup>,  
Luo Jin<sup>1,3</sup>, Li Hong-qin<sup>1,3</sup>, Li Ying-nian<sup>1,4</sup>, Zhou Hua-kun<sup>1,4</sup>

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China;  
2. Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Key Laboratory of Adaptation and Evolution of plateau Biota, the Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China)

**Abstract:** The present study aimed to explore the response of vegetation community succession, soil carbon sequestration, and water conservation capacity in returning farmland to grassland plots in the agro-pastoral transitional zone in the source region of the Three Rivers. The study region was a returning farmland to grassland

\* 收稿日期:2016-12-19 接受日期:2017-04-21  
基金项目:青海省科技支撑计划(2015-SF-A4-1);中国科学院战略性先导科技专项(XDB03030502);青海省自然科学基金(2016-ZJ-943Q);国家自然科学基金(31300385、31270523、31070437);青海省国际科技合作项目(2015-HZ-804);中国科学院西部之光项目(B类)“三江源退化高寒草甸恢复过程中的水分效应研究”  
第一作者:李令(1995-),女,青海乐都人,在读本科生,主要从事环境科学研究。E-mail:1907083239@qq.com  
通信作者:杨永胜(1987-),男,甘肃兰州人,助理研究员,博士,主要从事高寒草地生态水文学研究。E-mail:ysyang@nwipb.cas.cn

demonstration zone in Guomaying town, Qinghai province and the study analyzed the changes in plant community succession, soil carbon sequestration, and water-holding capacity by field monitoring and laboratory experiments. The results demonstrated that: 1) After 11 years, total coverage, average height, number of layers of plants, and aboveground biomass in returning farmland to grassland plots all reached the same levels as the original vegetation, and the Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index reached 80.9% and 97.5%, respectively, of the original vegetation. 2) After 11 years, the soil bulk density of the 0–40 cm layer of returning farmland to grassland plots decreased by 5% compared to the original vegetation plots, and the saturation moisture capacity, capillary moisture capacity, and field capacity of returning farmland to grassland plots were 12.6, 9.4, and 11.2 mm greater than that of the original vegetation plots, respectively. 3) After 11 years in the returning farmland to grassland plots, the soil organic carbon density and C/N had significantly increased by 31.85% and 37.63%, respectively, compared to the original vegetation plots ( $P < 0.05$ ), and there was no significant difference between the soil total nitrogen density of the returning farmland to grassland plots and the original vegetation plots ( $P > 0.05$ ). The results indicate that the returning farmland to grassland plots have benefited from restoration of the ecological environment in desert pastures in the agro-pastoral transitional zone. This is an effective measure to contain and improve the desertification in the source region of the Three Rivers.

**Key words:** Agro-pastoral Transitional Zone; vegetation restoration; structure of community; water-holding capacity; water conservation; soil bulk density; soil organic matter

**Corresponding author:** Yang Yong-sheng E-mail: ysyang@nwipb.cas.cn

在全球气候温暖化以及人类活动干扰等影响下,近年来青藏高原生态系统发生了不同程度的退化现象,如水土流失、荒漠化、生物多样性锐减、草地生产力下降等<sup>[1-3]</sup>,直接威胁到青藏高原乃至我国东部地区的生态安全。为缓解和改善草地生态系统状况,近几十年来国家投入大量人力物力,积极开展了各项生态安全屏障建设治理措施<sup>[4]</sup>。其中,退耕还林还草工程是一项以恢复林草植被、改善生态环境为主导目标的生态建设工程,是新中国成立以来投资最大的生态建设工程<sup>[5]</sup>。来自农牧交错带的研究结果显示,退耕还草措施能够对荒漠化过程起到明显的逆转作用<sup>[6]</sup>,退耕地种植多年生豆科和禾本科牧草能够增加裸露土壤的覆盖度和覆盖时间,显著提高饲草的产量和质量<sup>[7]</sup>。此外,退耕还草措施还可以降低退耕地土壤容重<sup>[8-9]</sup>,改善土壤理化性质<sup>[10-11]</sup>,提高土壤含水量<sup>[10]</sup>,进而促进植物生长和植被恢复。目前,有关退耕还草措施方面的研究主要集中在土壤理化性质及牧草产量方面,鲜有涉及退耕还草措施对高海拔地区植被群落、土壤固碳及水源涵养能力影响方面的研究。

三江源地区位于青海省南部,地处青藏高原腹地,是我国乃至亚洲重要的水源涵养地<sup>[12]</sup>。草地生态系统是三江源地区的主体生态系统,对区域生态系统服务功能的保持具有决定性作用。由于受到多种因素的综合影响,三江源地区,尤其是位于河谷农区和高原牧

区间的农牧交错区生态系统持续退化,已成为草地生态学界的研究热点<sup>[13]</sup>。研究退耕还草措施对三江源区农牧交错带植被群落结构及土壤固碳持水能力的影响,不仅可以为生态治理工程实施下农牧交错区生态系统的恢复和治理提供科学依据,还对准确评价生态环境建设工程效应具有重要意义。为此,本研究以三江源农牧交错区为研究区域,分析油菜(*Brassica campestris*)地经人工混播无芒雀麦(*Bromus inermis*)和冷地早熟禾(*Poa crymophila*)后的植被盖度、高度、多样性及土壤有机碳、氮变化状况,研究退耕还草措施实施后,三江源农牧交错区植被群落结构及土壤固碳持水能力的恢复状况,以期为该退耕还草恢复草原植被提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于青海省海南藏族自治州贵南县过马营镇南部约 18 km 处的退耕还草区,在西宁—果洛公路 168 km 右侧,西南方为木格滩。该区属高原大陆性寒温气候,年均气温 2.3 °C,7 月最高(13.6 °C),1 月最低(-11.0 °C)。年降水量 352.7 mm,其中植物生长季的 5—9 月为 308.3 mm,占年降水量的 87.4%。日照充足,年均日照时数为 2 823 h,日均气温  $\geq 0$  °C、 $\geq 5$  °C 的年积温分别为 1 917.0、1 721.6 °C · d<sup>[14]</sup>。植被类

型属于针茅草原的干草原向亚高山草甸亚类过渡的类型,原生植被优势种为冰草(*Agropyron cristatum*)、冷地早熟禾,伴生种有婆婆纳(*Veronica didyma*)、弯茎还阳参(*Crepis flexuosa*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、青海黄芪(*Astragalus tanguticus*)、阿拉善马先蒿(*Pedicularis alaschanica*)等。土壤为山地草原化草甸土,土壤为砂壤,粗骨性强。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置与样方布局** 试验样地位于贵南县过马营镇南哇什滩,地理坐标为  $101^{\circ}12' - 101^{\circ}14' E$ ,  $35^{\circ}96' - 35^{\circ}98' N$ ,海拔  $3\ 040 \sim 3\ 152\ m$ 。于 2015 年 7 月下旬选取原生植被地为对照(放牧强度为  $1.2\ 只 \cdot hm^{-2}$ )和原油菜地经退耕还草 11 年样地(退耕还草 11 年),二者相距 100 m。退耕还草样地于 2004 年通过耕耙—施肥—播种—轻耙(覆土)—镇压的方式进行播种,播种牧草为无芒雀麦和冷地早熟禾,播种密度分别为  $25、8$  和  $11\ kg \cdot hm^{-2}$ ,播种面积为  $400\ m^2$ 。经一次种植后,进行长期围栏封育。调查试验期间,在每个试验区设置大小均为  $2\ m \times 2\ m$  的样地。调查时,在样地的中央点和 4 个角各设置一个  $50\ cm \times 50\ cm$  观测样方,即每个处理有 5 个重复。

**1.2.2 样品收集与调查** 植被群落参数调查:在上述选择的样方内,首先用直尺测量绿色植物群落的平均高度(每个样方测定 30 次,取平均值)和单种植株高度,用点样框法<sup>[15]</sup>测定群落总盖度和单种植被的分盖度。

植被地上、地下生物量:首先分拣出枯落物,再用剪刀齐地面剪取植被地上部分,分别装入纸袋。其次,用直径 8 cm 的根钻按 0—10、10—20、20—40 cm 的土层分别采集地下土柱,装在 0.5 mm 孔径的尼龙网袋。经分拣石子、清洗,得到地下生物量,稍晾干后装袋,与收集的地上生物量一并置入  $65\ ^{\circ}C$  恒温烘干箱内烘至恒重后称重,得到群落地上、地下生物量。

土壤样品及环刀样品收集:在取过地下生物量土柱的样方内,用内径、高均为 5 cm 的环刀分别收集 0—10、10—20、20—40 cm 土层原状土样,分析土壤容重和持水量。同时,收集 0—20 cm 土层的土壤混合样品,带回实验室,测定有机质和全氮含量。

### 1.2.3 群落多样性指标计算方法

物种多样性指数(species diversity index,  $H'$ )、均匀度(evenness,  $J$ )、重要值(important value,  $IV$ )和优势度(Simpson,  $C$ )计算公式如下<sup>[16]</sup>。

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度}) / 2.$$

式中:相对盖度 = (单种盖度/所有单种盖度之和)  $\times 100$ ; 相对高度 = (单种高度/所有单种高度之和)  $\times 100$ 。

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i;$$

$$J = (- \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i) / \ln S;$$

$$C = \sum_{i=1}^S P_i^2.$$

式中: $P_i$  为种  $i$  的相对重要值; $S$  为种  $i$  所在样方的物种总数(丰富度)。

**1.2.4 植被碳密度** 植被碳密度通过植物地上地下生物量计算,具体计算公式如下<sup>[17]</sup>:

$$DVC_i = \sum_{i=1}^k DVC_i = \sum_{i=1}^k C_i O_i.$$

式中: $DVC_i$  为单位面积植被碳密度( $g \cdot m^{-2}$ ); $k$  为植被生物量所分层次(分为地上,地下 0—10、10—20、20—40 cm,共 4 部分); $C_i$  为植被碳含量(%),地上取 0.45,地下取 0.4<sup>[17]</sup>;  $O_i$  为单位面积植被生物量( $g \cdot m^{-2}$ )。

**1.2.5 土壤有机质含量** 采集的土壤样品带回实验室后,将其自然风干并碾磨过 0.25 mm 土壤筛,利用重铬酸钾法<sup>[18]</sup>测定土壤有机质含量,用凯氏滴定法<sup>[19]</sup>测定土壤全氮含量。并利用下列公式计算土壤有机碳密度和土壤全氮密度:

$$SOC_i = C_i D_i E_i (1 - G_i);$$

$$TN_i = N_i D_i E_i (1 - G_i).$$

式中: $i$  为某一土层; $SOC_i$  为  $i$  层土壤有机碳密度( $kg \cdot m^{-2}$ ); $TN_i$  为  $i$  层土壤全氮密度( $kg \cdot m^{-2}$ ); $D_i$  为  $i$  层土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ); $C_i$  为土壤有机碳含量(%); $N_i$  为土壤全氮含量(%); $E_i$  为土层厚度(cm), $G_i$  为  $>2\ mm$  的砾石所占体积(%).

**1.2.6 土壤容重及持水能力** 土壤容重、土壤持水量均用环刀法来进行测定,具体测定方法详见参考文献<sup>[20]</sup>。

## 1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行数据的基本处理和作图,采用 SPSS 12.0 软件进行各指标的 One-Way ANOVA 统计分析,计算平均值、标准差及在  $P = 0.05$  水平下各处理间的差异显著性。其中,两两间比较采用  $t$  检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被群落结构

**2.1.1 盖度和高度的变化** 与原生植被样地相比,退耕还草 11 年样地的植被盖度显著提高了 90.00% ( $P < 0.05$ ),平均高度比原生植被样地高出 16.67% ( $P > 0.05$ )(图 1)。

**2.1.2 物种丰富度及重要值** 分析原生植被样地和退耕还草 11 年样地的植被群落组成发现(表 1),原生

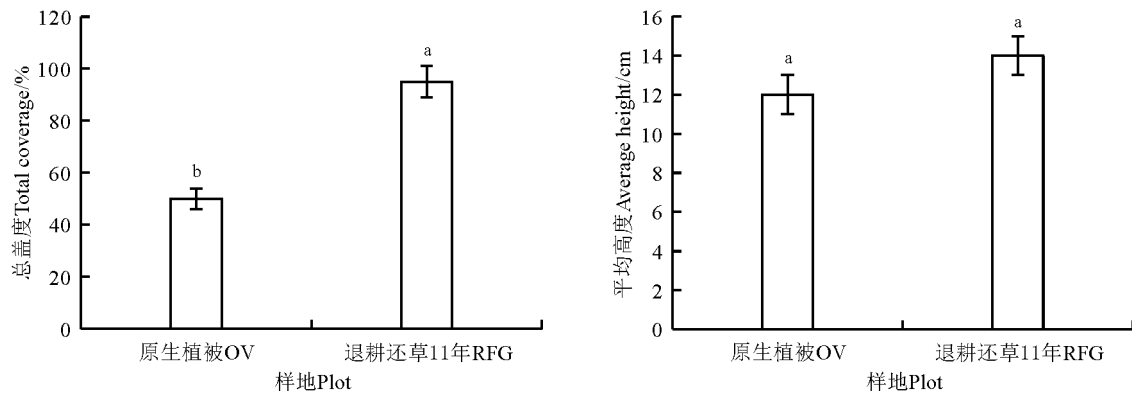


图1 原生植被与退耕还草11年样地植被总盖度和平均高度

Fig. 1 Total coverage and average height of vegetation in original vegetation and 11 years old of returning farmland to grassland plots

注:不同小写字母表示同一指标不同样地间差异显著( $P < 0.05$ )。图2、图3同。

Note: Different lowercase letters for the same parameter indicate significant difference between two treatment plots at the 0.05 level; OV, original vegetation plot; RFG, 11 years old of returning farmland to grassland plot; similarly for Fig. 2 and Fig. 3.

表1 原生植被与退耕还草11年样地植物群落特征参数及重要值  
Table 1 Community parameters and important values in original vegetation plots and 11 years old of returning farmland to grassland plots

主要植物 Main species	原生植被样地 Original vegetation plot			退耕还草11年样地 11 years old of returning farmland to grassland plot		
	盖度 Coverage/ %	高度 Height/ cm	重要值 Important value	盖度 Coverage/ %	高度 Height/ cm	重要值 Important value
	冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	18.0±2.0b	6.0±1.0b	14.6±1.5b	35.0±1.3a	24.0±2.1a
婆婆纳 <i>Veronica didyma</i>	4.0±1.2	18.0±3.2	10.8±1.8	—	—	—
阿拉善马先蒿 <i>Pedicularis alaschanica</i>	5.0±0.8	16.0±1.5	10.6±1.1	—	—	—
甘肃马先蒿 <i>Pedicularis kansuensis</i>	4.0±0.3	8.0±2.1	6.3±0.8	—	—	—
弯茎还阳参 <i>Crepis flexuosa</i>	4.0±1.2	7.0±0.8	5.8±0.2	—	—	—
青海黄芪 <i>Astragalus tanguticus</i>	6.0±0.8	3.0±2.2	5.3±1.3	—	—	—
冷地早熟禾 <i>Poa crymophila</i>	8.0±1.4a	5.0±1.2b	7.5±1.7b	14.0±2.1a	21.0±1.4a	24.7±2.1a
楔叶委陵菜 <i>Potentilla cuneata</i>	2.0±0.3	2.0±0.7	2.2±0.6	—	—	—
鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i>	—	—	—	2.0±0.8	3.0±1.1	3.5±0.8
矮生嵩草 <i>Kobresia humilis</i> Sergie	2.0±0.5	3.0±0.7	2.7±0.3	—	—	—
羽毛委陵菜 <i>Potentilla plumosa</i>	2.0±0.7	2.0±1.1	2.2±1.1	—	—	—
香薷 <i>Elsholtzia ciliata</i>	3.0±0.9a	2.0±0.8a	2.9±0.5a	1.0±0.4a	2.0±1.2a	2.1±0.0a
狼毒 <i>Stellera chamaejasme</i>	4.0±1.1	10.0±1.0	7.2±2.3	—	—	—
筋骨草 <i>Ajuga ciliata</i>	5.0±0.9	4.0±1.0	5.1±0.6	—	—	—
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	3.0±1.0a	4.0±0.2a	3.8±0.8a	5.0±0.8a	10.0±1.9a	10.5±1.2a
獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i>	1.0±0.0	6.0±1.6	3.4±1.1	—	—	—
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	2.0±0.1a	2.0±0.3a	2.2±1.0b	30.0±3.4b	4.0±0.7a	25.4±0.9a
高原鸢尾 <i>Iris collettii</i>	1.0±0.5	10.0±1.1	5.2±0.7	—	—	—
矮兔耳草 <i>Lagotis humilis</i>	2.0±0.0	2.0±0.7	2.2±1.0	—	—	—
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	—	—	—	4.0±0.7	15.0±0.9	13.1±0.7
垂穗披碱草 <i>Elymus nutans</i>	—	—	—	8.0±1.0	18.0±1.4	18.1±0.4
无芒雀麦 <i>Bromus inermis</i>	—	—	—	12.0±1.1	12.0±0.8	17.1±1.9
芒麦 <i>Elymus sibiricus</i>	—	—	—	5.0±0.8	18.0±0.0	15.9±1.4
长茎藁本 <i>Ligusticum thomsonii</i>	—	—	—	16.0±1.2	22.0±1.1	26.9±1.0

注:同行不同小写字母表示同一指标不同样地间差异显著( $P < 0.05$ )。表3同。

Note: Different lowercase letters within the same row for the same parameter indicate significant difference between two treatment plots at the 0.05 level; similarly for Table 3.

植被样地共有植物种 18 种, 分属 10 科。其中, 玄参科 4 种, 豆科 3 种, 禾本科 2 种, 蔷薇科 2 种, 唇形科 2 种, 菊科 1 种, 乃瑞香科有 1 种, 龙胆科 1 种, 鸢尾科 1 种, 莎草科 1 种。退耕还草 11 年后, 植被物种共有 11 种, 分属 6 科, 其中禾本科 5 种, 豆科 2 种, 蔷薇科 1 种, 唇形科 1 种, 伞形科 1 种, 菊科 1 种。同时, 退耕还草样地与原生植被样地植被群落结构差异明显: 原生植被样地优势植物种为冰草、阿拉善马先蒿、婆婆纳、冷地早熟禾、狼毒和甘肃马先蒿, 其重要值分别为 14.6、10.6、10.8、7.5、7.2 和 6.3; 退耕还草 11 年样地优势植物种为冰草、长茎藁本、紫花苜蓿、冷地早熟禾、垂穗披碱草和无芒雀麦, 其重要值分别为 42.6、26.9、25.4、24.7、18.1 和 17.1。与原生植被样地相比, 退耕还草 11 年未出现的植物种为婆婆纳、阿拉善马先蒿、甘肃马先蒿、弯茎还阳参、青海黄芪、楔叶委陵菜、矮生蒿草、羽毛委陵菜、狼毒、筋骨草、獐牙菜、高原鸢尾和兔耳草。综上可知, 尽管农作区经退耕还草并长期封育后植物物种数、群落组成均有明显改善, 但其仍未达到原生植被区域水平。这说明在恢复人工耕作区植被群落至稳定群落结构是一个十分漫长的过程, 因此, 在生产实践中开垦草原时要十分慎重。

**2.1.3 垂直分层结构** 人工耕作区经退耕还草并长期封育后, 植被群落结构分层明显(表 1)。油菜地经退耕还草 11 年后植被平均高度比原生植被样地增高了 16.67%, 且其群落垂直层的分层数与原生植被样地一致, 由低到高可以分为 3 层: 以紫花苜蓿组成低层结构, 植被高度在  $\leq 4$  cm; 以冷蒿、垂穗披碱草组成中层结构, 植被高度在 10~18 cm; 以长茎藁本组成高层结构, 植被高度  $\geq 22$  cm。说明退耕还草并长期封育有利于植被形成垂直分层, 提高植物对光能的利用效率, 从而促使植被的快速恢复。

**2.1.4 植物物种多样性的变化** 退耕还草 11 年后 Shannon-Wiener 群落多样性指数、Pielou 均匀度指数分别达到原生植被水平的 80.9% 和 97.5% (图 2), 其中, 二者 Shannon-Wiener 群落多样性指数差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。退耕还草 11 年样地的 Simpson 优势度指数达到原生植被样地的 162.4% ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 土壤容重及持水能力

**2.2.1 土壤容重** 经退耕还草 11 年后, 油菜地 0—10、10—20、20—40 cm 土层的土壤容重均分别较原生植被样地降低了 8.34%、2.92%、4.18% (表 2)。0—40 cm 土层土壤容重整体下降 5%。同时, 原生植被样地和退耕还草 11 年样地土壤匀质化程度较高, 二者土壤容重均随着土层深度无显著变化 ( $P > 0.05$ ), 说明退耕

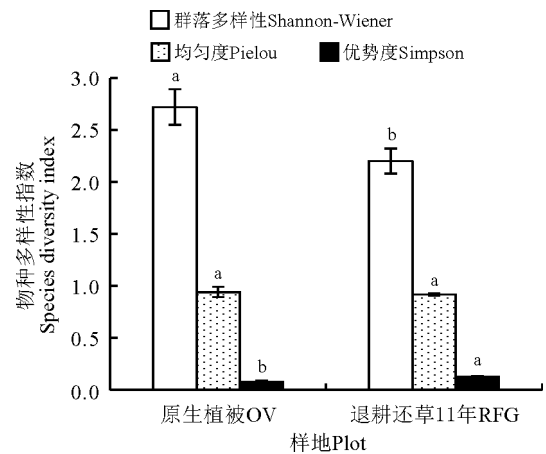


图 2 原生植被与退耕还草 11 年样地物种多样性指数  
Fig. 2 Species diversity index of vegetation in original vegetation plots and 11 years old of returning farmland to grassland plots

还草并长期封育有利于降低土壤紧实度, 提高土壤孔隙度, 从而提高土壤固碳持水能力。

**2.2.2 土壤持水特征** 退耕还草 11 年样地 0—10、10—20、20—40 cm 土层的土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量均不同程度地高于原生植被样地, 二者的差异在 20—40 cm 土层达到显著水平 ( $P < 0.05$ ) (表 2)。从 0—40 cm 整个土层来看, 退耕还草 11 年样地的土壤饱和持水量、毛管持水量和田间持水量分别比原生植被样地的高出 12.01、11.26 和 9.55 mm。更有力地说明了退耕还草能够改善高寒草甸土壤持水能力, 提高该区域土壤水源涵养能力。

## 2.3 植被碳密度

与原生植被样地相比, 退耕还草 11 年样地植被绿体和枯落物分别比原生植被样地高 405.8 和 167.0  $g \cdot m^{-2}$  ( $P < 0.05$ ), 其地下生物量比原生植被样地低 744.9  $g \cdot m^{-2}$  ( $P < 0.05$ ) (表 3)。植被碳密度代表了单位面积植物地上和地下生物量的碳含量, 结果显示, 原生植被样地植被碳密度比退耕还草 11 年样地高出 40.3  $g \cdot m^{-2}$  ( $P < 0.05$ )。总的来看, 退耕还草措施有利于地上生物量的快速恢复, 其地下生物量的恢复过程较慢。

## 2.4 土壤有机碳及全氮密度

退耕还草样地 0—20 cm 土层土壤有机碳密度较原生植被样地显著增高了 31.85% ( $P < 0.05$ ), 退耕还草样地 0—20 cm 土层土壤全氮密度较原生植被样地降低了 4.21% ( $P > 0.05$ ), 总的来说退耕还草措施有利于提高土壤固碳能力(图 3)。土壤碳氮比(C/N)是指土壤有机碳与全氮含量之比, 它是土壤矿化能力的重要指标, 根据 C/N 可判断有机质分解过程中是发生

表2 原生植被与退耕还草11年样地土壤容重、持水特征参数  
Table 2 Soil bulk density and water-holding characteristics in original vegetation plots and 11 years old of returning farmland to grassland plots

土层 Soil depth/ cm	样地 Plot	容重 Soil bulk density/(g · cm <sup>-3</sup> )	饱和持水量 Saturated water content/mm	毛管持水量 Capillary water content/mm	田间持水量 Field water content/mm
0—10	原生植被 Original vegetation	1.20±0.02ab	53.67±2.56c	50.58±2.20c	49.95±2.07c
	退耕还草11年 11 years old of returning farmland to grassland	1.10±0.02b	57.27±2.66c	53.53±2.61c	52.31±2.39c
10—20	原生植被 Original vegetation	1.27±0.02a	52.95±1.33c	51.41±0.87c	50.49±1.09c
	退耕还草11年 11 years old of returning farmland to grassland	1.23±0.03ab	53.92±0.29c	51.89±0.53c	50.78±0.61c
20—40	原生植被 Original vegetation	1.25±0.03a	103.66±3.60a	99.44±3.81b	97.75±4.13b
	退耕还草11年 11 years old of returning farmland to grassland	1.19±0.02ab	111.10±0.29a	107.27±0.15a	104.65±0.23a

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant difference at the 0.05 level.

表3 过马营原生植被样地与退耕还草11年植被地上、地下生物量及植被碳密度的分布

Table 3 Distribution of both aboveground, belowground biomass and vegetation carbon density in original vegetation plots and 11 years old of returning farmland to grassland plots in Guomaying

指标 Parameter	原生植被样地 Original vegetation plot	退耕还草11年样地 11 years old of returning farmland to grassland plot
绿体生物量 Live biomass/(g · m <sup>-2</sup> )	180.60±23.91a	586.42±73.46b
枯落物生物量 Litter biomass/(g · m <sup>-2</sup> )	8.83±2.41a	175.56±19.80b
地下生物量 Belowground biomass/(g · m <sup>-2</sup> )	1 832.53±127.41a	1 087.67±102.39b
植被碳密度 Vegetation carbon density/(g · m <sup>-2</sup> )	818.26±62.83a	777.96±82.92b

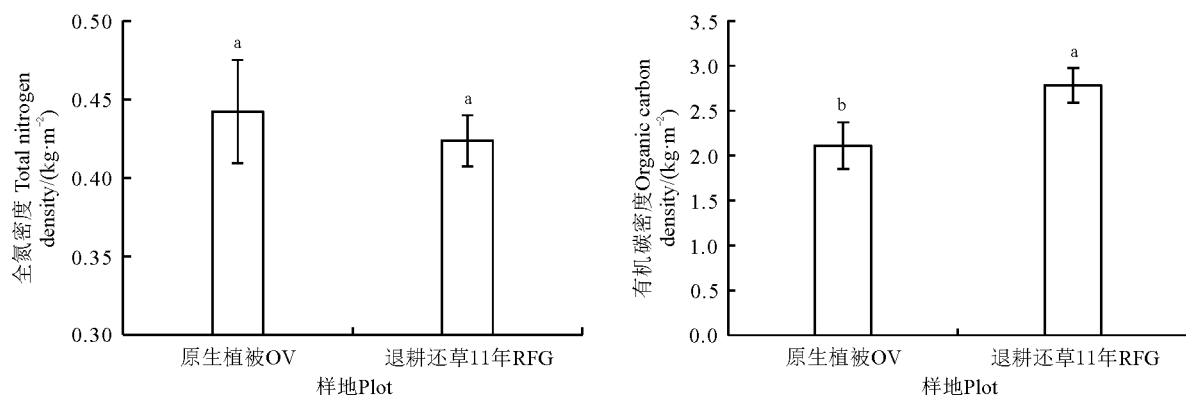


图3 原生植被样地与退耕还草11年0—20 cm土层有机碳密度和全氮密度

Fig. 3 Organic carbon density and total nitrogen density in original vegetation plots and 11 years old of returning farmland to grassland plots in soil layers of 0—20 cm

了矿化还是微生物的固持,退耕还草11年后C/N (6.57)显著高于原生植被样地(4.77),这说明退耕还

草措施有利于三江源农牧交错区土壤有机质的快速积累。

### 3 讨论

#### 3.1 退耕还草措施对三江源农牧交错区植被群落结构的影响

退耕还草措施主要是通过播种优良牧草在短期内提高植被高度、盖度、生物量,改善植物群落结构,从而达到草地恢复重建的目的<sup>[21]</sup>。在本研究中,油菜地经退耕还草种植无芒雀麦和冷地早熟禾并封育 11 年后,植被平均高度、盖度、垂直分层数及地上生物量均达到原生植被水平,而 Shannon-Wiener 群落多样性指数、Pielou 均匀度指数均未达到原生植被水平,这与史惠兰等<sup>[22]</sup>在江河源区的研究结果基本一致。这主要因为原生植被是研究区的气候顶极群落,其物种丰富度、多样性指数和均匀度指数均较高,而退耕还草 11 年后多年生禾本科优势度明显,一年生杂草类植物生长相对较弱,造成其 Shannon-Wiener 群落多样性指数及 Pielou 均匀度指数相对较低。相关研究表明,退耕地在通过长时期的自然演替,物种多样性和丰富度指数随演替时间增长而呈增加趋势,最终会形成稳定的植物群落结构<sup>[23-24]</sup>。例如,在黄土高原区,紫花苜蓿栽培草地经 10 年后可完全演替至当地原生地带性植被长芒草(*Stipa bungeana*)草原<sup>[25]</sup>。由于受到种子的传播方式、对环境的适应能力及物种之间的关系等<sup>[26]</sup>的影响,本研究中油菜地经退耕还草 11 年后并未演替至原生地带性植被,该地区退耕还草地完全演替至当地顶级稳定群落结构的年限还需进一步深入研究。

#### 3.2 退耕还草措施对三江源农牧交错区土壤理化性质的影响

土壤容重是水源涵养功能的物理性质指标,可表征土壤结构状况及土壤的松紧程度<sup>[16]</sup>。本研究中,退耕还草 11 年后,0—40 cm 土层的土壤容重降低了 5%,这与前人的结论基本相似<sup>[11,13,27-28]</sup>。这主要是因为退耕还草地采取严格禁牧措施,其大幅度减少了牲畜等的啃食和踩踏,植被生长良好,根系在土壤中穿插、挤压以及死亡形成通道<sup>[29]</sup>及残留腐殖质的胶结作用降低了土壤的紧实度,使土壤相对疏松,孔隙度较高<sup>[11]</sup>。说明退耕还草措施能够提高土壤入渗能力,增加草地水源涵养功能。

土壤中的有机碳量是由进入土壤中的植物残体量和在土壤微生物作用下分解的动植物残体的量所组成<sup>[13]</sup>。本研究发现,退耕还草 11 年样地 0—20 cm 土层土壤有机碳密度显著高于原生植被样地( $P < 0.05$ )。这主要是因为油菜地经退耕还草后长期封育,其植被生长较好,枯落物积累量增多,在土壤微生物及

土壤酶<sup>[30]</sup>的作用下,其土壤有机碳含量较高,这与何念鹏等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。与本研究不同,史惠兰等<sup>[32]</sup>对高寒地区的研究认为,原生小嵩草(*Kobresia myosuroides*)区域 0—20 cm 土层土壤有机碳密度高于栽培草地区域。出现这种差异的主要原因是后者围封年限为 5 年,并且在建植期间对土壤进行翻耕,加速了表层土壤有机质的分解。与土壤有机碳不同,退耕还草 11 年样地 0—20 cm 土层土壤全氮密度与原生植被样地无显著差异,这可能与退耕还草年限较短及退耕初期施肥的干扰作用有关,赵锦梅等<sup>[33]</sup>在祁连山的研究结果支持了本研究的观点。表明退耕还草措施能提高三江源农牧交错区土壤固碳能力,为该地区土地可持续利用及退化草地恢复重建提供参考。

#### 3.3 退耕还草措施对三江源农牧交错区植被碳密度的影响

尽管油菜地经退耕还草措施后,长期围栏封育避免了家畜对植被的采食和践踏,增加了植物群落的光合速率和叶面积指数<sup>[1]</sup>,使退耕还草 11 年样地植被地上生物量显著高于原生植被。但由于退耕还草样地较高的植被盖度和高度降低了土壤温度,造成地表以下土壤处于相对较冷环境,明显减缓了地下植被根系的生长<sup>[34]</sup>,造成退耕还草 11 年样地植被地下生物量显著低于原生植被。鉴于退耕还草过程中植被根系的植物碳密度大于地上部分的植物碳密度,且根系植物碳密度占整个植被植物碳密度的比例较重<sup>[35]</sup>,造成退耕还草 11 年样地地上、地下总的现存碳密度显著低于原生植被。这也说明植被总的现存碳密度与地下碳密度具有一致性,刘晓琴等<sup>[36]</sup>在海北高寒草甸的研究结果支持了这一观点。来自黄土高原的研究<sup>[37]</sup>认为,根系是草地植被碳密度最重要的组成部分,其封育 22 年对根系的抑制作用最为显著,本研究中退耕地封育 11 年,是否也会在以后出现此种情况,有待以后对该退耕还草地进一步研究。

#### 3.4 退耕还草措施对三江源农牧交错区水源涵养能力的影响

土壤持水能力表征了一个地区土壤水源涵养能力的高低,主要受土壤总孔隙度、容重、有机质、土壤颗粒组成等的影响<sup>[27]</sup>。土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量是衡量土壤持水能力的重要参数,能够表示土壤贮水能力的强弱。本研究结果显示,退耕还草 11 年样地 0—10、10—20、20—40 cm 土层土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量均高于原生植被样地。造成这种现象的原因主要有:退耕还草措施降低了 0—40 cm 土壤容重,提高了植被盖度,增加草地的覆盖时

间,减少土壤水分的挥发;退耕还草措施提高 0—20 cm 土壤有机碳含量,不仅改善了土壤结构,增加土壤孔隙度,而且还改变了土壤胶体状况<sup>[21]</sup>,使土壤吸附作用增强。说明退耕还草措施能够改善农牧交错区的土壤持水能力,提高该区域土壤水源涵养能力。然而,当退耕还草达到某一年限时,会出现生境干旱化的现象<sup>[38]</sup>。因此,在生产实践中,实施退耕还草措施须注意年限,应根据草地恢复状况制定适宜的封育期限,不宜采取长期封育,适当采用轮牧、游牧加速草地的恢复

#### 4 结论

通过对三江源农牧交错区退耕还草 11 年及原生植被样地的植被群落结构、土壤持水能力及土壤固碳的生态效应分析,初步得到以下结论:

1)退耕还草措施能够明显改善三江源农牧交错区植被群落结构。具体表现为:油菜地经退耕还草 11 年后,植被总盖度、平均高度、垂直分层数及地上生物量均达到原生植被水平。退耕还草 11 年样地 Shannon-Wiener 群落多样性指数及 Pielou 均匀度指数相对较低,而其 Simpson 优势度指数显著高于原生植被。

2)退耕还草措施不仅能够提高三江源农牧交错区土壤水源涵养能力,而且有助于土壤固碳能力的增加。退耕还草 11 年样地 0—40 cm 土层的土壤饱和持水量、毛管持水量及田间持水量分别比原生植被样地的高 12.6、9.4、11.2 mm。同时,退耕还草 11 年样地 0—20 cm 土层的土壤有机碳密度和 C/N 分别比原生植被样地增高了 31.85%和 37.63%,二者均达到显著水平( $P < 0.05$ )。

#### 参考文献 References:

- [1] 李媛媛,董世魁,李小艳,温璐.围栏封育对黄河源区退化高寒草地植被组成及生物量的影响.草地学报,2012,20(2):275-279.  
Li Y Y, Dong S K, Li X Y, Wen L. Effect of grassland enclosure on vegetation composition and production in headwater of Yellow River. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(2): 275-279. (in Chinese)
- [2] 刘纪远,徐新良,邵全琴.近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征.地理学报,2008,63(4):364-376.  
Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the three-river headwaters region in Qinghai Province. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(4): 364-376. (in Chinese)
- [3] Lu C H, van Ittersum M K, Rabbinge R. A scenario exploration of strategic land use options for the Loess Plateau in northern China. Agricultural Systems, 2004, 79(2): 145-170.
- [4] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,张镜铨.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设.地理学报,2012,6(7):3-12.  
Sun H L, Zheng D, Yao T D, Zhang Y L. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau. Acta Geographica Sinica, 2012, 6(7): 3-12. (in Chinese)
- [5] 王闰平,陈凯.中国退耕还林还草现状及问题分析.水土保持研究,2006,13(5):187-191.  
Wang R P, Chen K. Analysis of the situation and problems in reverting farmland to forests and grassland in China. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5): 187-191. (in Chinese)
- [6] 周立华,朱艳玲,黄玉邦.禁牧政策对北方农牧交错区草地沙漠化逆转过程影响的定量评价.中国沙漠,2012,32(2):308-313.  
Zhou L H, Zhu Y L, Huang Y B. Quantitative evaluation of the effect of prohibiting grazing on restoration of desertified grassland in agro-pastoral transitional zone in northern China. Journal of Desert Research, 2012, 32(2): 308-313. (in Chinese)
- [7] 彭运翔,王建光,张力君.退耕还草,以人工草地为基础发展草产业.内蒙古林业科技,2000(S1):74-75.  
Peng Y X, Wang J G, Zhang L J. Returning farmland to grassland, based on the artificial grassland development of farming-stockbreeding interlacing zones. Inner Mongolia Forestry Science and Technology, 2000(S1): 74-75. (in Chinese)
- [8] 孙铁军,肖春利,滕文军.不同草地建植模式对荒坡地土壤风蚀及理化性质的影响.水土保持学报,2011,25(3):44-48.  
Sun T J, Xiao C L, Teng W J. Effects of different eco-grassland models on soil wind erosion and physical and chemical properties on the barren slope. Journal of Soil Water Conservation, 2011, 25(3): 44-48. (in Chinese)
- [9] 王同顺,郭建英,孙保平,李锦荣.农牧交错区退耕还林地土壤恢复特征的研究:以内蒙古卓资县为例.水土保持研究,2009,16(6):134-139.  
Wang T S, Guo J Y, Sun B P, Li J R. The research of characteristics of soil restoration of conversion cropland to forest in the farming-pastoral zone: Taking example of Zhuozhi County. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(6): 134-139. (in Chinese)
- [10] 张莉,王长庭,刘伟,王启兰,李里,向泽宇.不同建植期人工草地优势种植物根系活力、群落特征及其土壤环境的关系.草业学报,2012,21(5):185-194.



- Zhang L, Wang C T, Liu W, Wang Q L, Li L, Xiang Z Y. Relationships of dominant species root activity, plant community characteristics and soil micro-environment in artificial grassland over different cultivation periods. *Acta Prataculture Sinica*, 2012, 21(5): 185-194. (in Chinese)
- [11] 贾倩民, 陈彦云, 杨阳, 程科元, 韩润燕. 不同人工草地对于干旱区弃耕地土壤理化性质及微生物数量的影响. *水土保持学报*, 2014(1): 178-220.
- Jia Q M, Chen Y Y, Yang Y, Cheng K Y, Han R Y. Effect of different artificial grassland on soil physico-chemical properties and microbial quantities of abandoned land in arid area. *Journal of Soil Water Conservation*, 2014(1): 178-220. (in Chinese)
- [12] 张耀生, 赵新全, 赵双喜, 冯承彬. 三江源区温性草原蒸散量与主要影响因子的相关分析. *中国沙漠*, 2010, 30(2): 362-368.
- Zhang Y S, Zhao X Q, Zhao S X, Feng C B. Correlation between evapotranspiration and climate factors in warm steppe in Source Region of Yangtze, Yellow and Yalu Tsangpo Rivers. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(2): 362-368. (in Chinese)
- [13] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 施建军, 杜岩功, 龙瑞军. 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. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2426-2431.
- Wang C T, Cao G M, Wang Q L, Shi J J, Du Y G, Long R J. Characteristics of artificial grassland plant communities with different establishment duration and their relationships with soil properties in the source region of Three Rivers in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2426-2431. (in Chinese)
- [14] 严进瑞. 青海省气候区划. *青海气候*, 1997(1): 19-23.
- Yan J R. Climatic regionalization of Qinghai Province. *Qinghai Meteorology*, 1997(1): 19-23. (in Chinese)
- [15] Li X R, He M Z, Stefan Z. Micro-geomorphology determines community structure of biological soil crusts at small scale. *Earth Surface Process and Landform*, 2010, 35(8): 932-940.
- [16] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法. *生物多样性*, 1994, 2(4): 231-239.
- Ma K P, Liu Y M. Method of measure biological community diversity. *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(4): 231-239. (in Chinese)
- [17] 李英年, 徐世晓, 赵亮, 张法伟. 青南退化高寒草甸植被土壤固碳潜力. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1157-1164.
- Li Y N, Xu S X, Zhao L, Zhang F W. Carbon sequestration potential of vegetation and soil of degenerative alpine meadows in southern Qinghai Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1157-1164. (in Chinese)
- [18] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 祁栋林, 王力, 傅华. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响. *草业科学*, 2015, 32(1): 11-18.
- Li F X, Li X D, Zhou B R, Qi D L, Wang L, Fu H. Effect of grazing intensity on biomass and soil physical and chemical characteristics in alpine meadow in the source of Three Rivers. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 11-18. (in Chinese)
- [19] 周翰舒, 杨高文, 刘楠, 阚海明, 张英俊. 不同退化程度的草地植被和土壤特征. *草业科学*, 2014, 31(1): 30-38.
- Zhou H Y, Yang G W, Liu N, Kan H M, Zhang Y J. Plant community and soil microbial characteristics in typical grassland of different degradation degrees. *Pratacultural Science*, 2014, 31(1): 11-18. (in Chinese)
- [20] 李红琴, 乔小龙, 张镜铨, 张法伟, 李英年. 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 195-200.
- Li H Q, Qiao X L, Zhang Y L, Zhang F W, Li Y N. Effects of fencing on the soil water conservation in maduo alpine grassland-source of Yellow River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(1): 195-200. (in Chinese)
- [21] 毛绍娟, 李红琴, 张镜铨, 祝景彬, 张法伟, 李英年. 日喀则河谷退耕还草(林)工程实施后生态功能效应的初步分析. *草地学报*, 2015, 23(6): 1728-1286.
- Mao S J, Li H Q, Zhang Y L, Zhu J B, Zhang F W, Li Y N. Preliminary analyzing the effect of returning farmland to grassland and forest project on the ecological function of Xigaz Valley Area. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(6): 1728-1286. (in Chinese)
- [22] 史惠兰, 王启基, 景增春, 王长庭, 王杰, 王柳英. 江河源区人工草地群落特征、多样性及其稳定性分析. *草业学报*, 2005, 14(3): 23-30.
- Shi H L, Wang Q J, Jing Z C, Wang C T, Wang J, Wang L Y. The structure, biodiversity and stability of artificial grassland plant communities in the source regions of the Yangtze and Yellow River. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(3): 23-30. (in Chinese)
- [23] 胡婵娟, 郭雷. 植被恢复的生态效应研究进展. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1640-1646.
- Hu C J, Guo L. Advances in the research of ecological effects of vegetation restoration. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1640-1646. (in Chinese)
- [24] 李永强, 焦树英, 赵萌莉, 韩国栋. 草甸草原撂荒地演替过程中植被多样性指数变化. *中国草地学报*, 2016, 38(3): 116-120.

- Li Y Q, Jiao S Y, Zhao M L, Han G D. Change of plant community diversity index during abandoned succession in meadow steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2016, 38(3): 116-120. (in Chinese)
- [25] 李裕元, 邵明安, 上官周平, 樊平, 王丽梅. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植被演替研究. *草业学报*, 2006, 15(2): 85-92.
- Li Y Y, Shao M A, Shangguan Z P, Fan P, Wang L M. Study on the degrading process and vegetation succession of *Medicago sativa* grassland in North Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(2): 85-92. (in Chinese)
- [26] 许中旗, 李文华, 鲍维楷, 许晴. 植被原生演替研究进展. *生态学报*, 2005, 25(12): 3383-3389.
- Xu Z Q, Li W H, Bao W X, Xu Q. A review on primary succession of vegetation. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3383-3389. (in Chinese)
- [27] 吴启华, 毛绍娟, 刘晓琴, 李红琴, 张法伟, 李英年. 牧压梯度下高寒杂草类草甸土壤持水能力及影响因素分析. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 590-598.
- Wu Q H, Mao S J, Liu X Q, Li H Q, Zhang F W, Li Y N. Analysis of the soil water-holding capacity in alpine forb meadow under grazing gradient and relevant influence factors. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 590-598. (in Chinese)
- [28] 孙海群. 混播人工草地退化演替的研究. *中国草地*, 2000(2): 8-14.
- Sun H Q. Studies on the degradation succession of mixed artificial grassland. *Grassland of China*, 2000(2): 8-14. (in Chinese)
- [29] 郭晓朦, 黄茹, 何丙辉, 沈普翠, 李天阳. 不同水土保持林草措施对三峡库区土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2016, 33(4): 555-563.
- Guo X M, Huang R, He B H, Shen P C, Li T Y. Correlation analysis physicochemical properties under different soil and water conservation biological measures in Three Gorges Reservoir region. *Pratacultural Science*, 2016, 33(4): 555-563. (in Chinese)
- [30] 任佐华, 张于光, 李迪强, 肖启明, 蔡重阳. 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量. *生态学报*, 2011, 31(11): 3232-3238.
- Ren Z H, Zhang Y G, Li D Q, Xiao Q M, Cai C Y. The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan alpine grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3232-3238. (in Chinese)
- [31] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类型草地碳贮量及其固持速率的影响. *生态学报*, 2011, 31(15): 4270-4276.
- He N P, Han X G, Yu G R. Carbon and nitrogen sequestration rate in long-term fenced grasslands in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15): 4270-4276. (in Chinese)
- [32] 史惠兰, 王启基, 景增春, 李世雄. 高寒地区土地利用方式对土壤碳氮含量的影响. *中国农学通报*, 2011, 27(20): 230-234.
- Shi H L, Wang Q J, Jing Z C, Li S X. Effects of different land-use types on soil carbon and nitrogen contents in alpine region of Tibetan Plateau. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20): 230-234. (in Chinese)
- [33] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲, 徐长林, 祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响. *生态学报*, 2012, 32(2): 548-556.
- Zhao J M, Zhang D G, Liu C Z, Xu C L. The Effect of different Land use patterns on soil properties in alpine areas of eastern Qilian Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 548-556. (in Chinese)
- [34] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 100-111.
- Ping X Y, Zhou G S, Sun J S. Advances in the study of photosynthate allocation and its controls. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 100-111. (in Chinese)
- [35] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化. *草业学报*, 2009, 18(1): 1-8.
- Wang J M, Zhang X C. Changes of carbon storage in vegetation and soil during different successional stages of rehabilitated grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(1): 1-8. (in Chinese)
- [36] 刘晓琴, 张法伟, 孙建文, 李英年, 宋成刚, 钟海明. 围栏放牧下土壤-植被碳密度空间分布格局. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2739-2744.
- Liu X Q, Zhang F W, Sun J W, Li Y N, Song C G, Zhong H M. Spatial distribution patterns of vegetation and soil carbon density in fenced and grazing grassland. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2739-2744. (in Chinese)
- [37] 高阳, 马虎, 程积民, 安雨, 刘伟, 陈奥. 黄土高原半干旱区不同封育年限草地生态系统碳密度. *草地学报*, 2016, 14(1): 28-34.
- Gao Y, Ma H, Cheng J M, An Y, Liu W, Chen A. Ecosystem carbon density of grassland under different grazing exclusion ages in semiarid region of the Loess Plateau. *Acta Agraria Sinica*, 2016, 14(1): 28-34. (in Chinese)
- [38] 熊育久, 邱国玉, 谢芳. 内蒙古太仆寺旗退耕草地植物种类变化与水分收支. *植物生态学报*, 2014, 38(5): 425-439.
- Xiong Y J, Qiu G Y, Xie F. Plant species change and water budget in restored grasslands in Taibus Banner, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(5): 425-439. (in Chinese)

(责任编辑 武艳培)