

DOI: 10.5846/stxb201805181099

王子婷, 杨磊, 李广, 柴春山, 张洋东, 陈荣, 张继强. 半干旱黄土区苜蓿退化对坡面草本植物分布及多样性的影响. 生态学报, 2019, 39(10): - .
Wang Z T, Yang L, Li G, Chai C S, Zhang Y D, Chen R, Zhang J Q. Effects of alfalfa (*Medicago sativa* L.) degradation on herbage distribution and diversity in the semi-arid Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

半干旱黄土区苜蓿退化对坡面草本植物分布及多样性的影响

王子婷^{1,2}, 杨磊³, 李广^{1,*}, 柴春山², 张洋东², 陈荣⁴, 张继强²

1 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

2 甘肃省林业科学研究院, 兰州 730020

3 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

4 定西市水土保持科学研究所, 定西 743000

摘要: 半干旱黄土丘陵区土壤水分亏缺引起人工苜蓿草地退化会显著影响其它草本植物的分布及多样性, 然而地形驱动下的苜蓿草地退化及植被群落多样性响应还尚不清楚。以典型半干旱黄土丘陵区龙滩小流域为研究区, 对不同地形条件下退化苜蓿草地地上生物量、草本多样性及生长季内 0—200 cm 土壤水分进行了定位监测, 利用方差分析、相关分析和典范对应分析 (CCA) 明确坡面地形、苜蓿生长状况和土壤水分与其它草本植物分布及多样性之间的关系。结果表明: (1) 地形显著影响植被群落特征, 西坡、东坡和北坡样带苜蓿地上生物量明显不同, 西坡和东坡样带中、下坡位苜蓿地上生物量明显高于上坡位, 而其它草本的生物量、物种丰富度和多样性指数的变化趋势则与苜蓿相反; (2) 苜蓿地上生物量与 80—200 cm 土壤水分显著正相关, 而与 0—20 cm 和 20—80 cm 土壤水分的相关性较小; (3) 地形特征、不同深度土壤水分和苜蓿地上生物量解释了退化苜蓿草地其它草本群落变异的 87.8%, 其中坡向、苜蓿地上生物量、0—20 cm 和 20—80 cm 土壤水分 4 个因子解释了 79.3% 的群落变异。研究认为, 半干旱黄土丘陵区不同地形条件引起坡面土壤水分变化, 进而影响退化苜蓿草地地上生物量, 使得苜蓿退化程度不同, 而苜蓿退化程度和 0—80 cm 土壤水分决定了不同部位草本分布及多样性。

关键词: 半干旱黄土区; 坡面; 苜蓿退化; 多样性; 生物量

Effects of alfalfa (*Medicago sativa* L.) degradation on herbage distribution and diversity in the semi-arid Loess Plateau

WANG Ziting^{1,2}, YANG Lei³, LI Guang^{1,*}, CHAI Chunshan², ZHANG Yangdong², CHEN Rong⁴, ZHANG Jiqiang²

1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Academy of Forestry Science, Lanzhou 730020, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi 743000, China

Abstract: The degeneration of alfalfa (*Medicago sativa* L.) caused by soil desiccation can significantly affect the distribution and diversity of the herbage community in the semi-arid Loess Plateau. However, the mechanism by which soil moisture redistribution caused by topographic features at the hillslope scale influences the degradation of alfalfa and the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561112, 41871194); 国家重点研发计划课题 (2016YFC0501701); 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-STZ-DTP-036); 农牧交错带生态经济发展模式示范推广

收稿日期: 2018-05-18; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lig@gsau.edu.cn

distribution of other herbage has received limited attention. In this study, the Longtan watershed was selected as the study area. The above-ground biomass of alfalfa and diversity of herbage were investigated, and soil moisture content at a depth of 0—200 cm under different topographic conditions was monitored. The relationships between topographic features, above-ground biomass of alfalfa, soil moisture content, and herbage distribution and diversity were quantitatively analyzed by using ANOVA, Pearson's correlation analysis, and CCA. The following results were obtained: (1) Topographical features significantly affected vegetation community characteristics. Significant differences in the above-ground biomass of alfalfa were found between different slope aspects and slope positions. The biomass of alfalfa on the middle-hillslope and foot-hillslope positions was significantly higher than that on the upper-hillslope in west- and east-facing hillslopes. However, the spatial variability of the biomass of other herbage, species richness, and diversity indices differed with the spatial variation characteristics of biomass. (2) The above-ground biomass of alfalfa was significantly positively correlated with soil moisture content at a depth of 80—200 cm, whereas the correlations between biomass and soil moisture content at a depth of 0—20 cm and 20—80 cm were not significant. (3) The topographical features, soil moisture content at different depths, and biomass of alfalfa explained 87.8% of the variation of other herbage in the alfalfa degeneration communities. Furthermore, the total variation of the slope aspect, biomass of alfalfa, soil moisture content at 0—20 cm, and soil moisture content at 20—80 cm explained 79.3% of the variation in plant communities. The topographical factors caused the spatial and temporal variation in soil moisture content, which affected the degree of alfalfa degeneration through the variation in alfalfa's above-ground biomass in the semi-arid loess hilly watershed. The distribution and diversity of herbage were determined by the degree of alfalfa degeneration and the soil moisture content at 0—80 cm under different topographic conditions.

Key Words: semi-arid Loess Plateau; hillslope; alfalfa degeneration; diversity; biomass

人工植被恢复是黄土高原控制水土流失的关键措施之一^[1-4]。半干旱黄土区沟壑纵横、土壤侵蚀严重,严重制约了该区社会经济发展和区域环境改善,我国自 20 世纪 80 年代以来陆续开展了以小流域为单元的水土流失综合治理工程。尤其是 1999 年开始实施了大面积退耕还林还草工程,改变了这一地区植被覆盖状况,有效减少了土壤侵蚀,改善了区域生态环境^[5-10]。然而,我们对该区域人工植被恢复演替过程的认识还存在一定的不足,尤其是对地形引起的土壤水分再分配对人工植被的影响及群落特征响应还缺乏系统的探讨。

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 作为一种优良的牧草,具有较好的抗旱固土能力,在黄土高原被广泛种植^[11-12]。然而,紫花苜蓿根系较深,随着苜蓿生长其对水分的消耗亦在增加。罗珠珠等^[13]在陇中黄土区的研究发现,人工种植苜蓿 1 年以后 0—300 cm 土壤水分出现不同程度的干旱且随种植年限的增加逐渐加剧。万素梅等^[14]研究发现,黄土高原苜蓿随生长年限的增加土壤干层不断加深,苜蓿生长低于 8 年在 250—350 cm 土层出现轻度干层,超过 8 年干层范围延深至 500 cm 土层以下,超过 18 年则深层土壤通体干化且水分难以恢复。由此可见,在黄土区种植苜蓿虽然能够减少水土流失、增加土壤肥力,但其对土壤水分的过度消耗会引起不同深度土壤干化从而引起苜蓿草地退化。此外,有研究还发现苜蓿草地退化也在一定程度上促进了表层土壤水分恢复,这为其它草本植物生长提供了适宜条件,促进了人工苜蓿草地群落向天然草地群落的转变^[15-17]。土壤水分变化、苜蓿退化等驱动了人工苜蓿草地草本群落的恢复和演替过程,而这一过程又受坡面地形条件的影响。鉴于此,本研究以坡面退化苜蓿草地为研究对象,探索坡向及坡位变化对紫花苜蓿草地群落组成的影响,确定地形变化、土壤水分及苜蓿退化程度对坡面草地群落组成及分布的耦合影响和互馈作用特征,为半干旱黄土区坡面退化人工草地的恢复及可持续管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市龙滩小流域 (104°27'—104°32'E, 35°43'—35°46'N), 研究区属典型半干旱黄土丘陵区,流域面积 16 km², 平均海拔 1900 m。研究区年平均气温 6.8℃, 1 月份平均气温 - 7.9℃, 极端最高温

38.5℃,平均无霜期 152 d,平均日照时数 2052 h。多年平均降水量为 386 mm,降雨主要集中在 7—9 月份,潜在蒸发量 1439 mm。年平均相对湿度 72%,干燥度 1.9。流域内土壤以黄绵土为主,有机质含量低,土壤贫瘠且易侵蚀。天然植被以多年生草本为主,主要为长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr.)等。因退耕还林(草)政策的实施,流域在 2003 年以来大面积人工种植的牧草为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)。

2 研究方法

2.1 监测样点布设

在研究区内一个全部种植紫花苜蓿的典型子流域选择东向、西向和北向 3 个坡面,分别在每个坡面自上而下依次选取上、中、下 3 个坡位布设监测样点(表 1),开展生长季土壤水分的定位监测,并开展苜蓿植被群落调查。研究区苜蓿均为 2003 年种植,种植年限 14 年,苜蓿在坡面上自上而下沿等高线呈条带状种植,条带宽 3—5 m。研究区内苜蓿在种植初期存在较好的人工管理,根据降水状况每年收割 1—2 次,但近年来随着流域内人口逐渐迁出,苜蓿草地也疏于管理或无人管理,均出现不同程度的退化。

表 1 试验样地地形特征基本信息
Table 1 Basic description of experimental sites

样地编号 Experimental site	海拔 Altitude/m	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect/°	坡度 Slope gradient/°	土壤容重 Bulk density/g/cm ³	土壤类型 Soil
W1	2068	上坡位	279°	29°	1.23±0.04	黄绵土
W2	2048	中坡位	283°	19°	1.24±0.04	黄绵土
W3	2031	下坡位	273°	16°	1.27±0.05	黄绵土
N1	2127	上坡位	357°	29.5°	1.15±0.04	黄绵土
N2	2115	中坡位	16°	23.5°	1.20±0.06	黄绵土
N3	2100	下坡位	347°	28°	1.23±0.03	黄绵土
E1	2074	上坡位	84°	23°	1.20±0.06	黄绵土
E2	2042	中坡位	38°	26°	1.20±0.05	黄绵土
E3	2022	下坡位	42°	2°	1.22±0.05	黄绵土

W1:西上坡位,West upper slope position;W2:西中坡位,West middle slope position;W3:西下坡位,West foot slope position;N1:北上坡位,North upper slope position;N2:北中坡位,North middle slope position;N3:北下坡位,North foot slope position;E1:东上坡位,East upper slope position;E2:东中坡位,East middle slope position;E3:东下坡位,East foot slope position

2.2 数据采集

2017 年 7 月初—8 月底期间在各监测样点上开展草本群落组成调查并测定草本地地上生物量。每个监测样点选取 3 个 1 m × 1 m 的样方,统计样方内草本物种数、高度、多度、盖度、分布、生活力及物候,随后将紫花苜蓿和其它草本地地上部分进行刈割。样品带回实验室称重后在 105℃ 下杀青 1 h 后再在 80℃ 下烘干 72 h,分别获得紫花苜蓿和其他草本地地上生物量。

利用 GPS 记录各监测样点的经纬度及海拔信息,利用坡度仪和罗盘分别测定坡度和坡向。在每个监测样地预先布设聚碳酸酯探管,利用 Trime-FM 土壤水分速测仪测定土壤水分含量。于 2017 年生长季(5 月初—10 月中旬)对各监测样点土壤水分含量进行测定,每 15 d 测定一次,土壤剖面 0—40 cm 每 10 cm 为一测层,40—200 cm 每 20 cm 为一测层,每次每层重复测定并取平均值作为该次该层土壤含水量(%),生长季内剖面土壤水分变化见图 1。根据该区草本及紫花苜蓿根系主要分布范围,本文分别统计植物生长季内 0—20 cm、20—80 cm 和 80—200 cm 3 个层次土壤含水量,分别命名为 SW1、SW2 和 SW3 用以分析不同土层深度土壤含水量与草本分布及多样性之间的关系。

2.3 数据统计

统计各监测样点内草本物种数,使用每种草本的相对高度和相对盖度计算其重要值(*IV*)^[18]。利用草本

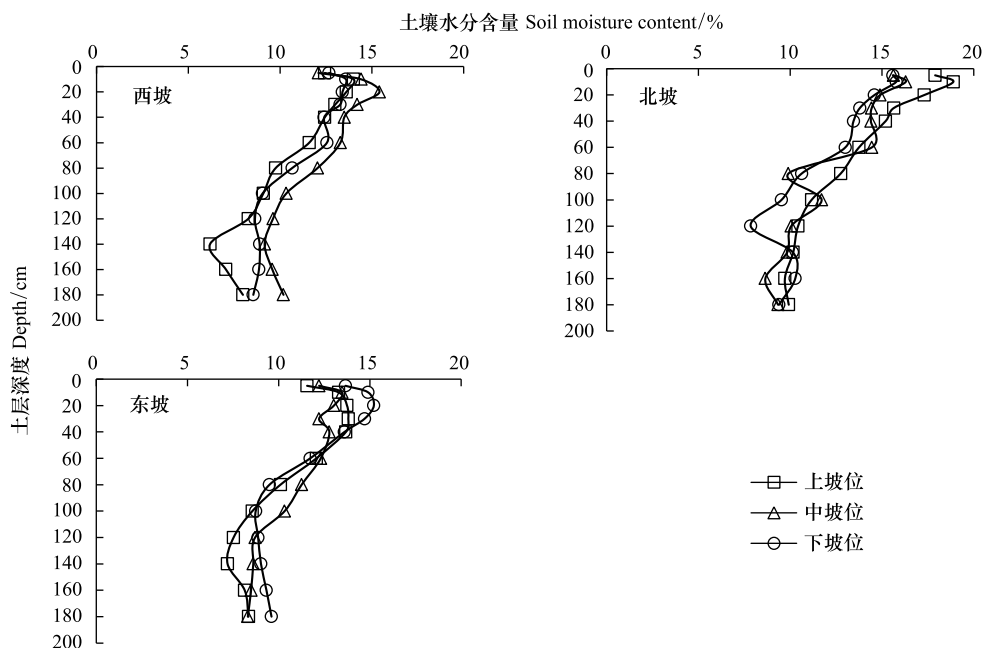


图1 监测样点生长季 0—200 cm 剖面平均土壤水分含量

Fig.1 Vertical distributions of temporal-averaged soil moisture content on different sample plots

重要值计算各监测样点内草本群落 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数,利用 Sorenson 相似性指数比较各监测样点内草本群落组成的相似性。计算方法见下述有关公式。

重要值(IV): $IV = RHI + RCO$

Simpson 优势度指数: $D = 1 - \sum p_i^2$

Shannon-Wiener 多样性指数: $H' = -\sum p_i \ln p_i$

Pielou 均匀度指数: $J = (-\sum p_i \ln p_i) / \ln S$

Sorenson 相似性指数: $C = 2m / (a + b)$

式中, RHI 为相对高度; RCO 为相对盖度; p_i 为第 i 个物种的相对重要值; S 为种 i 所在样方的物种总数; a 和 b 为群落 A 和 B 的物种数; m 为群落 A 和 B 共有的物种数。

利用方差分析检验坡向、坡位及二者的交互对草本地上总生物量、苜蓿生物量和其它草本生物量分布的影响是否显著。利用 Pearson 相关分析苜蓿地上生物量、其他草本地上生物量、草本地上总生物量、物种丰富度、多样性、均匀度和优势度指数及 4 个优势草本种(赖草、长芒草、茵陈蒿和阿尔泰狗娃花)与不同深度土壤水分含量(0—20 cm、20—80 cm 和 80—200 cm)及苜蓿地上生物量间的相关性。利用典范对应分析(CCA)确定地形(坡向和坡位)、苜蓿生长状况(地上生物量)和土壤水分与坡面草本群落分布之间的关系,采用蒙特卡洛置换检验(Monte-Carlo permutation test 999)第一排序轴和所有排序轴的显著性,然后通过 CCA 排序中逐步筛选(Interactive-forward-selection)过程和蒙特卡洛置换检验(Monte-Carlo permutation test 999)确定环境因子的相对贡献率。CCA 分析使用 Canoco for Windows 4.5 软件包。地形、土壤水分和苜蓿的生物量等 6 个因子和 4 个优势草本种与排序轴 1 和轴 2 的关系通过 Pearson 相关分析确定。统计分析使用 SPSS 21.0 软件包。

3 结果

3.1 不同地形条件下草本群落物种组成

3 条样带不同坡位苜蓿草地内共有草本 26 种, 分属 10 科 20 属, 其中菊科(8 种)、禾本科(4 种)、豆科(4 种)和蔷薇科(4 种)是主要的草本类群(表 2)。西坡样带自上而下苜蓿重要值依次增加, 草本物种数依次

减少。西坡菊科茵陈蒿重要值在不同坡位间相差不大,阿尔泰狗娃花分布在中、上坡位且重要值相近;禾本科赖草和长芒草重要值上坡位高于中、下坡位;蔷薇科星毛委陵菜仅分布于上坡位。北坡样带不同坡位间苜蓿重要值变化不大,草本物种数相差不大。北坡菊科阿尔泰狗娃花重要值中、下坡位高于上坡位,茵陈蒿重要值上坡位高于中、下坡位;禾本科长芒草分布在上、下坡位且重要值上坡位大于下坡位,赖草分布在中、下坡位且重要值相近;蔷薇科二裂委陵菜仅分布在上坡位,伏毛山莓草分布在中、下坡位且重要值相近。东坡样带自上而下苜蓿重要值依次增加,草本物种数依次降低。东坡禾本科长芒草重要值在上坡位高于中、下坡位,禾本科赖草、蔷薇科二裂委陵菜、菊科阿尔泰狗娃花重要值在不同坡位间均相差不大。

表 2 不同坡位苜蓿草地草本的重要值

物种名称 Species	西坡 West slope			北坡 North slope			东坡 East slope		
	W1	W2	W3	N1	N2	N3	E1	E2	E3
赖草 <i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel.	51	0	31	0	40	35	47	34	34
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i> Trin.	0	24	26	0	0	0	0	0	0
长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin.	55	0	0	49	0	27	52	8	11
狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv.	0	5	0	0	0	0	0	0	0
粗枝猪毛菜 <i>Salsola subcrassa</i> M. Pop.	8	0	0	12	9	10	0	0	10
大花蚓果芥 <i>Torulia humilis</i> f. <i>grandiflora</i>	7	0	0	10	14	11	0	0	0
星毛委陵菜 <i>Potentilla acaulis</i> L.	6	0	0	0	0	0	25	0	0
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> L.	0	0	0	8	0	0	7	8	8
西山委陵菜 <i>Potentilla sischanensis</i> Bge. ex Lehm.	0	0	0	0	0	0	6	0	0
伏毛山莓草 <i>Sibbaldia adpressa</i> Bge.	0	0	0	0	6	5	0	0	0
灰叶黄耆 <i>Astragalus discolor</i> Bunge ex Maxim.	0	0	0	15	0	0	0	0	0
糙叶黄耆 <i>Astragalus scaberrimus</i> Bunge	0	0	0	4	0	0	0	0	0
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i> L.	0	96	104	72	88	71	0	98	106
披针叶野决明 <i>Thermopsis lanceolata</i> R. Br.	0	0	0	0	0	0	16	0	0
野亚麻 <i>Linum stelleroides</i> Planch.	0	0	0	0	0	10	0	0	0
狼毒 <i>Euphorbia fischeriana</i> Steud.	0	0	0	0	0	0	11	0	0
北柴胡 <i>Bupleurum chinense</i> DC.	0	0	0	0	0	0	0	35	0
鹤虱 <i>Lappula myosotis</i> V. Wolf	4	0	0	0	0	0	0	0	0
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	25	22	24	14	12	10	0	0	18
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> Willd.	0	0	0	0	0	0	22	0	0
铁杆蒿 <i>Artemisia sacrorum</i> Ledeb.	14	0	0	0	0	0	0	0	0
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> (Willd.) Novopokr.	13	18	0	15	24	20	13	10	12
抱茎小苦荬 <i>Ixeridium sonchifolium</i> (Maxim.) Shih	0	16	0	0	0	0	0	0	0
抱茎风毛菊 <i>Saussurea chingiana</i> Hand.-Mazz.	0	11	6	0	0	0	0	0	0
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i> L.	0	13	0	0	7	0	0	3	0
苣荬菜 <i>Sonchus arvensis</i> L.	0	0	0	0	0	0	0	3	0

3.2 不同地形条件地上生物量比较

不同地形条件草本群落地上生物量的方差分析结果表明,坡向对苜蓿草地地上总生物量影响较小($P=0.524$),坡位及坡向和坡位的交互均对草本地地上总生物量有显著影响($P<0.001$, $P=0.006$)。西坡和东坡样带,中、下坡位草本群落地上总生物量显著高于上坡位,其中西坡样带表现尤为明显(图 2)。苜蓿地上生物量在不同坡位间的变化趋势与地上草本群落总生物量变化相近,坡向、坡位及二者的交互均对苜蓿地上生物量有显著影响($P<0.001$, $P<0.001$, $P<0.001$)。然而,其它草本的地上生物量在不同坡位间的变化趋势与苜蓿地上生物量变化相反,即西坡和东坡样带上、中坡位其他草本地地上生物量显著高于下坡位(图 2)。

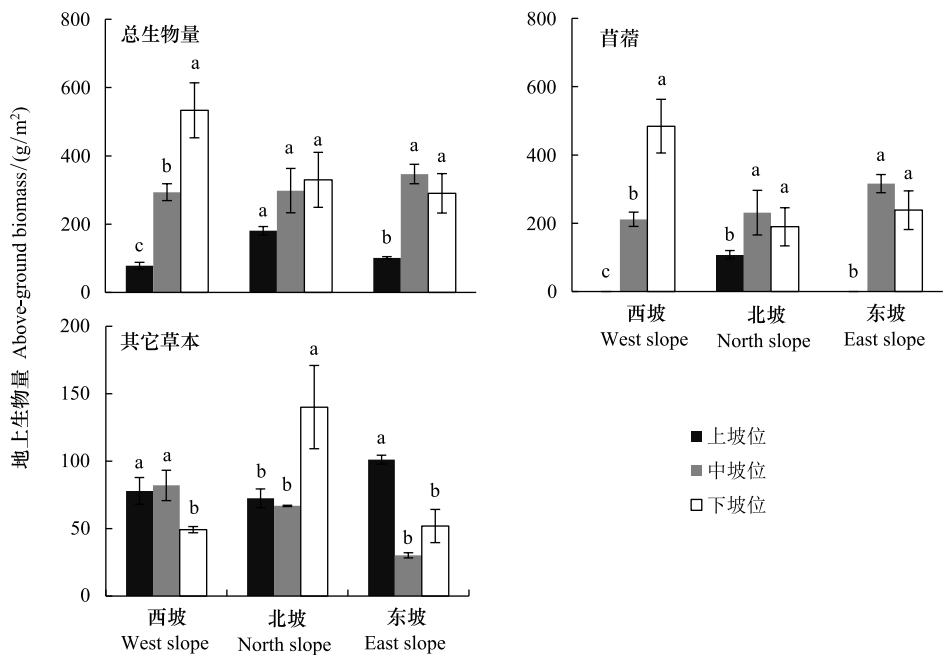


图 2 不同坡位退化苜蓿草地苜蓿、其它草本和总草本地地上生物量比较

Fig.2 Comparison of above-ground biomass between alfalfa, other herbs, and total biomass in experimental sites

3.3 不同地形条件其它草本群落结构及相似性

3 条样带内物种丰富度及多样性指数表现为西坡和东坡高于北坡,均匀度指数则表现为西坡和东坡低于北坡,优势度指数在不同坡向间变化较小(表 3)。其中西坡不同坡位间,其他草本的物种丰富度自下而上逐渐升高,多样性和优势度指数上、中坡位高于下坡位,均匀度指数上坡位低于中、下坡位;北坡不同坡位其他草本多样性指数均相差较小;东坡样带其它草本的物种丰富度自下而上也逐渐升高,多样性和优势度指数上坡位略高于中、下坡位,均匀度指数不同坡位间相差较小(表 3)。

表 3 不同地形条件草本多样性比较

多样性指标 Diversity indices	西坡 West slope				北坡 North slope				东坡 East slope			
	W1	W2	W3	W	N1	N2	N3	N	E1	E2	E3	E
多样性指数 Shannon-Wiener index	1.83	1.86	1.27	2.22	1.82	1.73	1.91	2.14	1.96	1.57	1.65	2.20
均匀度指数 Pielou index	0.83	0.96	0.91	0.84	0.88	0.89	0.92	0.86	0.89	0.81	0.92	0.83
优势度指数 Simpson index	0.80	0.84	0.70	0.86	0.79	0.79	0.83	0.86	0.83	0.74	0.78	0.85
物种丰富度 Species richness	9	7	4	14	8	7	8	12	9	7	6	14

W: 西坡, West slope; N: 北坡, North slope; E: 东坡, East slope

不同坡向间其它草本物种相似度指数表现为,西坡与北坡相似度指数 0.54、西坡与东坡 0.57、北坡和东坡 0.54。不同坡位间其他草本物种相似度指数表现为,上坡位与中坡位相似度指数 0.48,上坡位与下坡位 0.55,中坡位和下坡位 0.79。

3.4 苜蓿退化、土壤水分及地形变化对草本群落分布的影响

相关分析表明,苜蓿地上生物量与其它草本地地上生物量呈显著负相关($r=-0.36, P=0.062$),与其它草本的物种丰富度、多样性和优势度指数呈负相关关系,而与其它草本的均匀度指数呈正相关关系;不同深度土壤水分与草本群落结构的相关性均较小(表 4)。

表 4 草本群落结构及 4 个优势种与不同深度土壤水分及苜蓿生物量的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficient between herbage community structure & four dominant species and different depths of soil moisture &alfalfa biomass

指标 Indices	0—20 cm 土壤水分含量 Soil moisture of 0—20 cm		20—80 cm 土壤水分含量 Soil moisture of 20—80 cm		80—200 cm 土壤水分含量 Soil moisture of 80—200 cm		苜蓿地上生物量 Above-ground biomass of alfalfa	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
群落结构 Community structure								
物种丰富度 Species richness	0.150	0.710	0.112	0.774	-0.187	0.630	-0.672	0.047
多样性指数 Shannon-Wiener index	0.259	0.501	0.309	0.418	0.009	0.983	-0.532	0.140
均匀度指数 Pielou index	0.197	0.612	0.384	0.307	0.389	0.301	0.321	0.399
优势度指数 Simpson index	0.200	0.605	0.335	0.378	0.048	0.902	-0.443	0.232
4 个优势种 Four dominant species								
赖草 <i>L.secalinus</i>	-0.545	0.130	-0.841	0.004	-0.664	0.051	-0.270	0.482
长芒草 <i>S.bungeana</i>	0.111	0.777	-0.185	0.634	-0.390	0.299	-0.642	0.062
茵陈蒿 <i>A.capillaris</i>	0.400	0.286	0.036	0.926	0.229	0.554	0.246	0.524
阿尔泰狗娃花 <i>H.altaicus</i>	0.385	0.306	0.360	0.341	0.231	0.549	-0.223	0.565

苜蓿地上生物量与苜蓿重要值呈极显著的正相关关系($P<0.001$),本文选用苜蓿地上生物量反映苜蓿的退化程度。苜蓿生物量、不同深度土壤水分及地形变化与其它草本群落的 CCA 排序结果表明,6 个因子解释 87.8%的草本群落变异($P=0.002$)。第 1 排序轴与坡位($P=0.266$)和苜蓿地上生物量($P=0.143$)呈正相关,与坡向($P=0.044$)呈显著负相关,它解释了 30.1%的草本群落变异;第 2 排序轴与 0—20 cm 土壤水分呈显著负相关($P=0.039$),与 80—200 cm 土壤水分和苜蓿的地上生物量也成负相关($P=0.219$; $P=0.268$),它解释了 20.4%的草本群落变异。从排序图中还可以看出,坡向、坡位及苜蓿地上生物量变化导致西坡草本组成与东坡和北坡不同,不同坡位 0—20 cm、80—200 cm 土壤水分和苜蓿地上生物量的变化导致西坡和东坡样带上坡位和中、下坡位草本群落组成相差较大(图 3)。pCCA 排序结果表明,坡向(解释量 21.5%, $P=0.053$)、苜蓿地上生物量(21.2%, $P=0.065$)、0—20 cm 土壤水分含量(19.1%, $P=0.084$)和 20—80 cm 土壤水分含量(19.1%, $P=0.084$)对草本群落分布的影响较大,而 80—200 cm (10.5%, $P=0.304$)和坡位(10.3%, $P=0.302$)对草本群落分布的影响较小。

不同草本种对土壤水分及苜蓿退化的响应模式也不一致,赖草、长茅草、茵陈蒿和阿尔泰狗娃花是退化苜

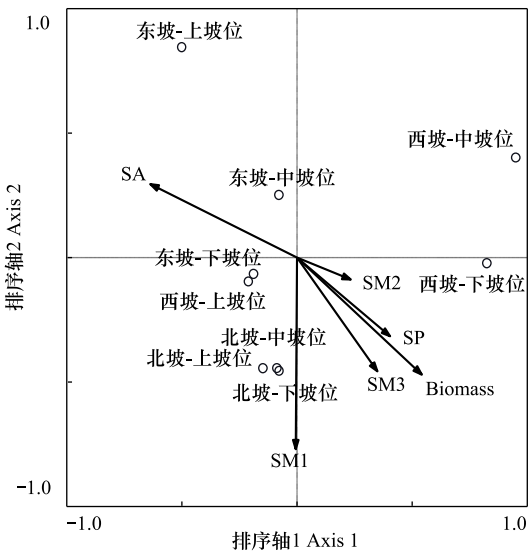


图 3 地形、土壤水分和苜蓿地上生物量对其它草本群落分布影响的 CCA 排序图

Fig.3 CCA analyses between topographical features, soil moisture content & above-ground biomass of alfalfa and herbage community distribution

SA:坡向, Slope aspect; SP:坡位, Slope position; Biomass: 苜蓿地上生物量, Above-ground biomass of alfalfa; SW1:0—20 cm 土壤水分含量, Soil moisture content of 0—20 cm; SW2:20—80 cm 土壤水分含量, Soil moisture content of 20—80 cm; SW3:80—200 cm 土壤水分含量, Soil moisture content of 80—200 cm

苜蓿地常见的草本植物,在 3 条样带内均有分布且重要值较高。赖草与排序轴 1 负相关($P=0.239$),与不同深度土壤水分和苜蓿地上生物量负相关(表 4),它们解释了 68.0%($P=0.068$)的赖草重要值变化。长芒草与排序轴 1 负相关($P=0.007$),与 0—20 cm 土壤水分正相关(表 4),与 20—80 cm、80—200 cm 和苜蓿地上生物量负相关(表 4),它们解释了 11.0%($P=0.424$)的长芒草重要值变化。茵陈蒿与排序轴 1 正相关($P=0.164$),与排序轴 2 呈负相关($P=0.093$),与不同深度土壤水分和苜蓿地上生物量均正相关(表 4),它们仅解释了茵陈蒿 9.0%($P=0.431$)的重要值变化。阿尔泰狗娃与排序轴 1 和排序轴 2 均负相关($P=0.214$; $P=0.546$),与不同深度土壤水分正相关(表 4),与苜蓿地上生物量负相关(表 4),它们解释了 28.0%($P=0.295$)的阿尔泰狗娃花重要值变化。

4 讨论

半干旱黄土区土壤水分是影响植被生长的关键限制因子^[19-20],加之该区沟壑纵横,坡面地形变化改变了土壤水分的再分配,从而直接或间接地影响了植被生长。已有研究表明,坡面及微地形变化影响了土壤水分的有效性,在半干旱黄土丘陵区从坡顶到坡底不同土层深度土壤含水量变化趋势为先增加后持平或减小^[21],同时塌陷、缓台、切沟、浅沟等微生境土壤水分要好于原状坡和陡坎^[22]。此外,研究还发现植被恢复类型及年限不同,坡面土壤水含量亦存在差异^[17,23-25]。总之,坡面人工植被恢复初期,随着植被盖度的增加会减弱土壤侵蚀,然而随着植被地上和地下生物量的增加,土壤水分出现亏缺将会抑制植物生长从而引起植被退化,进而影响人工植被群落组成及其群落物种多样性^[15,26-30]。紫花苜蓿是典型的深根系、多年生草本,种植 6—7 年之后草地产量会迅速下降^[31-32],故半干旱黄土区大面积种植的紫花苜蓿因土壤水分的限制以及种植年限过长而逐渐衰退,加之后期缺乏合理的田间管理,加速了人工苜蓿草地退化。本文研究的苜蓿草地均处在退化阶段(栽植年限均为 14 年),但退化程度因坡向及地形部位不同而异。研究发现北坡样带属阴坡生长季内 0—200 cm 土壤水分(13.25%)条件好于半阳(阴)坡的西坡和东坡样带(11.72%和 11.74%),其中北坡样带不同坡位间苜蓿的地上生物量相差较小,而西坡和东坡样带上坡位苜蓿地上生物量明显低于中下坡位。该结论与我们关于坡面地形及土壤水分变化对柠条生长影响的研究结果相类似^[33],表明坡面地形引起土壤水分的差异进而影响了苜蓿草地退化过程。此外,研究还发现不同坡向苜蓿地上生物量与 80—200 cm 土壤水分呈显著正相关关系,而与生长季内 0—80 cm 土壤水分含量呈负相关关系,这在一定程度上说明苜蓿的退化有利于恢复 0—80 cm 土壤水分^[16,34],同时苜蓿的生长会利用深层土壤水分,不同坡位深层土壤水分含量的高低会影响苜蓿的退化程度。Yang 等^[24]和杨永东等^[35]针对半干旱黄土丘陵区苜蓿草地的研究发现,苜蓿的生长会导致 100—200 cm 间土壤水分亏缺,表明土壤水分持续减少是苜蓿退化的重要驱动要素,土壤水分含量在坡面上的变化与苜蓿退化程度密切相关。

坡面苜蓿的退化过程强烈影响了其他草本的分布及多样性。李裕元和邵明安^[15]在陕西省神木县和王书转等^[36]在甘肃省镇原县的研究均发现随着苜蓿草地的退化,草本的物种数开始增加,并且其群落也开始变化,草地退化前期物种丰富度、群落多样性在 6 年之前升高较快,6—10 年达到最高,10 年以上逐渐过渡到长芒草群落。本文的研究发现苜蓿地上生物量与其它草本地上生物量呈显著负相关,同时其它草本的物种丰富度、多样性和均匀度指数亦与苜蓿地上生物量呈负相关关系,这表明苜蓿的退化程度影响了其他草本的多样性,促进了草本群落从人工草地群落向天然草地群落的转变。此外,研究还发现不同坡向及坡位其他草本组成存在一定差异,这可能与不同草本种对地形及苜蓿退化引起的土壤水分变化有关。坡面退化苜蓿草地内赖草对土壤水分、长芒草对苜蓿地上生物量响应较为敏感,而茵陈蒿和阿尔泰狗娃花对土壤水分和苜蓿退化的响应均不敏感。茵陈蒿和阿尔泰狗娃花是流域内阳坡常见草本植物,常为长芒草等禾本科植物群落的主要伴生物种^[32],其分布受地形和苜蓿退化的影响较小;而赖草和长芒草等禾本科植物则易受苜蓿退化引起的土壤水分变化的影响,苜蓿退化促进了人工苜蓿群落向长芒草群落的过渡^[15,37]。该现象在研究区西坡样带表现最为明显,其上坡位苜蓿已完全退化,形成了以长芒草为优势种的次生天然草本顶级群落,而中、下坡位却未

见长芒草,且苜蓿地上生物量下坡位显著高于中坡位,即紫花苜蓿与长芒草具有相互消长的种群动态关系,该研究结果与李裕元等^[15]在陕北黄土高原的研究结果相似。总之,坡面苜蓿草地退化过程中,坡向和坡位等微地形可能改变土壤水分条件,其与苜蓿退化程度互馈互作影响了不同微地形下其它草本分布及多样性对苜蓿草地退化的响应模式^[22,37-39]。

黄土区人工苜蓿草地退化改善了表层土壤水分,从而促进了一些浅根系草本的生长,驱动了天然草本群落的恢复演替过程。另一方面,地形变化改变土壤水分的时空分布格局,影响了人工苜蓿草地草本群落的恢复演替过程。本研究仅针对苜蓿草地退化后期地形和土壤水分变化对坡面草本分布及多样性的影响,后期的研究还需要借助控制试验和长期定位监测,以期系统地揭示退化人工植被生态系统中群落演替特征及其影响机制,为半干旱区人工植被恢复及可持续性管理提供科学依据。

5 结论

半干旱黄土丘陵区西坡、东坡和北坡人工苜蓿草地样带内苜蓿的地上生物量明显不同,西坡和东坡样带中、下坡位苜蓿地上生物量明显高于上坡位,而其它草本的地上生物量、物种丰富度和多样性指数的变化趋势则与之相反,这说明苜蓿的退化影响了其它草本的分布及多样性。土壤水分是影响苜蓿和其它草本生长的重要环境因子,80—200 cm 土壤水分与苜蓿的地上生物量显著正相关;0—20 cm 和 20—80 cm 土壤水分与其它草本地上生物量的相关性略高于 80—200 cm 土壤水分。地形、不同深度土壤水分和苜蓿地上生物量解释了其它草本群落变异的 87.8%,其中坡向、苜蓿地上生物量、0—20 cm 和 20—80 cm 土壤水分 4 个因子解释了 79.3%的群落变异。此外,研究还发现不同草本物种对退化苜蓿草地地形变化、土壤水分及苜蓿地上生物量变化的响应模式不同,赖草对不同深度土壤水分的响应较敏感,长茅草对苜蓿地上生物量响应较敏感,而茵陈蒿和阿尔泰狗娃花对其响应不敏感。

参考文献 (References):

- [1] 李凤民,徐进章,孙国钧. 半干旱黄土高原退化生态系统的修复与生态农业发展. 生态学报, 2003, 23(9): 1901-1909.
- [2] 王哈生. 黄土高原植被恢复策略回顾. 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 42-45.
- [3] 张金屯. 黄土高原植被恢复与建设的理论和技术问题. 水土保持学报, 2004, 18(5): 120-124.
- [4] 张文辉,刘国彬. 黄土高原植被恢复与建设策略. 中国水土保持, 2009, (1): 24-27.
- [5] 刘国彬,许明祥,王国良,陈云明. 黄土高原小流域综合治理及生态恢复过程——以安塞纸坊沟小流域为例//中国水土保持探索与实践——小流域可持续发展研讨会论文集(上). 北京:水利部,中科院,世界银行,中国水土保持学会, 2005: 64-70.
- [6] Fu B J, Wu B F, Lü Y H, Xu Z H, Cao J H, Niu D, Yang G S, Zhou Y M. Three gorges project: efforts and challenges for the environment. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2010, 34(6): 741-754.
- [7] Chen L D, Yang L, Wei W, Wang Z T, Mo B R, Cai G J. Towards sustainable integrated watershed ecosystem management: a case study in Dingxi on the Loess Plateau, China. Environmental Management, 2013, 51(1): 126-137.
- [8] Wang J J, Jiang Z D, Xia Z L. Grain-for-Green policy and its achievements//Tsunekawa A, Liu G B, Yamanaka N, Du S, eds. Restoration and Development of the Degraded Loess Plateau, China. Tokyo: Springer, 2014: 137-147.
- [9] Wang Z T, Yang L, Cai G J, Mo B R, Chai C S. A quantitative health evaluation of an eco-economy in the semi-arid Loess Plateau of China. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2015, 21(7): 1884-1902.
- [10] 刘国彬,上官周平,姚文艺,杨勤科,赵敏娟,党小虎,郭明航,王国梁,王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [11] Yuan Z Q, Yu K L, Epstein H, Fang C, Li J T, Liu Q Q, Liu X W, Gao W J, Li F M. Effects of legume species introduction on vegetation and soil nutrient development on abandoned croplands in a semi-arid environment on the Loess Plateau, China. Science of the Total Environment, 2016, 541: 692-700.
- [12] Zhang X, Zhao W W, Liu Y X, Fang X N, Feng Q. The relationships between grasslands and soil moisture on the Loess Plateau of China: a review. Catena, 2016, 145: 56-67.
- [13] 罗珠珠,李玲玲,牛伊宁,蔡立群,张仁陟,谢军红. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿地土壤干燥化特征及适宜种植年限. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3059-3065.

- [14] 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 杨宝平. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复. 生态学报, 2008, 28(3): 1045-1051.
- [15] 李裕元, 邵明安. 黄土高原北部紫花苜蓿草地退化过程与植物多样性研究. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2321-2327.
- [16] 程积民, 程杰, 高阳. 半干旱区退耕地紫花苜蓿生长特性与土壤水分生态效应. 草地学报, 2011, 19(4): 565-569, 576-576.
- [17] Zhang Q Y, Jia X X, Zhao C L, Shao M A. Revegetation with artificial plants improves topsoil hydrological properties but intensifies deep-soil drying in northern Loess Plateau, China. Journal of Arid Land, 2018, 10(3): 335-346.
- [18] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. 生态学报, 1995, 15(3): 268-277.
- [19] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量. 水土保持通报, 2009, 29(5): 69-72.
- [20] Yang L, Zhang H D, Chen L D. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas. Science China Earth Sciences, 2018, 61(3): 292-301.
- [21] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究. 农业工程学报, 2003, 19(6): 5-9.
- [22] 邝高明, 朱清科, 刘中奇, 赵荟, 王晶. 黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的影响. 水土保持研究, 2012, 19(3): 74-77.
- [23] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(6): 707-718.
- [24] Yang L, Wei W, Chen L D, Mo B R. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2012, 475: 111-122.
- [25] 安文明, 韩晓阳, 李宗善, 王帅, 伍星, 吕一河, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分剖面变化的影响. 生态学报, 2018, 38(13): 4852-4860.
- [26] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. 生态学报, 2003, 23(8): 1640-1647.
- [27] 白文娟, 焦菊英, 马祥华, 温仲明, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1317-1322.
- [28] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2010, 381(1): 9-17.
- [29] 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.
- [30] Huang Z, Liu Y, Cui Z, Fang Y, He H H, Liu B R, Wu G L. Soil water storage deficit of alfalfa (*Medicago sativa*) grasslands along ages in arid area (China). Field Crops Research, 2018, 221: 1-6.
- [31] 程积民, 万惠娥, 王静. 黄土丘陵区紫花苜蓿生长与土壤水分变化. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [32] 李裕元, 邵明安, 上官周平, 樊军, 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.
- [33] 王子婷, 杨磊, 蔡国军, 莫保儒, 柴春山, 戚建莉, 张洋东. 半干旱黄土区坡面尺度柠条生长状况及影响要素分析. 生态学报, 2017, 37(23): 7872-7881.
- [34] Li J P, Xie Y Z, Deng L, Wang K B, Li X W. Soil Physico-chemical property dynamics when continually growing alfalfa (*Medicago sativa*) in the Loess Plateau of China. Nature Environment and Pollution Technology, 2018, 17(1): 11-20.
- [35] 杨永东, 张建新, 蔡国军, 莫保儒, 柴春山, 王子婷. 黄土丘陵区不同立地条件下紫花苜蓿地土壤水分动态变化. 草业科学, 2008, 25(10): 25-28.
- [36] 王书转, 郝明德, 普琼, 吴振海. 黄土区苜蓿人工草地群落生态与生产功能演替. 草业学报, 2014, 23(6): 1-10.
- [37] 莫保儒, 蔡国军, 赵廷宁, 于洪波, 邹天福, 柴春山, 王子婷. 黄土丘陵沟壑区植被恢复过程中物种组成及多样性. 草业科学, 2010, 27(2): 48-53.
- [38] 赵荟, 朱清科, 秦伟, 刘中奇, 王晶, 邝高明. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究. 水土保持通报, 2010, 30(3): 64-68.
- [39] 卢纪元, 朱清科, 陈文思, 王瑜. 陕北黄土区植被特征对坡面微地形的响应. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 53-60.