

黄土丘陵区沟沿线不同微地形植物群落特征

陈佳敏,王宁[†],赵富王,何欣月

(陕西师范大学地理科学与旅游学院,陕西师范大学地理学国家级实验教学示范中心,710119,西安)

摘要: 沟沿线是黄土丘陵区沟间地和下部沟谷地的过渡地带,人为活动干扰相对较少,沟沿线不同微生境形成的植物群落,对沟沿线侵蚀防控和乡土物种保存具有重要意义。在陕北黄土丘陵区选取不同走向的支沟,将沟沿线划分为沟头和瓦背2种微地形进行植被调查,探究沟沿线不同微地形植物群落物种组成及物种多样性特征。结果表明:沟沿线物种丰富,调查植物共计34科73属90种,其中分布频率较高、重要值较高的物种均是该区潜在的抗侵蚀物种,也是退耕地恢复和人工林下植物恢复的重要种源。不同微地形物种数量无明显差异,但物种重要值随微地形变化,说明群落结构受到微地形的影响。沟沿线植物群落多样性受坡向、微地形及其二者交互作用的影响,植被平均高度、盖度以及物种多样性指数在不同坡向的变化趋势大致表现为阴坡大于阳坡;沟头与瓦背相比,植物群落的物种丰富度更高,均匀度较低,物种多样性无显著差异。总之,沟沿线作为沟间地和沟谷地的过渡带,保存了丰富的物种,在防止沟道侵蚀和为坡面植物恢复提供种源等方面具有重要作用。

关键词: 沟沿线;物种组成;微地形;坡向;物种多样性

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2673(2022)05-0031-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2022.05.005

Plant community characteristics of different micro-topography along the shoulder line in loess hilly-gullied region

CHEN Jiamin, WANG Ning, ZHAO Fuwang, HE Xinyue

(National Experimental Teaching Demonstration Center of Geography Science, College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, 710119, Xi'an, China)

Abstract: [Background] The shoulder line is the transition zone between hill slope and gully slope in the hilly-gullied Loess Plateau region. Along the shoulder line, the disturbance from human activities is relatively fewer. The plant communities that distribute along the shoulder line play an important role in protecting gully head from headward erosion and providing habitat for native plant species. However, how the plant communities characteristics change with the different micro-topographies along the shoulder line is not well known. [Methods] We selected small watersheds with different orientations in hilly-gullied Loess Plateau region as study objects, and divided the micro-topography along shoulder line into two different micro-topographies, gully head area and inter shallow gully area, for vegetation investigation. The species composition, coverage, height and number of individual species were investigated. And species diversity characteristics of plant communities in different micro-topographies along the shoulder line were analyzed. [Results] The abundant species were retained along the shoulder line in the study region, and 90 species, belonging to 73 genera and 34 families were recorded. Most of these species were

收稿日期: 2021-03-12 修回日期: 2022-01-24

项目名称: 国家自然科学基金“黄土高原典型乡土草本植物根系对土壤分离的影响及其机制”(41977061); 陕西师范大学中央高校项目“黄土丘陵区侵蚀坡面微生境种子沉积特征及其对幼苗更新的影响”(GK202103147)

第一作者简介: 陈佳敏(1998—),女,硕士研究生。主要研究方向:水土保持与植被恢复。E-mail:594668105@qq.com

[†]通信作者简介: 王宁(1982—),男,博士,副教授。主要研究方向:水土保持与植被恢复。E-mail:nwang123456@snnu.edu.cn

perennial herbs and grasses, and a few species were shrub and trees. Among them, the species with high distribution frequency and high importance value were potential anti-erosion species in this region, and were important seed resources for spontaneous restoration of abandoned slope land and understory layer in artificial forest. The community coverage changed from about 40% in the inter shallow gully area to 60% in the gully head area. The community height showed that the gully head area was higher than inter shallow gully area, and the maximum average height of vegetation was 29.43 cm in the gully head area. There was no significant difference in the number of species in different micro-topographies, but the importance value of individual plant species varied with micro-topographies, indicating that micro-topography affected community structure. The species diversity along the shoulder line was affected by the slope aspect, micro-topography and their interaction. Average height, average coverage and species diversity index of community in shady slope were higher than those in sunny slope. Compared with the inter shallow gully land, the plant community in the gully head had higher species richness, lower evenness index, and no significant difference in species diversity. [**Conclusions**] As a transitional zone between hill slope and gully slope, the shoulder line preserves abundant species and plays an important role in preventing headward erosion and providing seed for slope plant spontaneous restoration. Moreover, in a small range, the fluctuation of topography changes the distribution of water and nutrient resources, and then affects the structure and diversity of plant communities. The influence of micro-topography should be fully considered in the process of artificial vegetation of restoration and reconstruction in this region.

Keywords: shoulder line; species composition; micro-topography; slope aspect; species diversity

沟沿线是黄土丘陵区重要的地貌特征线,将坡沟系统分成其上部的沟间地和下部的沟谷地^[1],控制沟沿线的变化对梁峁坡面稳定、防止沟头溯源侵蚀等具有重要作用^[2]。而沟沿线植被作为沟间地和沟谷地间的天然植物篱^[3]能通过截留降水、减缓坡度、固结土壤来减少土壤侵蚀,在控制沟道侵蚀方面起到重要的作用^[4]。目前,已有不少学者围绕沟沿线类型的划分、沟沿线特征以及沟沿线侵蚀防控展开研究^[5-7],然而关于沟沿线微地形如何影响植物群落特征还缺乏深入研究。

沟沿线位于梁峁坡下部,多有密集的浅沟分布,形成浅沟、瓦背镶嵌而连绵起伏的微地形,影响径流和冲淤过程,进而影响土壤水分和养分等资源的空间异质性以及植物群落特征^[8];而植被的水土保持能力与群落结构、物种多样性等植物群落特征密切相关。物种多样性反映群落的稳定程度和生境差异^[9]——不同微地形条件下土壤水分和养分不同,从而影响群落的物种多样性;同时,坡向影响地表温度、土壤蒸散发量和土壤水分等^[10]。因此,在地形破碎的黄土丘陵区,坡向与微地形共同作用影响土壤水分、养分,进而影响群落物种组成及空间分布^[9,11]。

植被恢复是控制水土流失的最有效措施^[12-14],

由于植被群落类型差异形成不同的地上结构和根系分布,继而影响地表径流以及土壤抗蚀性能^[12,15]。黄土丘陵区生态治理与恢复的重点是提高植被覆盖率,改善植被结构,实现植被的可持续发展,其前提是遵循自然规律,选择适宜当地生态环境的物种和群落类型;而沟沿线作为沟间地和沟谷地的过渡带,人为干扰少,可保存更多的物种及其组合,包括区域植被恢复的优势物种及群落类型^[16],可为退耕坡面恢复提供种源和群落参考。因此,笔者对沟沿线不同微地形植被进行调查,分析沟沿线不同微地形植物群落物种组成和物种多样性特征,对全面认识该地区植被恢复空间异质性特征具有重要的意义。

1 研究区概况

本研究小流域选在延安市安塞区(E 109° 16.7654' ~ 109° 17.3011', N 36° 44.1054' ~ 36° 48.0715')。该地区属于中温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 7.7 ~ 10.6 °C,年均降水量为 506.6 mm,降水多集中于夏季(7—9月),年平均陆地蒸散发量 1460 mm 左右。植被类型属于森林草原带,研究区内天然乔木极少,主要分布有人工林(刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、柠条(*Caragana korshin-*

skii)等)、旱生灌木及草本植物,主要优势物种有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等。

2 材料与方法

2.1 样地选取与植被调查

植被调查于2019年8月进行,在安塞区坊塌流域和县南沟流域选择2个不同走向的小流域布设样地,记为小流域A和小流域B,坡向分为阴坡、半阴坡、半阳坡和阳坡。在小流域A内选择3个支沟,在小流域B内选择4个支沟,沿着支沟的沟沿线,分汇水的沟头和沟间的瓦背2种不同微地形进行植被调查(图1),样方间隔5~10m,面积为1.5m×1.5m,共计164个样方(其中阴坡20个,阳坡52个,半阴坡44个,半阳坡48个,在各坡向上瓦背和沟头样方数各占1/2),记录样方内物种、数量、盖度、高度。同时,记录样地的经纬度、坡向、坡度及沟道走向。



图1 沟沿线微地形示例

Fig.1 Example of micro-topography along shoulder line

2.2 数据处理

笔者在计算群落多样性指数时选取敏感度较好的Margalef丰富度指数、Pielou均匀度指数、Simpson多样性指数以及将丰富度和均匀度综合起来的Shannon-Wiener多样性指数,为反映不同植物物种在研究区沟沿线的分布状况计算所有物种的频度,各指数的计算方法参考文献[17]。

用Excel 2010整理数据,采用SPSS 19.0对植被群落特征指标进行坡向、微地形双因素方差分析。

3 结果与分析

3.1 沟沿线植物物种组成

笔者共记录90种植物,分属34科73属,其中菊科(Compositae)19种,禾本科(Poaceae)14种,豆科(Leguminosae)12种,占总物种数的1/2。菊科物种主要有铁杆蒿、芨蒿(*Artemisia giraldii*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*),禾本科物种主要有中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和白羊草,豆科主要物种有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、狼牙刺。其中,多年生草本最多,共计36种,占物种总数的40%,1年生草本14种,多年生禾草13种,灌木9种,半灌木6种。同时,保留有一些乔木物种,臭椿(*Ailanthus altissima*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、榆树(*Ulmus pumila*)。表1是沟沿线主要物种出现频度,铁杆蒿分布频度最大(0.89);频度在0.50~0.75的有4种:长芒草(0.72)、中华隐子草(0.50)、芨蒿(0.60)和达乌里胡枝子(0.73);频度在0.25~0.50之间的有8种;其余物种出现的频度均小于0.25。

表1 沟沿线不同功能群的主要物种

Tab.1 Main species of different functional groups along shoulder line

功能群 Functional group	物种 Plant species
一、二年生草本 Annual and biennial herbage plants	白花草木犀 ^{0.49} , 香青兰 ^{0.27} , 狗尾草 ^{0.23} , 臭蒿 ^{0.23} , 猪毛蒿 ^{0.11} , 亚麻 ^{0.09} , 草瑞香 ^{0.08} , 地锦 ^{0.08} 。 <i>Melilotus albus</i> , <i>Dracocephalum moldavica</i> , <i>Setaria viridis</i> , <i>Artemisia hedinii</i> , <i>Artemisia scoparia</i> , <i>Linum usitatissimum</i> , <i>Dithyramis linifolium</i> , and <i>Euphorbia humifusa</i>
多年生禾草 Perennial grasses	长芒草 ^{0.72} , 中华隐子草 ^{0.5} , 糙隐子草 ^{0.22} , 硬质早熟禾 ^{0.15} , 白羊草 ^{0.09} 。 <i>Stipa bungeana</i> , <i>Cleistogenes chinensis</i> , <i>Cleistogenes squarrosa</i> , <i>Poa sphondylodes</i> , and <i>Bothriochloa ischaemum</i>
多年生草本 Perennial herbs	芨蒿 ^{0.60} , 阿尔泰狗娃花 ^{0.45} , 远志 ^{0.36} , 山苦荬 ^{0.33} , 异叶败酱 ^{0.28} , 甘草 ^{0.25} 。 <i>Artemisia giraldii</i> , <i>Heteropappus altaicus</i> , <i>Polygala tenuifolia</i> Willd., <i>Ixeris denticulate</i> , <i>Patrinia heterophylla</i> , and <i>Glycyrrhiza uralensis</i>
半灌木 Half shrub	铁杆蒿 ^{0.89} , 达乌里胡枝子 ^{0.73} 。 <i>Artemisia gmelinii</i> , and <i>Lespedeza davurica</i>
灌木 Shrub	狼牙刺 ^{0.43} , 杠柳 ^{0.17} , 酸枣 ^{0.09} , 灌木铁线莲 ^{0.09} , 扁核木 ^{0.07} 。 <i>Sophora viciifolia</i> , <i>Periploca sepium</i> , <i>Ziziphus jujube</i> , <i>Clematis fruticosa</i> , and <i>Prinsepia utilis</i>
乔木 Arbor	臭椿 ^{0.14} , 大果榆 ^{0.02} , 刺槐 ^{0.02} , 榆树 ^{0.01} 。 <i>Ailanthus altissima</i> , <i>Ulmus macrocarpa</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , and <i>Ulmus pumila</i>

注:物种名右上角数字为其在调查过程中出现频度,频度范围0~1。Notes:The number in the upper right corner of the species name is its frequency during the investigation(range 0-1).

3.2 不同微地形的植物群落特征

不同微地形上看,物种数变化趋势由多到少依次是:半阳坡沟头(60种),半阳坡瓦背(52种),阳坡沟头(51种),阴坡、半阴坡瓦背(48种),阳坡瓦背(47种),阴坡、半阴坡沟头(42种)。总体上看阳坡半阳坡的物种数大于阴坡半阴坡,可能是由于阴坡土壤含水量较高,优势物种占主导地位,影响其他物种的生存,物种数降低。

笔者选取重要值作为综合指标来反映物种在群落中的相对重要性以及对所处群落的适应程度,表2列出不同微地形下植物群落主要物种的重要值。可见,菊科的铁杆蒿和茺蒿、禾本科的长芒草和狗尾草(*Setaria viridis*)、豆科的白花草木犀(*Melilotus albus*)和达乌里胡枝子以及败酱科的异叶败酱

(*Patrinia heterophylla*)在各个微地形均有分布。同一物种在不同微地形的重要值不同形成的群落结构也不同,如异叶败酱在各个微地形均有分布,但在阴坡和半阴坡的重要值远大于在阳坡和半阳坡,异叶败酱为阴坡和半阴坡的优势种,在阳坡和半阳坡为偶见种;达乌里胡枝子在阳坡、半阳坡和半阴坡为亚优势种,在阴坡为伴生种。中华隐子草和白羊草等主要分布在阳坡和半阳坡;狼牙刺、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)和酸枣(*Ziziphus jujube*)仅出现在阳坡半阳坡;野菊花(*Dendranthema indicum*)仅出现在阴坡和半阴坡;在阴坡和半阴坡还出现芦苇(*Phragmites australis*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)等典型湿生植物。各个微地形物种的重要值均较小,重要值指数分配比较分散,阴坡沟头物种重要值最大

表2 沟沿线主要物种的重要值

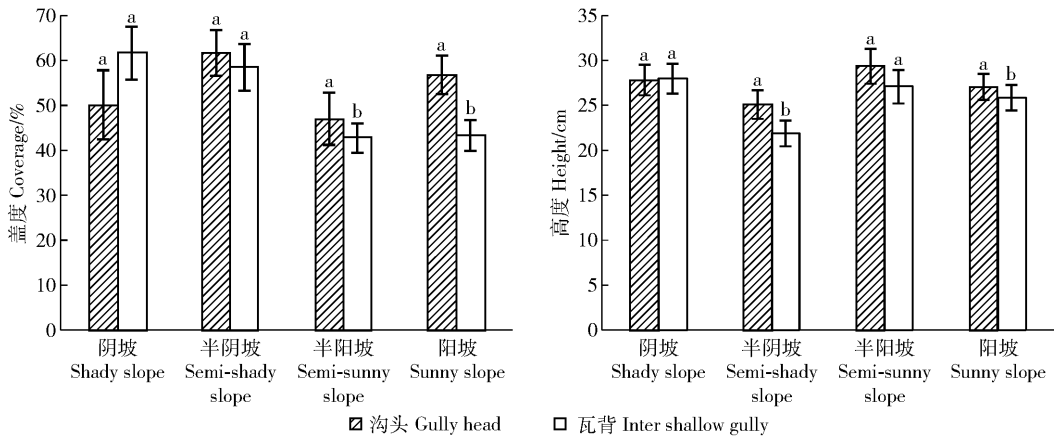
Tab. 2 Important values of main species along shoulder line

主要物种 Main species	阴坡 Shady slope		半阴坡 Semi-shady slope		半阳坡 Semi-sunny slope		阳坡 Sunny slope		%
	G	S	G	S	G	S	G	S	
	铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	18.21	20.67	23.22	19.90	23.44	18.79	21.23	
白花草木犀 <i>Melilotus albus</i>	9.66	5.66	11.29	11.53	8.46	7.37	11.56	16.57	
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	11.17	9.11	12.36	10.44	10.44	10.55	11.13	12.87	
茺蒿 <i>Artemisia giraldii</i>	9.95	13.02	14.73	14.51	12.30	11.97	12.57	12.89	
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	10.12	4.08	9.61	8.57	6.39	4.39	9.71	9.26	
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	7.21	5.44	11.45	10.10	10.78	11.64	10.60	9.08	
异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i>	26.86	21.38	19.23	22.86	10.28	2.92	3.77	1.89	
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	4.47		1.97	10.62	4.42	11.43	6.07	13.15	
蒙古蒿 <i>Artemisia mongolica</i>				16.22	7.06	8.64	5.25	12.65	
狼牙刺 <i>Sophora viciifolia</i>					17.47	15.21	15.99	11.42	
中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>			9.22	15.17		12.36	17.97	14.69	
酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i>					12.39	13.16			
大针茅 <i>Stipa grandis</i>		8.25		7.46					
拂子茅 <i>Calamagrostis epigeios</i>		10.24	5.59	12.29		7.13			
小红菊 <i>Dendranthema chanetii</i>	2.98	29.88							
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	13.02				6.49				
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>		2.44					12.94		
互叶醉鱼草 <i>Buddleja alternifolia</i>				26.06	27.22				12.54
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>			6.43				13.55		
野菊花 <i>Dendranthema indicum</i>	8.09	7.90	3.42	1.90					

注:表中列出了不同微地形重要值排名前8的物种;G:沟头,S:瓦背。空白表示微地形中无该物种出现。Notes:The top 8 species with different micro-topography importance values are listed in the table. G:Gully head. S:Inter shallow gully. Blank space indicates that the species was not present in the micro-topography.

为 26.86%、阴坡瓦背为 29.88%、半阴坡沟头为 23.22%、半阴坡瓦背为 26.06%、半阳坡沟头为 27.22%、半阳坡瓦背为 18.79%、阳坡沟头为 21.23%、阳坡瓦背为 21.4%，说明在各个微地形中植物的优势地位不明显。

图 2 示出：不同微地形植被盖度大小依次为：半阴坡沟头 > 阴坡瓦背 > 半阴坡瓦背 > 阳坡沟头 > 阴坡沟头 > 半阳坡沟头 > 阳坡瓦背 > 半阳坡瓦背，植被盖度只在阴坡半阴坡瓦背与阳坡半阳坡瓦背之间差异显著 ($P < 0.05$)；不同微地形植被高度表现为：



不同小写字母表示同一微地形不同坡向间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences between different slope directions on the same micro-topography

图 2 不同微地形植物生长特性变化特征

Fig. 2 Characteristics of plant growth in different micro-topography

植被群落多样性指数变化特征如图 3 所示，Margalef 丰富度指数在 2.46 ~ 3.28 之间，最大的是阴坡瓦背，最小的是半阴坡沟头；坡向和微地形对 Margalef 丰富度指数影响都不显著，坡向与微地形交互作用对 Margalef 丰富度指数影响显著 ($P < 0.05$)。Shannon-Wiener 多样性指数在 1.97 ~ 2.23 之间，坡向对 Shannon-Wiener 多样性指数的影响显著 ($P < 0.05$)，在瓦背地形中，Shannon-Wiener 多样性指数的变化趋势是：阴坡 > 半阳坡 > 半阴坡 > 阳坡，在沟头条件下，Shannon-Wiener 多样性指数依次是：阴坡 > 阳坡 > 半阳坡 > 半阴坡，总体上都是阴坡多样性指数大于阳坡。不同微地形 Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数差异不明显，坡向微地形以及坡向和微地形的交互作用对 Simpson 多样性指数和 Pielou 指数的影响都不显著。

4 讨论

沟沿线不同微地形植物种类集中在菊科、禾本科和豆科，均是陕北植物区系中的大科^[18]，反映该

半阳坡沟头 > 阴坡瓦背 > 阴坡沟头 > 半阳坡瓦背 > 阳坡沟头 > 阳坡瓦背 > 半阴坡沟头 > 半阴坡瓦背，半阴坡瓦背与半阳坡瓦背差异显著 ($P < 0.05$)。

除阴坡外，其他坡向植被盖度和高度都表现为沟头大于瓦背，沟头的盖度和高度大于瓦背是由于沟头有利于水分及其携带养分的汇集，土壤水分、养分条件优于瓦背，而水分是影响黄土区植被生长盖度和高度的重要因素。方差分析表明，坡向对植被盖度和高度的影响显著 ($P < 0.05$)，在同一地形条件下，植被的盖度和高度大致呈现阴坡大于阳坡的趋势。

区植物组成特点。植物生活型以多年生草本植物占优势，乔灌木较少；多年生草本植物与乔灌木相比对土壤水分需求较低^[19]，更适应研究区生态环境^[16]。根茎型半灌木铁杆蒿在各个微地形均有分布且重要值较大，对土壤水分和养分的适应条件较宽^[11]，在研究区植被恢复中，可作为群落的建群种。同时，分布频率较高、重要值较高的其他物种如狼牙刺、酸枣、杠柳 (*Periploca sempium*)、灌木铁线莲 (*Clematis fruticosa*)、达乌里胡枝子、白羊草、长芒草、中华隐子草、阿尔泰狗娃花、异叶败酱、蒙古蒿、猪毛蒿等也是该区潜在的抗侵蚀物种^[18]，可为退耕地恢复和人工林下植物恢复提供种源。

地形因子对物种多样性影响的顺序由大到小依次为：坡位、坡向、海拔和坡度^[20]，而沟沿线是梁峁坡向沟坡过渡的转折点，对植被的生长分布具有重要作用。水分是影响黄土高原植物生长的重要因素，土壤水分条件越好，植物群落盖度和高度越大^[21-22]，沟头汇水，具备较好的土壤水分条件，除阴坡外，在同一坡向植被盖度和高度都表现为沟头大

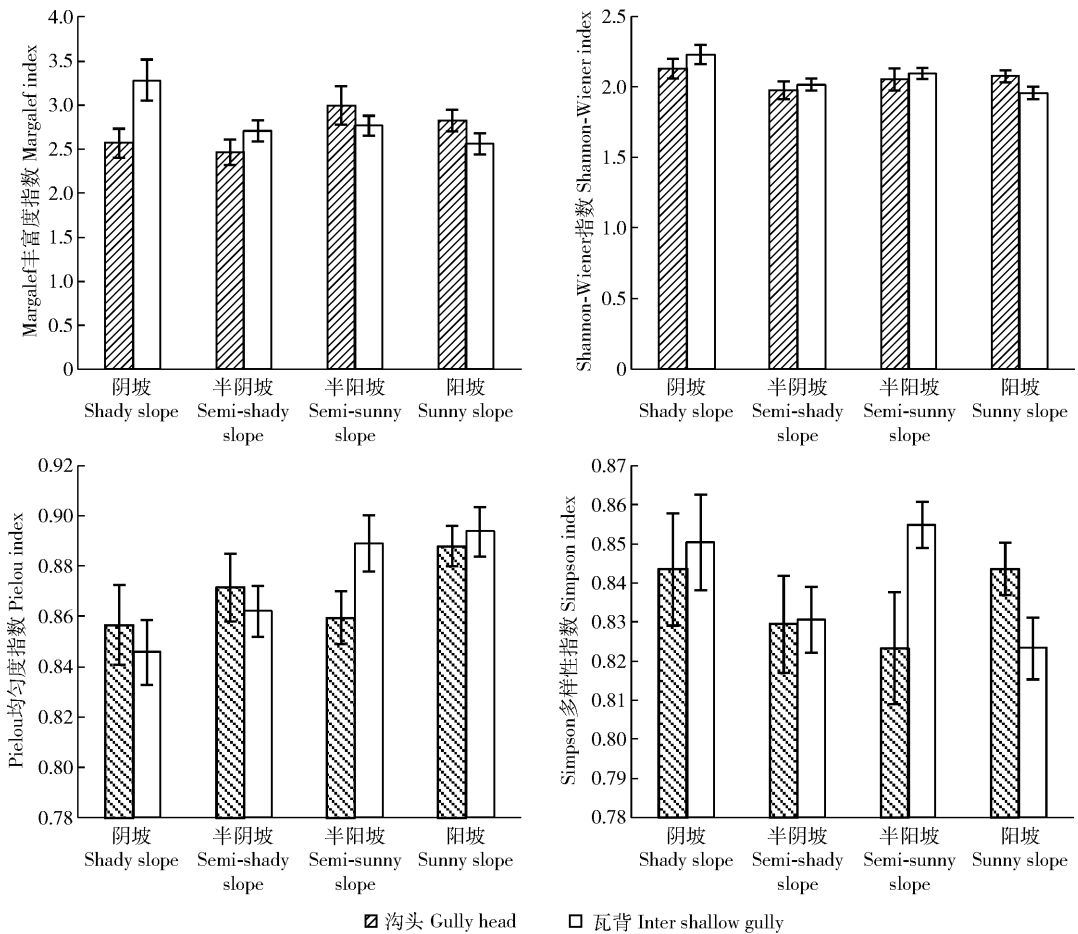


图3 不同微地形多样性指数变化

Fig. 3 Diversity index changes with different micro-topography

于瓦背;在阴坡和半阴坡, Margalef 丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数都表现为瓦背 > 沟头, 在阳坡表现为沟头 > 瓦背, 瓦背和沟头这 2 种微地形对植物群落各项多样性指数的影响均不显著, 可能是由于沟沿线位于梁峁坡下部, 土壤水分一般在坡下部汇集, 具有相对较好的水分条件^[23]。

坡向是影响植物分布的关键因素, 从阴坡到阳坡, 土壤含水量递减, 土壤温度和光照度增加。由于环境和物种的生物学特性不同, 导致物种在各个坡向的分布不同。本研究中, 阴坡出现频率较高的植物有铁杆蒿、异叶败酱、长芒草等, 而阳坡出现频率较高的物种是铁杆蒿、达乌里胡枝子、中华隐子草等, 在各个坡向均有灌木出现, 说明在自然环境条件良好的情况下, 出现草本群落向灌木群落演替的现象。方差分析表明, 在同一微地形条件下, 坡向对植被盖度、高度和 Shannon-Wiener 指数影响显著, 总体上呈现阴坡大于阳坡的趋势。

5 结论

1) 笔者记录植物 34 科 73 属 90 种, 其中菊科、禾本科和豆科占总物种数的一半, 植物功能群以多年生草本为主, 分布频度和重要值较高的物种有铁杆蒿、白羊草、长芒草、阿尔泰狗娃花、异叶败酱、狼牙刺和达乌里胡枝子等, 均为该区潜在的抗侵蚀物种, 可为退耕地恢复和人工林下植物恢复提供种源。不同微地形物种的重要值随微地形变化, 反映出微地形的改变对群落结构的影响。

2) 坡向、微地形以及坡向和微地形的交互作用对植物的高度、盖度以及物种多样性均有影响。其中坡向对植被盖度、高度和 Shannon-Wiener 指数影响显著, 同一坡向沟沿线的微地形对植物群落特征也有一定的影响。这些结果说明在小范围内, 地形的起伏改变水分、养分资源的分配, 影响植物群落结构和多样性, 植被建设恢复要充分考虑微地形的影响。

6 参考文献

- [1] 闫国年,钱亚东,陈钟明. 基于栅格数字高程模型自动提取黄土地貌沟沿线技术研究[J]. 地理科学, 1998, 18(6):567.
LU Guonian, QIAN Yadong, CHEN Zhongming. Study of automated extraction of shoulder line of valley from grid digital elevation data[J]. Scientia Geographica Sinica, 1998, 18(6):567.
- [2] 陈一先,焦菊英,魏艳红,等. 陕北黄土区退耕前(1976—1997)坡面切沟发育特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17):120.
CHEN Yixian, JIAO Juying, WEI Yanhong, et al. Characteristics of gully development in northern Shaanxi Hilly Loess Region before Grain-for-Green Programme (1976—1997) [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17):120.
- [3] 焦菊英. 黄土高原沟沿线的廊道防蚀效应探析[J]. 水土保持通报, 2006, 26(5):108.
JIAO Juying. Effects of vegetation corridor along thalweg on soil erosion control on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(5):108.
- [4] 冯兰茜,王文龙,郭明明,等. 根系密度对黄土塬沟头溯源侵蚀产沙和形态演化过程的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6):88.
FENG Lanqian, WANG Wenlong, GUO Mingming, et al. Effects of root density on gully headcut erosion and morphological evolution process in gully regions of Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6):88.
- [5] 肖晨超,汤国安. 黄土地貌沟沿线类型划分[J]. 干旱区地理, 2007, 30(5):646.
XIAO Chenchao, TANG Gu'an. Classification of valley shoulder line in loess relief[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(5):646.
- [6] 曹建军,方炫,那嘉明,等. 基于多重分形的黄土高原不同地貌类型区沟沿线起伏特征研究[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(4):51.
CAO Jianjun, FANG Xuan, NA Jiaming, et al. Study on the characteristics of the topographic relief of shoulder line of different geomorphic types in Loess Plateau based on multi-fractal[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(4):51.
- [7] 常瑞雪. 基于沟沿线的黄土高原沟蚀程度评价及分区研究[D]. 南京:南京师范大学, 2015:1.
CHANG Ruixue. Studies on gully erosion assessment and partition in Loess Plateau based on shoulder lines[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015:1.
- [8] LIU Yali, DU Jianqing, XU Xingliang, et al. Microtopography-induced ecohydrological effects alter plant community structure[J]. Geoderma, 2020, 362(C):114.
- [9] 汝海丽,张海东,焦峰,等. 黄土丘陵区微地形条件下草本群落特征与土壤水分及养分关系分析[J]. 草地学报, 2016, 24(4):776.
RU Haili, ZHANG Haidong, JIAO Feng, et al. Relation analysis of herbaceous community characteristics and soil moisture and nutrients on micro-scale topography typical section in hilly Loess Plateau region, China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(4):776.
- [10] GONG X, BRUECK H, GIESE K M, et al. Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 72(4):483.
- [11] 陈正兴,高德新,张伟,等. 黄土丘陵沟壑区不同坡向撂荒草地植物群落种群空间格局[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6):1846.
CHEN Zhengxing, GAO Dexin, ZHANG Wei, et al. Population spatial patterns of grassland plant communities in different slope aspects in the loess hilly area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6):1846.
- [12] LIANG Yue, JIAO Juying, TANG Bingzhe, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584:124694.
- [13] ZHAO Guangju, MU Xingmin, WEN Zhongming, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5):499.
- [14] ZHENG Fenli. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2006, 16(4):420.
- [15] GUO Mingming, WANG Wenlong, WANG Tianchao, et al. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(4):1038.
- [16] 贾燕锋,焦菊英,张振国,等. 黄土丘陵沟壑区沟沿线边缘植被特征初步研究[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4):39.
JIA Yanfeng, JIAO Juying, ZHANG Zhenguo, et al. Primary study of the vegetation characters of the margin between gully and inter-gully on hilly-gullied Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(4):39.
- [17] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. 生

- 物多样性,1994,2(4):231.
- MA Keping, LIU Yuming. The measurement method of biological diversity [J]. *Chinese Biodiversity*, 1994, 2(4):231.
- [18] 寇萌,焦菊英,尹秋龙. 黄土丘陵沟壑区潜在抗侵蚀植物分析[J]. *生态学报*,2017,37(5):1561.
- KOU Meng, JIAO Juying, YIN Qiulong. Potential erosion-resistant species analysis in the hill-gully region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1561.
- [19] ZHAO Jin, LI Guo, LIN Henry, et al. Soil moisture response to rainfall on the Chinese Loess Plateau after a long-term vegetation rehabilitation [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(12):1738.
- [20] 郑江坤,魏天兴,郑路坤,等. 坡面尺度上地貌对 α 生物多样性的影响[J]. *生态环境学报*,2009,18(6):2254.
- ZHENG Jiangkun, WEI Tianxing, ZHENG Lukun, et al. Effects of landforms on α biodiversity in slope scale [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6):2254.
- [21] 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[J]. *生态学报*,2003,23(8):1640.
- GUO Zhongsheng, SHAO Ming'an. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8):1640.
- [22] JIAO Lei, AN Wenming, LI Zongshan, et al. Regional variation in soil water and vegetation characteristics in the Chinese Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115:106399.
- [23] 艾宁,宗巧鱼,刘广全,等. 陕北黄土区浅沟土壤水分空间分布特征[J]. *水土保持学报*,2019,33(5):85.
- AI Ning, ZONG Qiaoyu, LIU Guangquan, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture in ephemeral gully in loess region of northern Shaanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5):85.