

黄土丘陵沟壑区沟坡典型植物群落生长特征

杨寒月^{1,2}, 张光辉^{1,2}, 张宝军³

(1. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学

地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以纸坊沟小流域沟坡 7 个典型植物群落为调查对象, 对其结构特征、物种多样性、盖度、地上生物量进行了系统研究。结果表明: Simpson 多样性指数显示为沙棘>赖草>白羊草>柠条>苔草>芨芨>铁杆蒿; Magarlef 丰富度指数表现为草本群落>灌木群落, 阴坡群落>阳坡群落; Pielou 均匀度指数为灌木群落>草本群落, 阴坡群落>阳坡群落。灌木群落地上生物量(1.53~5.85 kg/m²)显著大于草本群落(0.17~0.41 kg/m²), 草本群落地上生物量大小排序为赖草>铁杆蒿>芨芨>白羊草>苔草。植被盖度阴坡草本群落最大, 灌木群落居中, 阳坡蒿类草本群落最低。沟坡植物群落的 Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数略低于梁峁坡面的植物群落, Shannon-wiener 多样性指数、草本群落地上生物量显著低于梁峁坡。研究成果对于明确黄土高原小流域植被生长特性、优化水土保持措施的空间配置具有重要的指导意义。

关键词:沟坡; 植被群落结构; 地上生物量; 物种多样性; 盖度

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)02-0062-06

Growth Characteristics of Typical Plant Communities on Gully Slopes in the Loess Hilly-Gully Region

YANG Hanyue^{1,2}, ZHANG Guanghui^{1,2}, ZHANG Baojun³

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University,

Beijing 100875, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Seven typical vegetation communities were selected on steep gully slopes to analyze the vegetation characteristics of structure, species diversity and above-ground biomass. The results showed that Simpson Diversity Index decreased in the order: *Hippophae rhamnoides* > *Leymus secalinus* > *Bothriochloa ischaemum* > *Caragana Korshinskii* > *Carex lanceolata* > *Artemisia giraldii* > *Artemisia gmelinii*; Magarlef Richness Index decreased in the order: herb communities > shrub communities, communities on shaded slopes > communities on sunny slopes; Pielou Evenness Degree Index decreased in the order: shrub communities > herb communities, communities on shaded slopes > communities on sunny slopes. The above-ground biomass of shrub communities (1.53~5.85 kg/m²) was greater than that of herb communities (0.17~0.41 kg/m²). The above-ground biomass of herb communities decreased in the order: *Leymus secalinus* > *Artemisia gmelinii* > *Artemisia giraldii* > *Bothriochloa ischaemum* > *Carex lanceolata*. Vegetation coverage declined in the order: herb communities on shaded slopes > shrub communities > sage semi-brush communities on sunny slopes. The Simpson Diversity Index and Margalef Index on gully slopes were slightly lower than those on hill-slopes, while the Shannon-wiener Diversity Index on gully slopes was lower than that of hill-slopes significantly. The above-ground biomass and coverage of herb on gully slopes were significantly lower than that

收稿日期: 2018-04-21

修回日期: 2018-06-21

资助项目: “十三五”国家重大研发计划“黄土丘陵沟壑区坡体—植被系统稳定性及生态灾害阻控技术”(2017YFC0504702); 国家自然科学基金“退耕驱动近地表特性变化对侵蚀过程的影响及其动力机制”(41530858); 国家自然科学基金创新研究群体项目“地表过程模型与模拟”(41621061)

第一作者: 杨寒月(1995—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: 18153999820@163.com

通信作者: 张光辉(1969—), 男, 甘肃静宁人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

of hill-slopes. The results are helpful to understand the vegetation characteristics and to optimize the allocation of soil and water conservation measures at the scale of whole watershed in the hilly-gully region.

Keywords: gully slope; plant community structure; above-ground biomass; vegetation species diversity; vegetation coverage

植被建设在黄土高原丘陵沟壑区水土流失综合治理以及生态系统恢复中发挥着极为重要的作用^[1],是防治水土流失的重要措施,也是水土保持措施体系中最有效和最治本的方法^[2]。植被可以截留降雨、消减降雨动能,避免地表直接遭受雨滴溅蚀,又可调节地面径流、增加土壤入渗、削减径流动能、抑制径流冲刷。而植被系统水土保持功能的强弱与植物群落的生长特征密切相关,包括群落结构、物种多样性、地上生物量、盖度等。植物群落生长特征是生态系统生产力最具代表性的指标,可以表征群落结构的优劣和生态系统功能的高低^[3]。因此,系统研究不同环境条件下植物群落的生长特征,对于量化植物群落与立地条件间的定量关系、植被的生态水文功能及水土保持效益,具有重要的理论和生产意义。

黄土丘陵沟壑区是黄土高原的重要组成部分,是我国乃至全球水土流失最为严重的区域之一。该区流域地貌分为沟间地和沟谷地,沟谷地可进一步分为沟坡和沟道^[4]。沟坡是黄土高原丘陵沟壑区崩坡下端沟缘线以下,沟道以上的区域,一般由沟道的下切侵蚀形成。沟坡地面破碎,坡陡沟深,一般可达 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,土壤侵蚀发育强烈。唐克丽^[5]分析多年实测资料发现,沟间地侵蚀产沙占流域总侵蚀产沙的 $17.8\%\sim 47.6\%$,而沟谷地侵蚀产沙占流域总侵蚀产沙的 $52.4\%\sim 82.2\%$ 。蒋德麒等^[6]分析了黄河中游多个小流域的侵蚀泥沙来源,认为在黄土丘陵区第一、三副区典型小流域侵蚀泥沙来源以沟坡为主,第一副区和第三副区分别为 61% 和 41.5% ,说明沟坡是黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙的主要策源地。因此,沟坡水土流失治理是黄土丘陵沟壑区流域综合治理的重要组成部分。

然而,受严酷立地条件的制约,特别是土壤水分和肥力水平的影响,沟坡植物群落结构及其生长特征可能与梁峁坡存在明显差异,但目前关于植物群落结构及其生长特征的研究主要集中在梁峁坡或塬面上^[7-10],沟坡植物生长特征研究相对较少^[11-12]。黄土丘陵区是退耕还林还草工程及生态环境建设的重点区域,在过去20 a,区域植被覆盖与生长特征发生了巨大变化,在此背景下系统研究黄土丘陵沟壑区沟坡典型植物群落的生长特征,对于系统评价退耕还林还草工程及生态环境建设的生态水文及水土保持功效,具有重大的实践价值。因此,本文以黄土高原丘陵沟

壑区沟坡7种典型植物群落为研究对象,系统研究其植被类型、结构、物种多样性、生物量等生长特征,为沟坡典型植物群落生态功能评价、植被恢复与重建及水土保持措施配置提供科学支撑。

1 试验地概况

试验在陕西省延安市安塞区的纸坊沟小流域进行,该小流域位于 $36^{\circ}46'28''\sim 36^{\circ}46'42''\text{N}$, $109^{\circ}13'03''\sim 109^{\circ}16'46''\text{E}$,是延河支流杏子河下游的一级支沟,流域面积 8.27 km^2 。该区属暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡区域,年均温 8.8°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温 $3\,113.9^{\circ}\text{C}$,年日照时数为 $2\,425.6\text{ h}$,年辐射量为 551.8 kJ/cm^2 ,无霜期 159 d ^[13-14]。年均降水量 549.1 mm ,季节分配极不均匀,多集中在6—9月,占年总降水量的 70% 以上,且多短历时暴雨。流域地形破碎、沟壑纵横,沟壑密度高达 8.06 km/km^2 ,属黄土高原丘陵沟壑区第二副区,梁状地形占优势,流域海拔在 $1\,038\sim 1\,414\text{ m}$,梁峁顶与沟谷的相对高差多为 $150\sim 200\text{ m}$ 。新构造运动活跃且以上升为主,沟谷大都深切基岩。地表组成以黄土沉积物为主,零星分布有侏罗纪岩层和中生代第三纪红土。流域土壤类型较为单一,现存表土为黄绵土,占全区 65.5% ,其次为红胶土和二色土,占 21.5% 。黄绵土质地均一,机械组成以粉粒为主,结构松散,抗蚀能力差。流域处于森林草原带的北部边缘,天然植被主要为半旱生的草灌类。经过多年生态恢复,目前流域内乔木和灌木是以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus Simonii*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn)为主,而草本以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*Artemisia giraldii* Pamp)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草[*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng]等为主。

2 研究方法

2.1 样地选择

2017年7—8月对纸坊沟流域沟坡典型植物群落进行了调查与采样。野外实地勘察发现,受沟坡土层深度、立地条件及水热条件的限制,沟坡灌木群落较少,所以在纸坊沟小流域主沟和支沟沟坡选择了2个灌木群落和5个草本群落(最小样地面积为 30 m

×20 m)作为试验样地。灌木群落分别为沙棘和柠条,草本群落为披针叶苔草(*Carex lanceolata* Boott)、赖草(*Leymus secalinus*)、铁杆蒿、茭蒿和白羊草。样地信息测定内容包括海拔、经纬度、坡度、坡向等。由于沟坡立地条件特殊,在保证其他条件尽量

一致的情况下,对植物群落进行样地重复较为困难。因此,本研究中每个植物群落仅选择 1 个样地,但在每个样地采用等距取样法选择 3 个样方进行重复,草本样方面积 1 m×1 m,灌木样方面积 2 m×2 m。各样地基本信息见表 1。

表 1 调查植物群落样地信息

植物群落	土壤类型	经纬度	海拔/m	坡向/(°)	坡度/(°)
苔草	黄绵土	109°15'6.5"E,36°45'16.6"N	1125	350	35.8
赖草	黄绵土	109°15'6.5"E,36°45'16.6"N	1124	350	35.8
铁杆蒿	黄绵土	109°14'27.2"E,36°43'46.2"N	1320	103	37.0
茭蒿	黄绵土	109°14'27"E,36°44'7"N	1250	80	27.2
白羊草	黄绵土+红胶土	109°14'40"E,36°44'8"N	1230	101	33.0
沙棘	黄绵土	109°15'5.0"E,36°45'19.4"N	1180	110	25.2
柠条	黄绵土	109°14'31"E,36°43'40"N	1330	105	34.4

2.2 测定方法

植物群落特征调查指标包括植物种类、盖度、高度、多度、地上生物量等。量测并记录样方内植物种类、植株高度、样方内总个体数,用于植被物种多样性计算。灌木调查中,综合冠幅、基径、株高等测树因子选择群落标准株,从基径齐地面刈割地上部分,带回室内烘干至恒重(65℃),得到标准株地上生物量再进一步换算得到样方内灌木总生物量。草地上生物量采用全收获法测定,采集样方内草本植物地上部分后装袋,带回室内烘干至恒重(65℃,24 h),称干质量得到地上生物量。植被盖度通过多次多人目视估计后取平均值得到。

2.3 数据计算与处理

植物群落结构的好坏通过物种多样性表征。物种多样性测定选用常用的 3 类指数,即多样性指数、丰富度指数和均匀度指数,计算公式如下:

Simpson 多样性指数(D):

$$D=1-\sum P_i^2 \quad (1)$$

Shannon-wiener 多样性指数(H'):

$$H'=-\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数(Ma):

$$Ma=(S-1)/\lg N \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(JP):

$$JP=H'/\lg S \quad (4)$$

式中: S 为样方内物种数目; N 为所有物种个体数之和; P_i 为种 i 的相对重要值, $P_i=(R_c+R_f)/2$; R_c 为物种盖度; R_f 为物种多度^[15]。

所有数据均采用 Excel 2010 处理,采用 SPSS 20.0 统计分析软件中 ANOVO 单因素方差分析方法进行不同植物群落间生物量、盖度及物种多样性差异分析,不同指标间多重比较采用 Duncan 新复极差法。

3 结果与分析

3.1 群落物种组成

经过对 21 个沟坡样方的调查,共记录到植物 33 种,隶属于 15 科。灌木植物 5 科 6 种,草本植被 10 科 27 种,其中菊科 9 种,禾本科 6 种,蔷薇科 4 种,豆科 3 种,共占总物种数的 66.7%。铁杆蒿、茭蒿、阴行草(*siphonostegia chinensis* Benth)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)和委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser)是黄土丘陵沟壑区沟坡常见的草本植物。杠柳(*Periploca sepium* Bunge)、柠条、沙棘和狼牙刺(*Sophora viciifolia*)是沟坡常见的灌木种类。各生活型物种数大小排序为多年生草本(17 种,占 51.5%)>灌木及半灌木(10 种,占 30.3%)>一年生草本(6 种,18.2%)。相较于梁峁坡,由于立地条件的限制,黄土丘陵区沟坡植物种总数小、且基本无高大乔木生长^[16-18]。

3.2 植物群落物种多样性

物种多样性是指一定时间一定空间中全部生物或者某一生物类群的物种数目与各个物种的个体分布特点。物种多样性不仅反映群落内物种组成和结构方面的特征,更重要的是能体现群落组织水平、发展阶段和稳定程度^[3]。不同的植物群落,由于物种组成以及个体高度、密度、优势度以及生境的不同,在结构与功能上都存在着很大的差异。立地条件的变化,势必会引起沟坡植物群落物种多样性发生变化。Simpson 多样性指数(D)描述从一个群落中连续两次抽样所得到的个体数属于同一种的概率^[19],而 Shannon-wiener 多样性指数(H')则是借用信息论的方法描述群落中种的多寡及群落异质^[20]。如图 1 所示,Simpson 多样性指数:沙棘>赖草>白羊草>柠条>苔草>茭蒿>铁杆蒿,Shannon-wiener 多样性指数:白羊草>赖草>沙棘>苔草>茭蒿>柠

条>铁杆蒿,但两个指数在多数群落之间无显著差异。Simpson 多样性指数在铁杆蒿群落与白羊草、赖草、沙棘以及柠条群落间存在显著性差异($p<0.05$)。Shannon-wiener 多样性指数在铁杆蒿群落与白羊草、沙棘以及赖草群落间存在着显著性差异($p<0.05$)。这可能与其生境条件有关,赖草一般生长在阴坡下部水分条件较好的坡位,良好的水分条件适宜于干旱区多数植物的生长发育,因此物种组成丰富,多样性指数较高。沙棘分层盖度较大,地面蒸发相对较少,利于林下其他植物的生长发育,并且沙棘根部根瘤菌的固氮作用以及林下枯枝落叶的分解为其他植物的生长提供了养分^[18,21]。中国科学院水利部水土保持研究所在半干旱黄土区进行了沙棘、刺槐、柠条、山桃(*Prunus davidiana*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等 10 余种乔、灌木荒山造林对比试验,造林 10 a 后效果观

测也发现沙棘适应性最强、成林效果最优^[22]。这表明沙棘具有独特的生理学特性,对于干旱环境有较强的适应性,群落组成和结构具有明显优势,同时也说明通过人工植被建设与自然恢复演替相结合是推进黄土丘陵区沟坡植被恢复的有效措施。

白羊草植株相对低矮(表 2),易与其他物种共生组成喜暖灌草丛群落。白羊草属于 C_4 植物,水分利用效率高且二氧化碳固定效率高,有利于在干旱环境中生长,在严重缺水的生境中易成为顶级群落的优势种^[23]。经过演替前期物种间激烈的相互竞争及 20~30 a 的自然恢复,白羊草与伴生种和平共处,群落逐渐达到相对稳定状态,物种多样性较高。铁杆蒿群落是本地区较为稳定的次生演替优势群落,占有相对广泛的生态位,优势种植株高大且呈簇生(表 2),具有明显竞争优势是其群落多样性较差的可能原因^[24]。

表 2 不同植物群落物种多样性参数

群落类型	优势种			伴生种		
	种	盖度/%	株高/cm	种	盖度/%	株高/cm
沙棘	沙棘	47.5	149.0	蒿类	25.2	33.6
柠条	柠条	43.3	145.9	芡蒿+铁杆蒿	33.5	29.9
苔草	苔草	30.0	33.0	蒿类	19.2	58.7
赖草	赖草	57.7	92.0	小红菊+苔草	18.8	22.2
铁杆蒿	铁杆蒿	43.3	58.4	杠柳+胡枝子	11.5	45.0
芡蒿	芡蒿	31.7	46.3	阴行草+胡枝子	15.5	66.9
白羊草	白羊草	46.7	22.4	铁杆蒿	15.0	20.2

注:蒿类包括蒙古蒿、茵陈蒿以及铁杆蒿。

Margalef 丰富度指数(Ma)是以群落物种数量和总个体数描述物种的丰富程度。由图 1 可知,Ma 表现为赖草群落>白羊草群落>芡蒿群落>苔草群落>铁杆蒿群落>沙棘群落>柠条群落,但多数群落间无显著性差异。统计检验结果表明,赖草群落的物种丰富度显著大于其他群落($p<0.05$)。柠条群落与苔草群落、赖草群落、芡蒿群落以及白羊草群落的物种丰富度也存在显著差异($p<0.05$)。柠条群落的优势物种是丛生灌木,受水分光照条件限制,灌木层下少有草本伴生,因而其物种丰富度指数与多样性指数均低于其他群落。Pielou 均匀度指数(JP)可以表征某一群落或生境中全部物种个体数目的分配状况,反映各物种个体数目分配均匀程度的指标^[25]。图 1 中各群落物种均匀度指数大小排列为沙棘群落>柠条群落>白羊草群落>赖草群落>苔草群落>芡蒿群落>铁杆蒿群落,除铁杆蒿和沙棘群落外,其他植物群落间无显著差异。统计检验发现,蒿类群落的 Pielou 均匀度指数显著低于其他群落($p<0.05$)。差异产生的原因可能是铁杆蒿、芡蒿群落优势物种高大簇生且生态位

广,竞争力强,株下虽有其他物种伴生但个体数很少且长势较弱,并且群落所处样地坡度较大,不利于保土保墒,影响其他物种生存^[26-27]。表 2 显示铁杆蒿群落中,铁杆蒿盖度占 43.33%,伴生种仅占 11.5%;芡蒿群落中优势种占 31.67%,伴生种占 15.5%,也充分反映出蒿类群落物种分布的不均匀性。

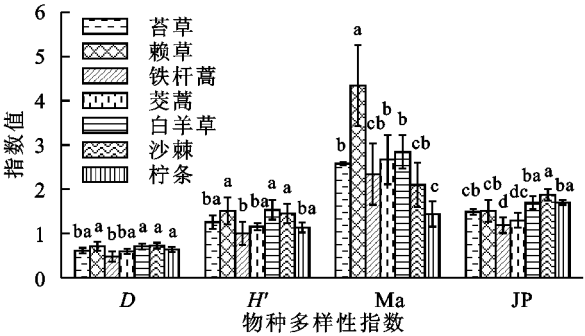


图 1 沟坡不同植物群落物种多样性指数

群落物种多样性指数、均匀度指数均呈现出灌木群落>草本群落的趋势,该结论与前人的研究结果一致^[24,28]。这可能受植被特征、生活型差异以及层次结构影响,同时也表明沟坡植被恢复中,人工建设植物群

落的物种多样性好于自然恢复,说明人工植被建设改造生态环境,提高群落生境条件,丰富群落物种多样性^[29]。由此可见,合理构建沟坡灌草结合的群落结构是全面治理沟坡水土流失和改善生态环境的有效手段。与同流域梁峁坡面相比^[30-31],沟坡 Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数略低于梁峁坡面,但差异不显著,而 Shannon-wiener 多样性指数显著低于梁峁坡,沟坡的 Pielou 均匀度指数与梁峁坡没有明显差异。受到立地条件的限制,梁峁坡土壤肥力水平、水分状况明显优于沟坡是造成上述差异的主要原因^[32]。

3.3 地上生物量

沟坡不同植物群落地上生物量见图2。总体来看,灌木群落地上生物量($1.53 \sim 5.85 \text{ kg/m}^2$)显著大于草本群落($0.17 \sim 0.41 \text{ kg/m}^2$) ($p < 0.01$)。两种灌木群落差异明显,柠条群落的地上生物量为 5.85 kg/m^2 ,是沙棘群落的 3.85 倍,但草本群落之间地上生物量差异较小。草本群落地上生物量表现为赖草群落 > 铁杆蒿群落 > 芨蒿群落 > 白羊草群落 > 苔草群落,其中赖草群落地上生物量为 0.41 kg/m^2 ,是苔草群落的 2.3 倍。综合表 1—2 可知,赖草群落生长于阴坡,水分条件相对较好,物种多样性丰富,植被盖度高,地上生物量大;铁杆蒿、芨蒿属半灌木植物,茎干木质^[27],地上生物量相对较大;白羊草群落生长在靠近基岩的黄绵土—红胶土区,养分水分条件较差,生长稀疏;苔草群落虽生长于水分较好地地貌部位,但其植株矮小,草质纤细柔软,地上生物量小。

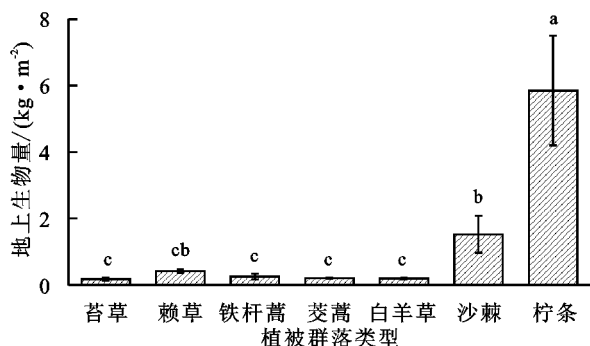


图2 沟坡植物群落地上生物量

在采样时间接近(7—8月)的条件下,与苏嫄等^[33]在同一小流域梁峁坡上的研究结果相比而言,沟坡草本群落地上生物量显著低于梁峁坡,灌木群落中沙棘群落地上生物量与梁峁坡无明显差异,柠条群落略高于梁峁坡面。这可能与不同坡位的水分、养分及热量条件差异有关。谢云等^[34]在大南沟小流域的监测表明,沟坡整体土壤水分条件明显劣于梁峁坡与沟谷。同时,黄奕龙等^[35]的研究成果也显示,相比于梁峁坡,沟坡气温较高,但光照较小。本文研究结果

表明沟坡植物群落整体生长状况明显差于梁峁坡,这与前人研究结果相互印证。

3.4 植被盖度

植被盖度可以反映植物的生长状况,是表现地上植被数量及浓密与稀疏状况的重要参数。图3给出了本研究沟坡不同植物群落盖度的变化情况。整体来看,7个植物群落盖度均在50%以上,说明沟坡植被覆盖状况良好。沟坡植被群落盖度从大到小依次是赖草>苔草>沙棘>白羊草>柠条>铁杆蒿>芨蒿。其中,赖草群落植被盖度最高,达83.3%,是芨蒿群落的1.6倍。芨蒿群落植被盖度显著低于其他群落,阴坡苔草群落与阳坡铁杆蒿群落的盖度存在显著差异,阴坡赖草植被盖度明显大于阳坡的铁杆蒿、半阳坡的白羊草及柠条群落($p < 0.05$)。这说明水分条件是黄土丘陵区沟坡植被生长的限制性因素,而光照、温度则是次要因素。因此,在人工植被恢复过程中,在水分条件较好的阴坡可适当密植以促进植被快速恢复,提高其水土保持效益。与齐治军等^[36]在同流域的草灌群落研究结论相比较,沟坡植被盖度均值约为68.7%,略高于梁峁坡植被盖度均值60.1%,但无显著差异。

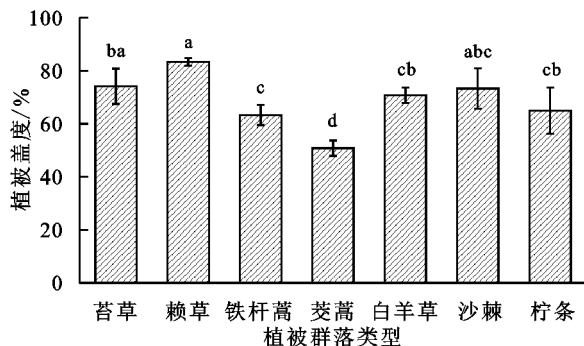


图3 沟坡不同植物群落盖度

4 结论

沟坡不同植物群落物种 Margalef 丰富度指数、Shannon-wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数差异明显。群落物种多样性指数、均匀度指数均呈现出灌木 > 草本的趋势,灌木群落地上生物量($1.53 \sim 5.85 \text{ kg/m}^2$)显著大于草本群落($0.17 \sim 0.41 \text{ kg/m}^2$)。沟坡植物群落盖度均在50%以上,除蒿类群落外,其他群落间差异较小。与梁峁坡植物群落相比,沟坡植物群落物种总数小,且基本无高大乔木生长;沟坡 Simpson 多样性指数、Margalef 丰富度指数略低,而 Shannon-wiener 多样性指数则显著偏低。沟坡草本群落地上生物量显著低于梁峁坡。沟坡植物群落盖度与梁峁坡无显著差异。结论表明相较于梁峁坡,沟

坡植被恢复进程较为缓慢。沟坡植被恢复的影响因素及其影响程度的高低还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 蔡强国,陆兆熊,王贵平.黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J].地理学报,1996,51(2):108-117.
- [2] 朱显谟.黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960,8(2):110-121.
- [3] 马克平.试论生物多样性的概念[J].生物多样性,1993,1(1):20-22.
- [4] 龚时旸,熊贵彬.黄河泥沙来源和地区分布[J].人民黄河,1979,1(1):9-20.
- [5] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [6] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖.黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J].地理学报,1966,32(1):22-38.
- [7] 郝文芳,梁宗锁,陈存根,等.黄土丘陵区弃耕地群落演替过程中的物种多样性研究[J].草业科学,2005,22(9):1-8.
- [8] 胡相明,程积民,万惠娥.黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征[J].水土保持通报,2006,26(3):41-45.
- [9] 王国梁,刘国彬,侯喜禄.黄土高原丘陵沟壑区植被恢复重建后的物种多样性研究[J].山地学报,2002,20(2):182-187.
- [10] Zhang J T, Dong Y, Stokes A. Factors affecting species diversity of plant communities and the restoration process in the loess area of China[J]. Ecological Engineering, 2010,36(3):345-350.
- [11] 贾燕锋,王宁,韩鲁艳,等.黄土丘陵沟壑区坡沟植被生态序列研究[J].中国水土保持科学,2008,6(6):50-57.
- [12] 孙长忠,黄宝龙.黄土高原沟坡次生植被与土壤营养现状的关系[J].林业科学研究,1998,11(3):330-334.
- [13] 江忠善,郑粉莉.纸坊沟流域水土流失综合治理减沙效益评价[J].泥沙研究,2004(2):58-63.
- [14] 师阳阳.黄土丘陵区不同退耕年限及模式下植被生长特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [15] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法:II β 多样性的测度方法[J].生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [16] 张笑培,杨改河,王和洲,等.黄土沟壑区不同植被恢复群落特征及多样性研究[J].西北林学院学报,2011,26(2):22-25.
- [17] 杨丽霞,陈少锋,安娟娟,等.陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究[J].草地学报,2014,22(2):291-298.
- [18] 梁超.陕北黄土丘陵区不同植被类型群落结构和土壤性质研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [19] 王永繁,余世孝,刘蔚秋.物种多样性指数及其分形分析[J].植物生态学报,2002,26(4):391-395.
- [20] 陈宽智.介绍4个多样性指数及均匀度测量[J].环境科学,1979(2):66-72.
- [21] 李代琼,梁一民,黄瑾,等.沙棘的形态解剖学特性研究[J].西北植物学报,2003,23(7):1224-1230.
- [22] 李代琼,梁一民,侯喜禄,等.黄土高原沙棘建造植被的生态功能及效益试验研究[J].沙棘,2003,16(3):16-21.
- [23] 焦菊英,马祥华,白文娟,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落与土壤环境因子的对应分析[J].土壤学报,2005,42(5):744-752.
- [24] 寇萌,焦菊英,杜华栋,等.黄土丘陵沟壑区不同立地条件草本群落物种多样性与生物量研究[J].西北林学院学报,2013,28(1):12-18.
- [25] 吴昊.不同类型群落物种多样性指数的比较研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(5):84-89.
- [26] 胡良军.黄土高原植被恢复的土壤水分生态环境[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2002.
- [27] 杜华栋.陕北黄土高原优势物种叶片结构与生理特性不同立地环境的生态响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [28] 师阳阳,陈云明,张光辉,等.不同退耕年限撂荒地植物多样性及生物量分析[J].水土保持研究,2012,19(6):36-40.
- [29] 张健,刘国彬.黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J].自然资源学报,2010,25(2):207-217.
- [30] 武春华,陈云明,王国梁.黄土丘陵区典型植物群落特征及其与环境因子的关系[J].水土保持学报,2008,22(3):64-96.
- [31] 杜峰,山仑,梁宗锁.陕北黄土丘陵区撂荒演替研究:群落组成与结构分析[J].草地学报,2005,13(2):140-143.
- [32] 徐炳成,山仑,陈云明.黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素[J].中国水土保持科学,2003,1(4):32-35.
- [33] 苏嫻,焦菊英,马祥华.黄土丘陵沟壑区主要群落地上生物量季节变化及其与土壤水分的关系[J].水土保持研究,2012,19(6):7-12.
- [34] 谢云,刘宝元,伍永秋.切沟中土壤水分的空间变化特征[J].地球科学进展,2002,17(2):278-282.
- [35] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域沟坡水热条件及其生态修复初探[J].自然资源学报,2004,1(2):183-189.
- [36] 齐治军,许明祥.黄土丘陵区小流域土地覆被物空间分布特征及影响因素研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(8):75-82.