

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.032.

逯金鑫, 高飞, 周荣磊, 等. 不同植被类型下草本群落与土壤因子的关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 310-317, 326.

LU Jinxin, GAO Fei, ZHOU Ronglei, et al. Relationship Between Herbaceous Communities and Soil Nutrients Under Different Vegetation Types [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 310-317, 326.

不同植被类型下草本群落与土壤因子的关系

逯金鑫^{1,2}, 高飞¹, 周荣磊², 刘洋洋², 温仲明²

(1.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的]在黄土高原大规模植被恢复重建的背景下,揭示贴地草本群落与耕作层土壤理化性质的协同发育及相互关系对恢复植被的可持续性发展尤为重要。[方法]以陕北绥德辛店沟小流域不同植被恢复类型下草本群落为研究对象,通过野外布设样方采集土壤标本,测定群落盖度,物种信息等指标,辅以室内试验和统计分析的办法,分析了不同植被类型下草本群落特征、土壤因子及其响应关系。[结果](1)陕北小流域不同植被恢复类型下草本层的Margalef丰富度指数、Simpson优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数、Pielou均匀度指数四项指数总体差异显著,荒地、灌丛地>乔灌混交林>人工草地、乔木林($p<0.05$)。(2)土壤因子与草本群落生物量、群落盖度、叶功能性状呈现出显著相关关系($p<0.05$),且在不同植被类型下草地样方的响应中南坡优于北坡。(3)RDA排序分析发现,土壤有机碳、全氮、全磷含量、土壤容重和土壤最大持水量是影响草本群落生长发育的关键因子。[结论]灌丛地、乔灌混交林和荒地中草地生态稳定性及水土保持功能性优于其他植被恢复模式。

关键词: 植被恢复; 群落多样性; 辛店沟小流域; 土壤养分; 生物量

中图分类号: Q948.113

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0310-08

Relationship Between Herbaceous Communities and Soil Nutrients Under Different Vegetation Types

LU Jinxin^{1,2}, GAO Fei¹, ZHOU Ronglei², LIU Yangyang², WEN Zhongming²

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Grassland and Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] In the context of large-scale revegetation of the Loess Plateau, it is essential for the sustainability of the revegetation to reveal the synergistic development and interrelationship between the physical and chemical properties of the adjacent herbaceous communities and the soil in the cultivated layer. [Methods] Herbaceous communities in Xindian watershed of Suide in northern Shaanxi were examined under different types of plant restoration. Soil samples were collected by establishing field plots, measuring community cover, species information, and other indicators. Herbaceous community characteristics, soil factors, and their response relationships under various vegetation types were examined through indoor experiments and statistical analysis. [Results] (1) The Margalef richness index, Simpson dominance index, Shannon-Wiener diversity index, and Pielou evenness index of the herbaceous layer under various vegetation restoration types in the northern Shaanxi sub-basin differed significantly, with wasteland and scrubland>mixed tree and shrub forest>planted grassland and tree forest ($p<0.05$). (2) Soil parameters had significant associations with herbaceous community biomass, community coverage, and leaf functional characteristics ($p<$

收稿日期: 2021-10-12

修回日期: 2022-03-28

资助项目: 国家自然科学基金“黄土丘陵沟壑区植被水沙拦蓄效率变化与水文连通性响应”(4197071873)

第一作者: 逯金鑫(1995—), 男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要研究方向: 气候变化与生态恢复。E-mail: ljx1230@nwafu.edu.cn

通信作者: 温仲明(1969—), 男, 陕西定边人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 黄土高原植被恢复与重建。E-mail: zmwen@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

0.05), and grassland samples were more responsive to different vegetation types on southern slopes than on northern slopes. (3) The RDA ranking analysis revealed that soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus content, soil bulk, and maximum soil water holding capacity were the most influential factors in herbaceous community growth and development. [Conclusion] The ecological stability and soil and water conservation functions of grassland in scrubland, mixed tree and irrigation forest, and wasteland were superior to those of other methods of restoring vegetation.

Keywords: vegetation restoration; community diversity; Xindian watershed; soil nutrients; biomass

长期以来,得益于我国退耕还林还草工程,黄土高原地区的植被在物种组成、盖度结构与性状特征等方面都有了极大地提高^[1],对水土流失防治发挥了积极作用。一方面,植物林灌层结构的改善,可通过有效拦截降雨和降低雨滴低落动能来减少地表径流和侵蚀速率;另一方面,植被贴地林草层的发育能够增大地表粗糙度,增强水分渗透度,提高拦蓄功能,减少大面积的土壤冲刷,阻挡泥沙运移^[2-3]。

但在植被恢复过程中,单纯以提高植被盖度为目的的乔木林建设依然是主要的治理模式。随着人工林地发育,也逐渐暴露出一些问题。由于人工乔木林对水分的强烈竞争,导致林下植被发育不良,土壤干化严重,引起陆地蒸散发(ET)呈现出明显升高趋势^[4-6]威胁到植被发育的可持续性。例如雷婉宁等^[7]对植被结构与水土流失关系的研究表明,较高的植被盖度并不代表良好的水土保持效益,林下植被缺乏可能会引发更为严重的水土流失;汪有科等^[8]认为黄土高原人工林水土保持效益的关键点在于具有系统结构的林分覆被率。上述现象表明,黄土高原地区的植被建设虽然取得了较大成就,但植被结构不合理引发的生态水文问题依然突出,如何构建结构合理的植被体系,仍然是该地区植被恢复重建面临的重大问题。而很多研究表明,林下植被发育尤其是贴地面覆盖层的发育,对水土流失的控制发挥着关键作用^[9]。如焦菊英等^[10]提出只要贴地表盖度达到63.4%以上就可以有效地防止水土流失。因此理清地表不同植被类型下草本群落特征与土壤环境的响应关系就显得至关重要。施晶晶等^[11]对黄土高原腹地植被群落研究发现林下草本群落组成的相似性与地理距离和生境差异呈负相关关系,其解释率为47.8%,空间因子与环境因子对林下草本层群落多样性的联合解释率为23.9%。Jia等^[12]研究发现恢复草地物种多样性的最大部分是土壤性质,特别是土壤湿度的纯影响。在植被恢复过程中,土壤养分对植被群落的个体生长以及群落组成和结构产生影响,而群落植被也会通过土壤养分的利用和消耗来影响土壤的理化性质,两者是一种相互依赖和制约的关系^[13]。

黄土高原因为其特殊的地理环境,植被重建难度大,耗时长,建立长期高效的植被群落成为新时期植被恢复工程的亟需解决的问题。因此本研究以陕北辛店沟小流域内不同人工恢复重建植被为研究对象,解析小流域治理下,不同恢复植被结构层下草本群落生物特征,土壤养分、土壤水分等土壤因子的响应关系,对小流域恢复治理及生态建设具有一定参考价值。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北地区辛店沟小流域试验场(110°17'18.23''—110°17'35.35''E, 37°30'10.93''—37°31'30.99''N)。辛店沟流域试验场位于黄河一级支流无定河左岸,属黄土丘陵沟壑区第一副区,同时位于黄河粗泥沙集中来源区核心区位,面积约1.44 km²(图1)。研究区为温带大陆性季风气候,气候类型包括干旱和半干旱。由于研究区地形的复杂多样加之丘陵起伏又造成了阴阳坡、沟谷崩顶等小气候的局部变化,致辛店沟小流域年均温度在8℃左右,年均降雨量400.0~520.0 mm,降水主要在6—9月以大雨或暴雨形式集中出现。主要植被类型为典型草原植被类型及落叶阔叶灌丛植被类型,草种主要包括狗尾草(*Setaria viridis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、蒙古苕芭(*Cymbaria mongolica*)等,蒿属的铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)等;灌丛植被主要有柠条锦鸡(*Caragana korshinskii*)、桑树(*Morus alba*)、灌木铁线莲(*Clematis fruticosa*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)等。乔木林主要有侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等。

1.2 野外调查与指标测定

1.2.1 样地布设 采用典型抽样的方法,在整个小流域内选择立地条件相似、植被组成结构不同且具有代表

性的样地。样方设置采用标准地调查法在样地南北坡向各设置 10 m×10 m 的样方,为准确获得样地信息,每个 10 m×10 m 样方沿坡向垂直方向在上、中、下坡重复

三次,同时所选的样方中按照对角线设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,详细调查记录样地内物种信息、群落盖度、坡度、坡位、海拔等相关信息(表 1)。

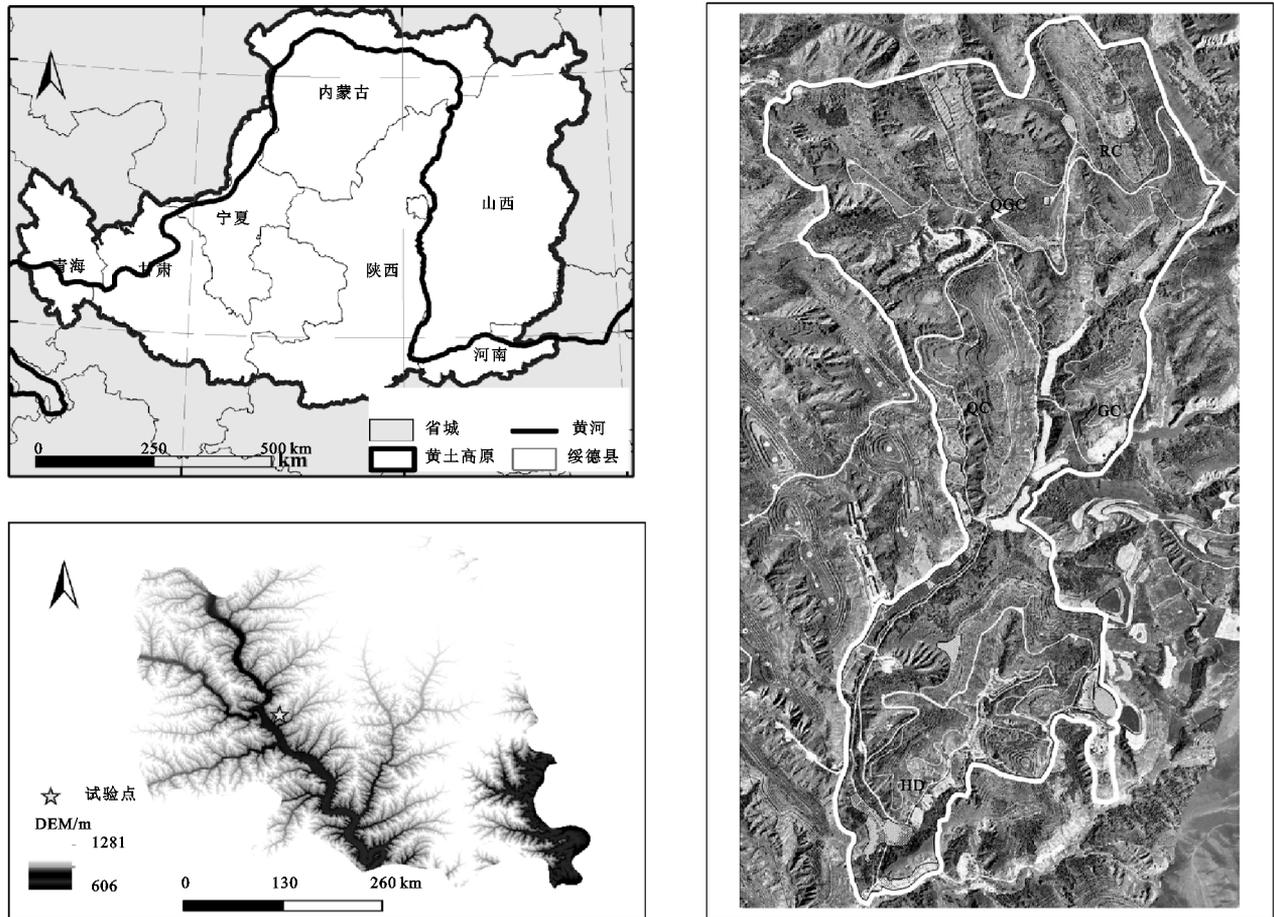


图 1 辛店沟小流域样点分布

表 1 南坡和北坡样方基本概况

植被类型	样地编号	主要草本物种	北坡			南坡			坡位
			海拔/m	坡度/(°)	群落盖度/%	海拔/m	坡度/(°)	群落盖度/%	
人工草地	RC ₁	多花胡枝子、阿尔泰狗娃花、黄花蒿	1030	29.0	83.3	1029	25.0	79.7	上
	RC ₁		1020	30.0	82.7	1021	28.7	83.3	中
	RC ₁		1016	33.0	80.7	1012	30.0	80.7	下
荒地	HD ₂	达乌里胡枝子、克氏针茅、蒙古苜蓿	955	17.1	68.7	956	18.3	60.7	上
	HD ₂		946	24.3	61.0	948	20.2	57.0	中
	HD ₂		938	15.0	64.8	944	23.0	59.0	下
灌丛地	GC ₃	达乌里胡枝子、茜草、狗尾草、甘草	990	24.5	51.3	1001	23.8	54.0	上
	GC ₃		987	22.0	50.3	996	24.2	47.0	中
	GC ₃		982	29.0	50.7	984	26.4	55.3	下
乔木林	QC ₄	角蒿、狗尾草、二色补血草、凤毛菊	1011	16.3	51.6	998	27.2	42.0	上
	QC ₄		1005	17.7	49.3	990	29.3	39.7	中
	QC ₄		998	25.3	47.7	982	27.5	37.0	下
乔灌混交林	QGC ₅	达乌里胡枝子、茵陈蒿、长芒草、翻白草	1019	24.4	38.3	1021	23.3	57.3	上
	QGC ₅		1012	27.0	43.0	1017	23.0	53.3	中
	QGC ₅		1009	26.8	49.7	1013	29.0	43.7	下

1.2.2 植物样品采集与指标测定 在对各样地内设置的 3 个 1 m×1 m 样方内草本群落进行植被调查,

获取群落盖度(包括样方内上层林木)(Community coverage, CC)、物种组成等指标的同时,进行齐地刈

割取地上生物样,装袋密封带回实验室,首先将鲜重植物样在烘箱中 105℃ 杀青 30 min,然后将样品 80℃ 烘干至恒重,用电子天平称取地上生物量干重(Biomass, B)。样方调查时,每个样方取具有代表性的优势种植株叶片,每个植株上沿东西南北 4 个方向采取光照良好、完全伸展且没有病虫害的叶片 10~15 片,用扫描仪叶片完全平展叶片图像,然后用图像分析软件 ImageJ 根据扫描图片的像元数计算叶片面积。取大小均匀,形状舒展的叶片用电子游标卡尺(精度 0.01 mm)沿着叶片的主脉方向,在距离主脉两侧约 1 mm 处均匀选取上、中、下端分别测量叶片厚度后取其平均值,记平均值为叶片厚度(Leaf thickness, LT),烘干称重记录叶干重(Leaf dry weight, LDW),并计算比叶面积(Specific leaf area, SLA),叶组织密度(Leaf tissue, LTD)最后测量叶有机碳含量(Leaf organic carbon, LOC);叶全氮含量(Leaf total nitrogen, LTN);叶全磷含量(Leaf total phosphorus, LTP),叶片元素测量方法与土壤样品相同。

1.2.3 土壤样品采集及指标测定 土壤样品在每个 10 m×10 m 样方内采用 S 形随机采样,采样深度为 30 cm 的耕作层土壤,每个样方采集 7 份土壤样品混合过筛后装入土壤塑封袋。土样风干过筛后进行土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、全氮(Soil total nitrogen, STD)、全磷(Soil total phosphorus, STP)的测定。采用环刀法取原状土带回室内,在清水中浸泡 24 h 后称重,在 65℃ 下烘干后测定干重用于计算土壤水分、土壤容重(Soil bulk density, SBD)和最大持水量(maximum water capacity of soil, MWC)。利用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳的含量,采用凯氏定氮法利用定氮仪(Kjeltec™ 2399, 瑞典)测定土壤全氮含量(Soil total nitrogen, STN),基于土壤样品 NaHCO₃ 浸提液,使用钼锑抗比色法用分光光度计(Hitachi UV2300)测定土壤全磷含量(Soil total phosphorus, STP)。

1.3 数据处理与分析

草本群落物种多样性叶功能性状如下:

Margalef 丰富度指数(M):

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

Simpson 优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H):

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(J_{sw}):

$$J_{sw} = \frac{H}{\ln S}$$

叶组织密度:

$$\text{叶组织密度} = \text{叶干重} / (\text{叶面积} \times \text{叶厚度}) \quad (6)$$

比叶面积:

$$\text{比叶面积} = \text{叶面积} / \text{叶干重} \quad (7)$$

式中: S 为物种数目; N 为所有物种的个体总数; P_i 为第 i 个物种的相对重要值,即第 i 个物种个体数占 N 的比值。

本文采用 Spss 22.0 和 Excel 2010 对数据进行统计分析,用 Duncan's multiple range test 检验南坡和北坡不同植被结构层下草本群落特征、土壤养分和土壤水分的显著性差异($p=0.05$),用 Pearson 相关分析进行数据分析,使用 Canoco5(生态数据处理软件)进行冗余分析以揭示草本群落盖度及地上生物量与群落特征指数和土壤养分的关系。文中统计图表采用 Origin 2017 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 物种多样性指数

物种多样性是草本群落物种分布均匀性以及丰富度的整体体现,其反映了群落结构类型的稳定程度和生境差异^[14]。由图 2 可知,小流域南北坡地表草本群落的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数总体为:荒地和灌丛地最高,乔灌混交林次之,人工草地、乔木林最低的趋势,并且不同类型样地下草本样方四项指数总体差异显著,所选样地上坡、中坡、下坡中 3 个重复样方的四项指数差异并不明显($p>0.05$)。南坡乔木林、乔灌混交林的 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数相较于北坡呈现出一个更低的姿态($p<0.05$)。而 Shannon-Wiener 多样性指数在不同坡向上的差异不显著($p>0.05$),但不同植被类型的关系呈现出:灌草>荒地>乔灌混交林>乔木林>人工草地($p<0.05$)。

2.2 土壤养分及水分

对南北坡不同植被类型与各个土壤理化指标进行方差分析,结果表明,土壤有机碳、土壤全磷、土壤全氮、土壤容重、土壤最大持水量在不同土地利用方式间均具有显著差异(表 2)。

在北坡不同植被类型下草地土壤有机碳在数值大小上为:人工草地(RC)≥荒地(HD)≥乔灌混交林(QGC)≥灌丛地(GC)≥乔木林(QC)($p<0.05$)。土壤全磷为:灌丛地≥人工草地≥荒地>乔灌混交林≥乔木林($p<0.05$)。土壤全氮为:人工草地>灌丛地≥乔

灌混交林 \geq 荒地 \geq 乔木林($p < 0.05$)。在南坡不同植被类型下草本样方中,土壤有机碳与北坡呈现出大致相似的大小关系,人工草地 $>$ 荒地 \geq 乔灌混交林 $>$ 灌丛地 $>$ 乔木林($p < 0.05$)。土壤全磷为:人工草地 \geq 荒地 \geq 灌丛地 $>$ 乔灌混交林 $>$ 乔木林($p < 0.05$)。土

壤全氮为:人工草地 $>$ 荒地 $>$ 乔灌混交林 \geq 乔木林 \geq 灌丛地($p < 0.05$)。从整体上看,物种不同植被类型下草地耕作层的土壤养分呈现出:人工草地有机碳、全磷、全氮最高,灌丛地、乔灌混交林和荒地次之,乔木林最低($p > 0.05$)。

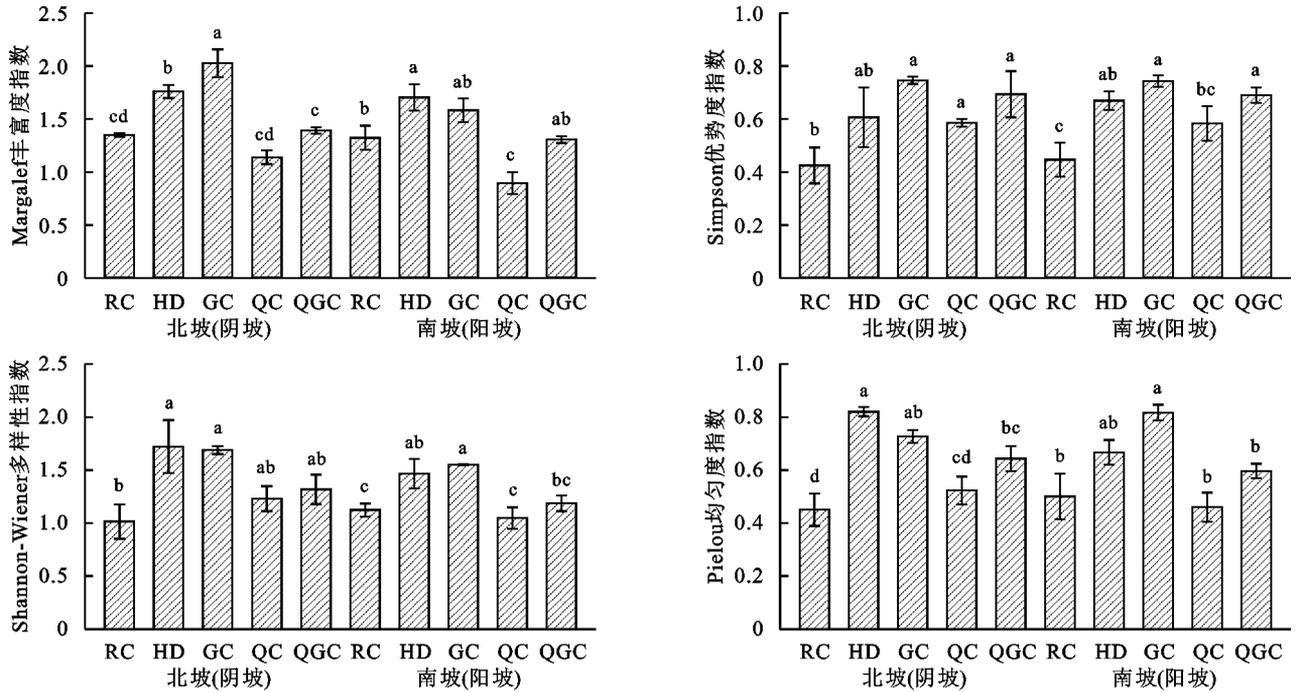


图2 不同植被结构类型下草本群落多样性

表2 不同植被类型下土壤养分差异水平

坡向	土壤有机碳	土壤全磷	土壤全氮	土壤容重	土壤最大持水量
北坡	$F_{4,39} = 4.35, p < 0.05$	$F_{4,39} = 5.449, p < 0.05$	$F_{4,39} = 3.501, p < 0.05$	$F_{4,39} = 18.705, p < 0.001$	$F_{4,39} = 23.928, p < 0.001$
	$R^2 = 0.489, p < 0.05$	$R^2 = 0.56, p < 0.05$	$R^2 = 0.417, p < 0.05$	$R^2 = 0.835, p < 0.001$	$R^2 = 0.868, p < 0.001$
南坡	$F_{4,39} = 10.215, p < 0.001$	$F_{4,39} = 3.56, p < 0.05$	$F_{4,39} = 19.197, p < 0.001$	$F_{4,39} = 26.1, p < 0.001$	$F_{4,39} = 76.117, p < 0.001$
	$R^2 = 0.725, p < 0.001$	$R^2 = 0.422, p < 0.001$	$R^2 = 0.701, p < 0.001$	$R^2 = 0.878, p < 0.001$	$R^2 = 0.955, p < 0.001$

壤含水量方面(表3),南北坡不同植被类型下草地耕作层土壤的容重都展现出:乔灌混交林 $>$ 乔木林 $>$ 灌丛地 \geq 荒地 $>$ 人工草地的趋势($p < 0.05$),并且乔灌混交林和乔木林要明显大于其他植

被类型。而土壤最大持水量北坡为:人工草地 \geq 荒地 \geq 乔灌混交林 \geq 灌丛地 \geq 乔木林($p < 0.05$)。南坡为:乔灌混交林 \geq 荒地 \geq 人工草地 \geq 乔木林 \geq 灌丛地($p < 0.05$)。

表3 不同植被类型下草地耕作层土壤养分

坡向	样方编号	土壤有机碳/kg	土壤全磷/kg	土壤全氮/kg	土壤容重/cm ³	土壤最大持水量/%
北坡	RC	5.53 \pm 1.25a	0.63 \pm 0.03a	0.55 \pm 0.019a	1.15 \pm 0.060c	49.22 \pm 1.08a
	HD	4.54 \pm 0.39ab	0.61 \pm 0.05ab	0.36 \pm 0.048b	1.17 \pm 0.026c	45.85 \pm 5.07ab
	GC	4.00 \pm 0.083b	0.64 \pm 0.05a	0.41 \pm 0.011b	1.21 \pm 0.025c	39.83 \pm 1.83c
	QC	3.52 \pm 0.170b	0.53 \pm 0.01c	0.35 \pm 0.03b	1.30 \pm 0.041b	39.63 \pm 1.17c
	QGC	4.35 \pm 0.41ab	0.56 \pm 0.56bc	0.40 \pm 0.053b	1.37 \pm 0.02a	42.18 \pm 2.34bc
南坡	RC	6.16 \pm 0.41a	0.65 \pm 0.03a	0.60 \pm 0.04a	1.14 \pm 0.05d	35.98 \pm 1.08b
	HD	4.84 \pm 0.37b	0.63 \pm 0.02a	0.45 \pm 0.04b	1.20 \pm 0.01c	39.34 \pm 5.07ab
	GC	3.41 \pm 0.25c	0.61 \pm 0.05a	0.37 \pm 0.03d	1.26 \pm 0.02c	33.99 \pm 1.83c
	QC	2.60 \pm 0.42d	0.47 \pm 0.02c	0.31 \pm 0.02cd	1.31 \pm 0.02b	35.66 \pm 1.17b
	QGC	4.19 \pm 0.5b	0.53 \pm 0.02b	0.39 \pm 0.04c	1.55 \pm 0.03a	44.34 \pm 2.24a

注:同一列不同小写字母表示同一坡向不同植被类型下草本样地土壤养分含量差异显著($p < 0.05$)。

2.3 草本群落与土壤养分的关系

草本群落在生态系统中极为重要,对减小地表径流侵蚀,改善土壤结构有着至关重要的作用^[15-17]。见图3,5种植被类型下南、北坡草地耕作层土壤有机碳、全氮与草本群落生物量及草本群落盖度均呈显著正相关关系($r=0.685, p<0.01, r=0.608, p<0.05$);此外,南、北坡样方土壤最大持水量与草本群落生物量、群落盖度分别呈现出显著的正相关关系($r=0.735, p<0.01, r=0.730, p<0.01$),与土壤容重呈现显著负相关关系($r=-0.652, p<0.05, r=-0.778, p<0.01$)。综上所述,土壤养分、水分储蓄功能与植被群落盖度及生物量有着显著相关性,且在不同植被类型下草地样方的响应南坡要普遍优于北坡。

冗余分析(RDA)是一种提取和汇总一组响应变量中变化的排序方法^[18],本文通过线性约束性RDA排序(图4),分析不同草本群落叶功能性状对土壤因子的响应关系。结果显示,RDA排序轴1和排序轴2的特征值分别为0.669,0.042,累积解释百分率为71.2%,总体解释百分率达到73.1%,可反映叶功能性状与土壤因子的关系。土壤因子对各叶功能性状指标的响应不同,且程度也有差异。比叶面积、叶全磷含量、叶全氮含量、叶有机碳含量与土壤有机碳含量、土壤全氮含量、土壤全磷含量和土壤最大持水量存在较强的正相关关系,叶厚度、叶组织密度、叶干重与土壤容重呈现显著正相关关系。由此可知,土壤有机碳含量、土壤全氮含量和土壤全磷含量、土壤最大持水量以及土壤容重是影响草本群落叶功能性状的关键土壤因子。此外,视觉检验也表明,人工草地、灌丛地、乔灌混交林对土壤养分因子和土壤水分因子的响应最高,乔木林最低,其中乔灌混交林对土壤容重的响应相对于其他植被样方最为明显,说明完整的植被结构层对改善土壤容重有着显著的效果。但是从整体上来看南坡不同植被样方对土壤水分的响应要优于北坡,这也与上述文中土壤水分方差分析的结果一致。

3 讨论

退耕还林还草是我国黄土丘陵区小流域生态恢复治理的主要方式,科学地进行人工植被的营造和抚育可减少土壤侵蚀,恢复生态,稳步提高当地经济收入。因此解析不同植被恢复模式下草本群落与土壤因子的关系,不仅可以为该地区建立的植被重建工作提供理论基础,也可为该地区人与自然的协调发展带来长远的效益^[19-21]。

草本层是生态系统养分循环维持稳定的重要影响因素,其多样性间接的反映了植被的恢复程度。研究中,我们发现灌丛地的草本多样性要显著高于人工林下草地。这是因为灌木和草本相互竞争土壤水分、养分,刺激群落的整体发育,灌木密度增加不会影响草本产量,适量的灌木还能吸引牲畜从而对草本植物有利^[22-23],这与郑江坤等在岷江上游林下草本群落分布特征的研究结果一致。乔木林以及乔灌混交林下草本由于受到树木根系及冠层在空间上的挤压,较差的生境也导致了多样性较低。但是由于造林在树种选择及利用方式上有着很强的自相关性,因此林下草本植物群落物种多样性因不同造林模式而有所差异^[24],这也解释了乔灌混交林要比乔木林多样性更高的原因。造林在一定时期内会引起土壤水分含量严重下降从而影响林下草本植物群落的组成结构和土壤理化性质,导致草本群落在水分胁迫下停滞发育,降低了林下植物群落多样性^[25]。土壤水分一直以来都是制约陕北黄土丘陵区植树造林的关键要素,本文发现大型乔灌林下的土壤容重较大,土壤持水性相对较差,尤其在乔木林中表现最为典型。地表草本层的生物量和群落盖度也随林下土壤因子质量的降低而降低,土壤干层和暴雨径流侵蚀加重,损伤了人工林的水土保持功能^[26-28]。这一点在陕北丘陵的南坡(阳坡)上表现更为显著。由于土壤养分和水分在阴坡含量较高并且在坡底富集的趋势,汝海丽等^[29]学者发现草本群落地上生物量、物种多样性、群落盖度等特征指标在不同坡向的大小顺序基本为:阴坡>阳坡和半阴半阳坡,在不同坡位的大小顺序基本为:坡下部>坡中、上部。此外,阳坡太阳辐射及温度相较北坡占据一定优势^[30],因此大型乔灌生长态势更旺盛也一定程度上使得南坡林下草本地上生物量及盖度发育不如北坡,因此,有学者在黄土高原东部山地对林下草地进行增温试验以期解析林下草地生物特征对温度的响应^[31],结果表明增温显著增加了林下草地盖度及地上生物量,但植物的密度高度对增温的响应并不敏感,同时温度的升高也增强土壤水分对植被的胁迫效应,增大了植被对水分的依赖性。这也与研究中南坡向样方中灌丛地、乔木林、乔灌混交林对土壤持水特性不同响应差异强于北坡的结果相同。乔木林由于在空间上植被冠幅的重叠性明显低于乔灌混交林,且地表草本群落明显低于灌丛地而表现出对土壤水分、养分都显著低于其他的植被覆盖模式。研究发现植被的叶功能性状与土壤因子有着显著相关性,叶功能性状的不同也直接导致了群落的特征差异。

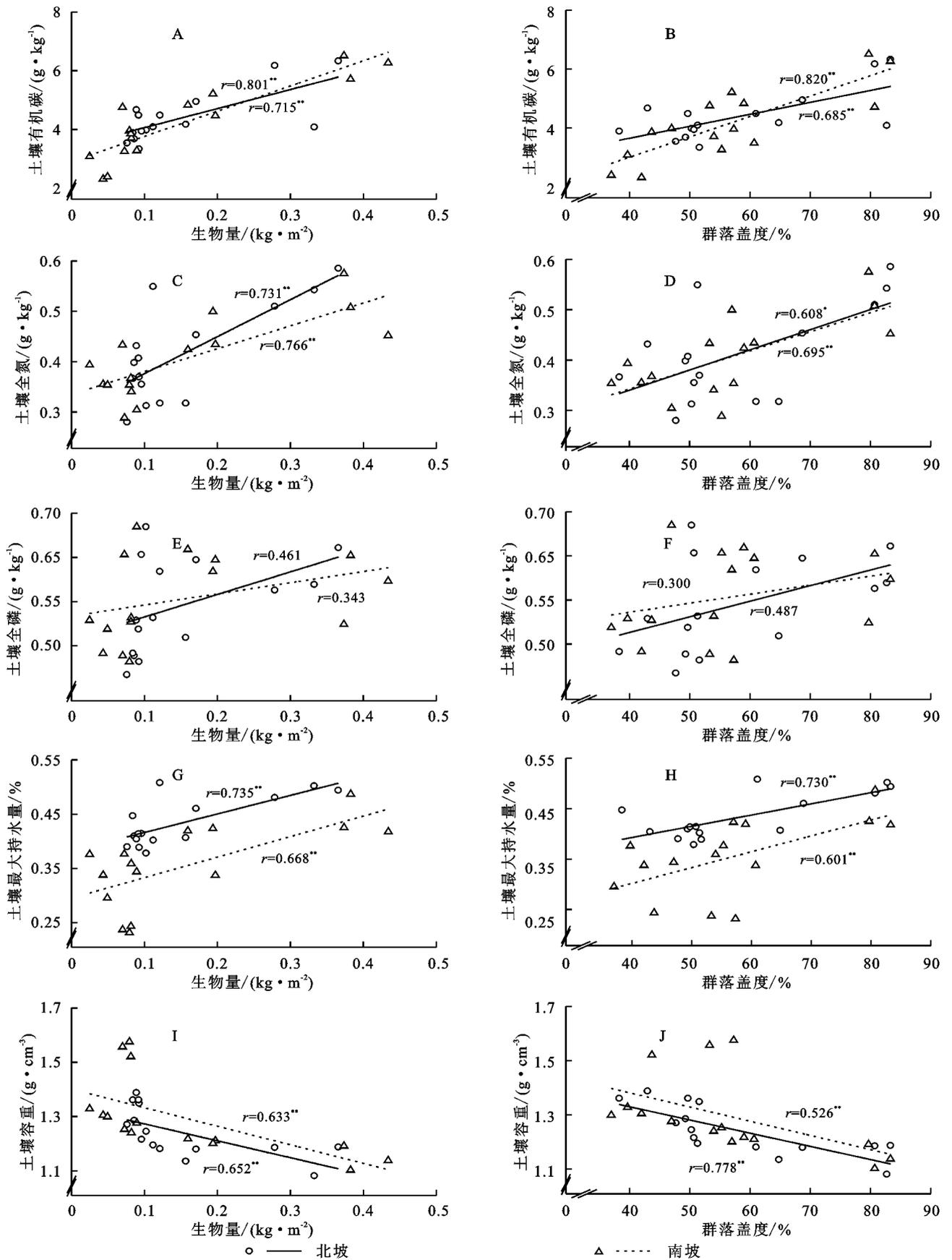
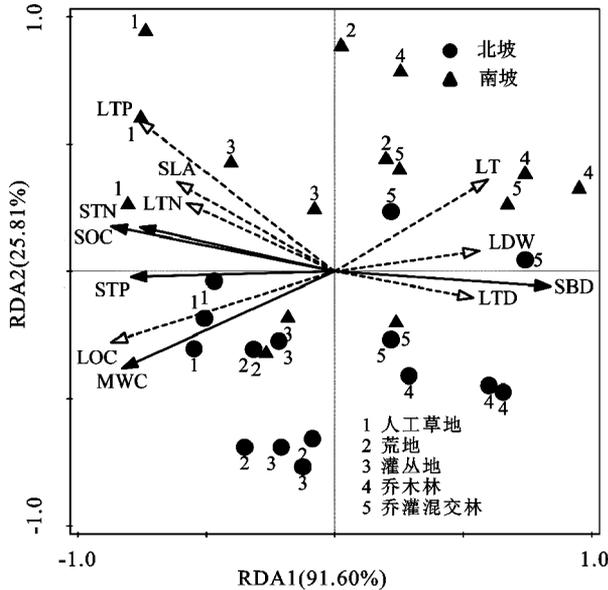


图3 草本生物量、群落盖度与土壤养分的关系

此外,也有学者研究表明随着退耕还林还草年份的增加,人工林下的草本植物群落趋于稳定,多样性、

生物量、盖度等指标增势明显。例如杨玉婷等对陕北黄土区五期“三北”防护林林下草本生物群落与造林

年限呈现出一个明显的正相关关系^[32]。海龙等^[33]以天然保护性草坡为对照对黄土丘陵沟壑区 7 种造林模式林下草本植物多样性及土壤有机质进行对比研究发现,7 种造林模式下的草本植物多样性、土壤全氮、有效钾和有机质均高于天然草坡。综上,在黄土高原腹地,扩散限制与环境过滤协同主导了退耕还林还草后草本群落的发育与构建^[34],因此可能未被测量的生境因子增大了土壤因子对本研究的解释率,上述差异将在亟待下一阶段的研究剖析。



注:冗余分析(RDA)结果的显著性用 Monte Carlo 分析进行检验($p < 0.05$)。

图 4 草本群落多样性、叶功能性状与土壤因子的 RDA 排序

4 结论

由于人工草地植被物种受到人为干扰严重,以及乔灌林下草本群落受到上层大型植被冠层遮挡和地下土壤养分的竞争,陕北小流域不同植被恢复类型下草本植物的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数四项指数总体差异显著,荒地和灌丛地最高,乔灌混交林次之,人工草地、乔木林最低。

土壤因子方面,人工草地有机碳、全磷、全氮最高,灌丛地、乔灌混交林和荒地次之($p > 0.05$),土壤水分涵养功能在不同植被类型下草地中南坡都要优于北坡。乔木林在土壤因子数值上要显著低于其他植被类型($p < 0.05$)。整体而言,荒地的草本群落与土壤因子协调关系最好,灌丛地、乔灌混交林较好,乔木林最差,人工草地的群落多样性与土壤养分受人为干扰太大,协调性也有所欠缺。故单纯以乔木林为主的恢复模式,会造成林下草本群落生态失衡,降低土壤理化性质造成土壤干层,侵蚀加重的现象。

同时通过数据统计分析发现,土壤有机碳含量、土壤全氮含量、土壤全磷含量、土壤容重和土壤最大

持水量是影响草本群落盖度、生物量及叶功能性状的关键因子,此外灌丛地、乔灌混交林和自然恢复的荒地在 5 种植被类型中草地的生态稳定性和水土保持功能性也要优于其余植被恢复模式。

参考文献:

- [1] Fu B, Chen L, Ma K, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China[J]. *Catena*, 2000,39(1):69-78.
- [2] Wen X. Temporal and spatial relationships between soil erosion and ecological restoration in semi-arid regions: a case study in northern Shaanxi, China[J]. *Geoscience & Remote Sensing*, 2020,57(2):1-19.
- [3] Wang T. Impacts of the grain for green project on soil erosion: A case study in the Wuding river and Luohe river basins in the Shaanxi Province of China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018,16(4):4165-4181.
- [4] 王雅舒,李小雁,石芳忠,等.退耕还林还草工程加剧黄土高原退耕区蒸散发[J].*科学通报*,2019,64(5):588-599.
- [5] 叶柳欣,库伟鹏,刘军,等.封育年限对毛竹林群落结构和林下植物多样性的影响[J].*生态学报*,2020,40(3):921-930.
- [6] 余杭,罗清虎,李松阳,等.灾害干扰受损森林土壤的碳、氮、磷初期恢复特征与变异性[J].*山地学报*,2020,38(4):532-541.
- [7] 雷婉宁,温仲明.基于 TM 遥感影像的陕北黄土区结构化植被因子指数提取[J].*应用生态学报*,2009,20(11):2736-2742.
- [8] 汪有科,吴钦孝,韩冰,等.森林植被水土保持功能评价[J].*水土保持研究*,1994,0(3):24-30.
- [9] 王晗生,刘国彬,王青宁.防蚀有效植被的结构特征探讨[J].*中国生态农业学报*,2001,9(2):54-56.
- [10] 焦菊英,王万中,李靖.黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J].*植物生态学报*,2000,24(5):608-612.
- [11] 施晶晶,赵鸣飞,王宇航,等.黄土高原腹地人工林下草本层群落构建机制[J].*植物生态学报*,2019,43(9):834-842.
- [12] Jia X, Shao M, Wei X. Richness and composition of herbaceous species in restored shrubland and grassland ecosystems in the northern Loess Plateau of China[J]. *Biodiversity & Conservation*, 2011,20(14):3435-3452.
- [13] 赵满兴,余光美,白二磊,等.陕北黄土高原植被恢复对土壤理化性状的影响[J].*中国农学通报*,2020,36(25):86-94.
- [14] 郝志远,李素清.阳泉矿区煤矸石山复垦地不同植被下草本植物群落生态关系[J].*应用与环境生物学报*,2018,24(5):1158-1164.
- [15] 郭茹茹,杨磊,李宗善,等.半干旱黄土高原苜蓿草地撂荒过程土壤水分变化特征[J].*生态学报*,2020,40(23):1-9.
- [16] 岩晓莹,马理辉,刘铮,等.降水增加对黄土高原深层土壤水分的影响[J].*土壤通报*,2020,51(3):614-620.

- drought fisheries in eastern Australia [J]. Fisheries Management and Ecology, 2012, 19(1): 54-68.
- [8] Chaparro G, Marinone M C, Lombardo R J, et al. Zooplankton succession during extraordinary drought-flood cycles: A case study in a South American floodplain lake [J]. Limnologia, 2011, 41(4): 371-381.
- [9] 祝香, 杨雪艳, 刘玉汐, 等. 松辽流域 1961—2017 年极端降水变化特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 199-203, 212.
- [10] 杜华明, 延军平. 四川省气候变化特征与旱涝区域响应[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2491-2500.
- [11] 胡毅鸿, 李景保. 1951—2015 年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 107-115.
- [12] 李丽娟, 王娟, 李海滨. 无定河流域降雨量空间变异性研究[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 434-440.
- [13] 曹永强, 曹阳, 徐丹. 1961—2010 年黄淮海流域旱涝时空变化特征[J]. 资源科学, 2015, 37(10): 2068-2077.
- [14] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1333-1340.
- [15] 王祥荣, 王愿. 全球气候变化与河口城市脆弱性评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-33.
- [17] 刘剑刚. 基于 Z 指数的辽宁省洪涝灾害时空分析[J]. 沈阳师范大学学报: 自然科学版, 2012, 30(3): 409-413.
- [18] 尚可政, 董光荣, 王式功, 等. 我国北方沙区气候变化对全球变暖的响应[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 387-392.
- [19] 延军平. 时间地理学[M]. 西安: 陕西师范大学出版社, 1994.
- [20] 阮楚雯, 杨鑑斌, 李少远. 1954—2017 年连州市高温热浪的特征[J]. 广东气象, 2019, 41(1): 10-13.
- [21] 高艳红. 近 50 年黄河上游流域年均降水与极端降水变化分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 124-135.
- [22] 周梦甜, 李军, 何君, 等. 起伏地形对气温时空分布的影响: 以重庆市为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 346-351.
- [23] 郭超, 楚新正, 张扬, 等. 新疆北疆地区旱涝灾害对气候变化的响应[J]. 西南农业学报, 2019, 32(4): 929-935.
- [24] 唐红玉, 王志伟, 史津梅, 等. PDSI 和 Z 指数在西北干旱监测应用中差异性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(5): 6-11.
- [25] 王俊杰, 拾兵, 巴彦斌. 近 70 年黄河入海沙通量演变特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 57-68.
- [26] 王俊杰, 拾兵, 卢仲翰. 黄河入海径流量周期变化与东亚夏季季风的关系研究[J]. 海洋通报, 2020, 39(3): 316-324.

(上接第 317 页)

- [17] 王伟伟, 杨海龙, 贺康宁, 等. 青海高寒区不同人工林配置下草本群落生态位研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 156-160, 165.
- [18] 靳茗茗, 徐增让, 成升魁. 藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 1-10.
- [19] 张永旺, 王俊, 屈亚潭, 等. 黄土高原植被恢复过程中土壤水分有效性评价[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 79-85.
- [20] 周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同坡向及坡位草本群落生物量及多样性研究[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 67-73.
- [21] 张鑫, 谷会岩, 刘强. 植被自然恢复对表层土壤磷有效性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(7): 75-80.
- [22] 丁威, 王玉冰, 向官海. 小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响[J]. 植物生态学报, 2020, 44(1): 33-43.
- [23] 郑江坤, 宫渊波, 刘金鑫. 岷江上游山地牧道对林下草本群落分布特征的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(2): 1-10.
- [24] Zhang Q, Jia X, Zhao C, et al. Vegetation with artificial plants improves topsoil hydrological properties but intensifies deep-soil drying in northern Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(3): 335-346.
- [25] 李松阳, 余杭, 罗清虎, 等. 灾害干扰受损区自然恢复初期土壤物理性质的变化特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 162-168.
- [26] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 881-889.
- [27] 王晶, 赵文武, 刘月, 等. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3355-3364.
- [28] 万芳, 蒙仲举, 党晓宏, 等. 封育措施下荒漠草原针茅植物—土壤 C, N, P 化学计量特征[J]. 草业学报, 2020, 29(9): 49-55.
- [29] 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): 776-782.
- [30] 郑颖, 温仲明, 宋光, 等. 延河流域森林草原区不同植物功能型适应策略及功能型物种数量随退耕年限的变化[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5834-5845.
- [31] 刘敏, 张潇月, 李晓丽, 等. 黄土高原林下草地对模拟增温的短期响应[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6009-6024.
- [32] 杨玉婷, 石玉林, 李战刚, 等. 陕北“三北”防护林下草本群落特征及其与林分结构和土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6542-6551.
- [33] 海龙, 曾楠, 刘洋, 等. 不同造林模式林下草本植物群落和土壤养分特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2141-2148.
- [34] 郝宝宝, 艾宁, 刘广全, 等. 陕北风沙区不同植被类型土壤养分特征与肥力评价[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2020, 49(5): 678-682.