

DOI: 10.20103/j.stxb.202304240859

韩军,薛焱,杨杰,胡宇,吴芳,何永涛,梁欢欢,晁孝荣,负慧玲,杨倩倩,田福平.保水增肥措施对黄土丘陵区草地植物群落特征及物种多样性的影响.生态学报,2024,44(12):5399-5411.

Han J, Xue T, Yang J, Hu Y, Wu F, He Y T, Liang H H, Chao X R, Yun H L, Yang Q Q, Tian F P. Effects of water retention and fertilization measures on plant community characteristics and species diversity of grassland in Loess Hilly Region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5399-5411.

保水增肥措施对黄土丘陵区草地植物群落特征及物种多样性的影响

韩 军¹, 薛 焱², 杨 杰³, 胡 宇¹, 吴 芳¹, 何永涛¹, 梁欢欢¹, 晁孝荣⁴, 负慧玲⁵, 杨倩倩¹, 田福平^{1,6,*}

1 中国农业科学院兰州畜牧与兽药研究所/农业部兰州黄土高原生态环境重点野外科学观测试验站, 兰州 730050

2 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100086

3 青海省民和回族土族自治县气象局, 海东 810800

4 甘肃小陇山国家级自然保护区管护中心, 天水 741020

5 甘肃省小陇山林业科学研究所, 天水 741022

6 兰州大学生态学院/草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 兰州 730000

摘要:黄土丘陵区年均降水少,蒸发量大,季节性集中降水易造成水土流失,水分和养分亏缺成为限制该区域草地健康持续发展的重要因素。保水剂(super absorbent polymer, SAP)是一类具有快速吸水,缓慢释水特性的高分子聚合物,起到保水保肥改善土壤理化性质的重要作用。施肥是改良退化草地、提高牧草生产力的重要技术措施之一。为研究保水增肥措施对黄土丘陵区草地植物群落特征及多样性的影响,在甘肃省定西市安定区丘陵草地设置不同保水剂(SAP)和氮磷肥(N:尿素,P:过磷酸钙)添加水平(SAP:45、60 kg/hm²和NP:150 kg/hm² N+300 kg/hm² P、250 kg/hm² N+400 kg/hm² P),揭示不同施量保水剂和氮磷肥单施及交互配施对黄土丘陵区草地土壤含水量、群落特征、物种多样性的影响。研究表明:(1)单施45 kg/hm² SAP(T1)显著提高土壤含水量、豆科植物的重要值和地上生物量,有助于提高草地生物量和植物多样性;(2)SAP与NP配施(T7:45 kg/hm² SAP+250 kg/hm² N+400kg/hm² P)或单施NP肥(T3:150 kg/hm² N+300 kg/hm² P)能显著提高植物冠层高度、植被盖度、菊科植物重要值和生物量、群落地上和地下生物量;(3)施用氮磷肥或氮磷肥与保水剂的配施处理除T8(250 kg/hm² N+400kg/hm² P+45 kg/hm² SAP)外其余处理 Simpson 指数、Shannon-wiener 指数及 Pielou 指数有所降低。综上所述,单施适量保水剂在维持草地多样性的同时有利于生产力缓慢增长,保水剂与氮磷肥配施大幅度提高菊科和禾本科植物生物量,进而提高群落生物量,但会导致植物多样性降低。

关键词:黄土丘陵区草地;保水剂;施肥;草地群落特征;物种多样性

Effects of water retention and fertilization measures on plant community characteristics and species diversity of grassland in Loess Hilly Region

HAN Jun¹, XUE Tao², YANG Jie³, HU Yu¹, WU Fang¹, HE Yongtao¹, LIANG Huanhuan¹, CHAO Xiaorong⁴, YUN Huiling⁵, YANG Qianqian¹, TIAN Fuping^{1,6,*}

1 Lanzhou Institute of Husbandry and Pharmaceutical Sciences of Chinese Academy of Agricultural Sciences/Lanzhou Key Field Scientific Observation and Test Station of Ecological Environment of Loess Plateau of the Ministry of Agriculture, Lanzhou 730050, China

2 PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100086, China

基金项目:中国石油天然气股份有限公司规划总院(2021620001000846);金昌居佳生态农业有限公司(金科综 2023-10)

收稿日期:2023-04-24; **网络出版日期:**2024-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tianfp@163.com

3 Meteorological Bureau of Minhe Hui and Tu Autonomous County, Haidong 810800, China

4 Gansu Xiaolongshan National Nature Reserve Management Center, Tianshui 741020, China

5 Xiaolongshan Research Institute of Forest Science and Technology, Tianshui 741022, China

6 College of Ecology, Lanzhou University/State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou 730000, China

Abstract: The average annual precipitation in the hilly area of the Loess Plateau in northwest China is low, and evaporation is high. The concentrated seasonal precipitation easily causes soil and water loss, and the water and nutrient deficit has become an important factor limiting the healthy and sustainable development of grasslands in this region. Fertilization is one of the most important technical measures to improve degraded grasslands and increase forage productivity. Super absorbent polymer (SAP) is a kind of high-molecular polymer with rapid water absorption and slow water release characteristics. It can reduce ineffective water evaporation and soil nutrient loss, and play an important role in improving soil physical and chemical properties. To assess the effects of water retention and fertilization measures on plant community characteristics and diversity in loess hilly grasslands, different levels of super absorbent polymer (SAP), nitrogen and phosphorus (NP) fertilizers (SAP: 45, 60 kg/hm² and NP: 150 kg/hm² urea+300 kg/hm² calcium superphosphate, 250 kg/hm² urea+400 kg/hm² calcium superphosphate) were set in the hilly grassland of Anding District of Dingxi City to investigate the effects of different application rates of SAP and NP fertilizers alone or in combination on soil water content, community characteristics and species diversity in loess hilly grassland. After two years of comparative field study, it can be seen that: (1) Individual application of 45 kg/hm² SAP (T1) significantly increased soil water content, importance value of legumes, aboveground biomass, and contributed to the improvement of grassland biomass and plant diversity; (2) The treatment of SAP combined with NP (T7: 45 kg/hm² SAP+250 kg/hm² N+400 kg/hm² P) or NP fertilizer alone (T3: 150 kg/hm² N+300 kg/hm² P) could significantly increase the importance values and biomass of Asteraceae, plant canopy height, vegetation coverage, above and below ground biomass of the community; (3) The Simpson index, Shannon-Wiener index and Pielou index decreased in the treatment of NP fertilizer or NP fertilizer combined with SAP, except for T8 (45 kg/hm² SAP+150 kg/hm² N+300 kg/hm² P). The interaction of nitrogen and phosphorus additions and SAP may increase canopy height and community coverage, increase competition among plant communities, inhibit the growth of understory plants and subject them to light limitation, and ultimately lead to a reduction in species diversity. In conclusion, the application of moderate amounts of SAP alone is beneficial in maintaining grassland diversity while maintaining slow productivity growth, and the combination of SAP with NP fertilizer significantly increases the biomass of Asteraceae and Gramineae, which in turn increases the community biomass, but leads to a reduction in plant diversity.

Key Words: Loess Hilly Region; super absorbent polymer; fertilization; grassland community characteristics; species diversity

草地是我国畜牧业生产的重要基地,也是世界上分布最广的陆地生态系统,具有净化空气、美化环境、涵养水源、保持水土、维持生物多样性等生态功能。黄土高原地处我国半干旱区向干旱荒漠过渡的地带,草地面积约为 2.32×10^5 km²,占该区域土地总面积的 33%^[1]。由于降水量少且集中,土壤保水能力差,植被覆盖度低,蒸散量高,土壤水分亏缺已成为限制该地区草地生产以及生态恢复的重要原因之一^[2]。水分制约和人类活动干扰,加之“重产出,轻投入”和“透支型”放牧生产方式,使得草地生态系统变得极为脆弱,草地生态系统结构和功能出现退化。

研究表明,施肥是改良退化草地、提高牧草生产力的重要技术措施之一^[3]。外部氮、磷输入会直接改变土壤养分含量及其有效性,土壤养分对植物的生长发育、植被的群落结构与功能、物种多样性、草地生产力及其变化等均存在多方面的影响^[4-6]。Rennenber 等^[7-10]的研究报道,养分添加可以显著促进净初级生产力,但养分富集可能导致植物多样性的下降^[11],也有研究表明,养分添加对成熟群落与退化群落的影响存在显著

差异,在退化群落连续 4 年添加养分显著提高了群落生产力,但植物多样性没有显著变化^[6]。草地群落优势物种决定着群落的外部表现和生态功能特征,不同优势物种的功能性状对养分添加的响应具有较大差异^[12]。菊科和禾草类植物对氮素添加反应较为敏感,促进地上生物量和盖度增加^[10,13],但长期单独施氮具有酸化土壤、造成阳离子淋失的潜在危害^[14]。在内蒙古典型草原,氮沉降促进了多年生禾草和一年生植物的生长,抑制了多年生杂类草的生长^[15]。磷在黄土高原天然草地的限制机理尚未清楚,仅有部分研究表明施用磷肥能增加不同草地类型克氏针茅的地上生物量,但对草地植物群落无显著影响,而莎草和杂类草植物具有更高的磷利用效率^[16]。氮、磷合理配施有利于养分元素平衡,显著的协同作用能提高轻度退化草地植物群落盖度和生产力^[17]。

保水剂(super absorbent polymer, SAP)是一类具有快速吸水,缓慢释水特性的高分子聚合物,能在植物根际形成微型库,起到保水保肥改变土壤理化性质的重要作用。施用保水剂能减少土壤水分的无效蒸发与渗漏,改良团粒结构,减少肥料损失,显著增强植物的光合速率和水分利用效率^[18]。水分是影响植物生长的关键因素,水分亏缺会影响植物的生长和代谢,其生长量和生长状态是反映植物抗旱性的重要指标^[19]。保水剂能充分发挥其快速吸水缓慢释水的特性在降水充沛时汲取多余水分,在干旱少雨时向周边土壤释放水分从而提高土壤水分有效性,有效缓解水分亏缺对植物生长的抑制作用^[20],尤其在植物生长早期,对浅根植物的缓解作用更明显^[21]。黄土高原地区由于水分限制和淋溶损失导致该区域土壤养分有效性较低^[22],保水剂通过改善土壤的孔隙率和持水能力减少土壤中的氮淋失损失^[23],另外保水剂通过增加牧草的株高、分蘖数和单株鲜草质量,从而提高鲜草产量^[24]。李涵聪^[25]在典型草原的研究发现,以保水剂和有机肥为主要材料制作的防蒸剂能降低土壤容重,增加饱和、田间和毛管持水量,提高群落多样性指数、均匀度指数和丰富度指数,对于旱半干旱区典型草原土壤和植被的改善效果显著。

草地是可更新资源,科学的管理可以使草地畜牧业发展和草地生态系统保护协调并进,并引导草地资源利用向可持续方向发展,疏于管理或管理不善会使草地生态系统走向衰退^[26]。黄土丘陵区草地土壤保水、持水性能差,养分含量低,因而提高土壤水肥有效性是黄土丘陵区植被恢复与草地可持续发展的重要途径。近年来,针对黄土丘陵区退化草地撂荒年限和坡向对灌丛生物量及丰富度的影响^[27]、撂荒草地群落生物量与土壤养分之间的交互效应^[28]、优势植物功能性状对撂荒草地氮磷添加的响应^[29]、植物适应策略变化^[30]等方面进行了较多研究,但通过保水剂与氮磷配施来探究水分与养分变化对草地群落结构与植物物种多样性影响的研究较少,对于理解黄土丘陵区不同功能类群植物对土壤水肥有效性的响应尚有待深入研究。为此,本研究以甘肃省定西市香泉镇黄土高原丘陵沟壑区草地为研究对象,综合划破草皮、养分添加以及施用保水剂等 3 种措施,研究单一措施以及交互措施在草地恢复过程中对草地生物量和草地植物多样性的影响,以期获得更为合理的黄土高原丘陵沟壑草地保水增肥方案。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省定西市安定区香泉镇泉湾村(104°52'22"E, 35°35'84"N),地处黄土高原西部边缘和西秦岭末端向青藏高原的过渡地带,属于典型的半干旱黄土高原丘陵沟壑区,海拔 2462 m。属中温带半干旱大陆性气候,年平均气温 6.90℃,年均降水量 400 mm,主要集中在 7—9 月,且多数降雨以暴雨形式降落,2022 年 1 月至 2023 年 9 月降水如图 1 所示。年蒸发量 1478.8 mm,生长期年平均 93 d。土壤以黑垆土为主,土壤理化性质情况见表 1。2021 年 8 月进行植被调查,主要调查了植被盖度、高度、群落物种组成并统计了重要值,样地基本概况如表 2 所示。

1.2 材料与方法

氮肥(含氮 46%的尿素)、磷肥(含 18%P₂O₅的过磷酸钙)、施可润农林保水剂(规格 0.18—2.00 mm,吸水倍率 300—400 倍,白色颗粒状固体,吸水膨大后呈无色凝胶状)。试验将选取植被均匀、地势较平坦的围封禁

牧天然草地,采用野外对比试验,以不施 SAP 和氮磷肥为空白对照 CK₀,分别设置 SAP、氮磷肥单施及其复配 8 个处理(表 3)。于 2022 年 5 月 1 日将不同用量的 SAP 和氮磷肥一次性沟施,2023 年仅施氮肥,于 5 月 5 日在降雨前将各处理对应用量的氮肥进行撒施。由于氮磷肥和 SAP 首次施用需划破草皮,为减少划破草皮对实验结果的影响,特设置不施 SAP 和氮磷肥仅划破草皮作为划破对照 CK₁,每个处理和对照 3 次重复,共 30 个试验小区,小区面积 4 m×5 m=20 m²,各处理间设 1 m 隔离带,重复区间分别设 1 m 隔离带。尽量减少坡度不同导致降水分布不均的影响,按照试验地及周边环境的坡度梯度横向开沟,每条沟相隔 50 cm,宽约 10 cm,深为 15 cm。

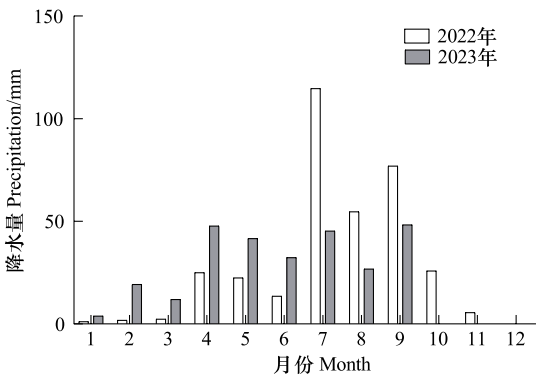


图 1 实验区降水
Fig.1 The precipitation of study area

表 1 样地土壤理化性质概况
Table 1 Physicochemical properties of soil samples

pH	有机质 Organic matter/ (g/kg)	全氮 Total nitrogen/ (g/kg)	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen/ (mg/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	有效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	全钾 Soil total potassium/ (g/kg)	速效钾 Rapidly available potassium/ (mg/kg)
7.96	52.9	2.97	254.0	0.7	7.68	17.2	158.0

表 2 调查样地基本概况
Table 2 The basic situation of sample site

植物类群 Plant groups	平均高度 Average height/cm	分盖度 Coverage/%	重要值 Importance values	植物组成 Plant composition
菊科 Compositae	29.4	45	1.425	铁杆蒿 (<i>Artemisia sacrorum</i>)、箭叶橐吾 (<i>Ligularia sagitta</i>)、麻花头 (<i>Serratula centauroides</i>) 火绒草 (<i>Leontopodium leontopodioides</i>)、紫菀 (<i>Aster tataricus</i>)。
禾本科 Gramineae	34.3	32	0.793	本氏针茅 (<i>Stipa capillata</i>)、短柄草 (<i>Brachypodium sylvaticum</i>)、异燕麦 (<i>Helictotrichon schellianum</i>)、披碱草 (<i>Elymus dahuricus</i>)。
豆科 Leguminosae	17.6	2	0.178	花苜蓿 (<i>Medicago ruthenica</i>)、山野豌豆 (<i>Vicia amoena</i>)、歪头菜 (<i>Vicia unijuga</i>)、二色棘豆 (<i>Oxytropis bicolor Bunge</i>)。
杂类草 Forbs	23.2	15	0.604	大火草 (<i>Anemone tomentosa</i>)、二裂委陵菜 (<i>Potentilla bifurca</i>)、高山唐松草 (<i>Thalictrum alpinum</i>)、牻牛儿苗 (<i>Erodium stephanianum</i>)、狼毒 (<i>Stellera chamaejasme</i>)、老鹳草 (<i>Geranium wilfordii Maxim.</i>)。

1.3 测定项目

- (1)土壤含水量测定:分别于 2022 年和 2023 年集中降水来临前的 6 月份和集中降水后的 9 月份采用土钻法分层采集 0—30 cm 土壤样品,每实验小区 3 个采样点,采集 9 份土壤样品,30 个小区共计 270 份土壤样品。采用烘干法(105 ℃)测定土壤质量含水量。
- (2)群落物种组成:于 2022 年至 2023 年 9 月上旬草地植被生长旺盛的时期进行调查。在处理小区选择地势相对平坦、植物长势均匀的区域,设置 3 个小样方(1 m×1 m)在每个样方内随机测量 20 株植物高度,求平均值作为样方冠层高度,将样方冠层高度平均作为样地冠层高度,再记录植物种密度、频度等生长状况。
- (3)地上生物量调查:用收获法将 1 m²植物齐地面分物种剪下后装入信封袋带回实验室称其鲜重,采用烘干法在 105 ℃杀青 30 min,继续于 75 ℃恒温箱烘干 24 h,烘干后称其干重并记录地上生物量。将采集的样

品根据物种在群落中的优势度和生活型把植物分为禾本科、菊科、豆科和杂草类 4 种功能群。

(4) 地下生物量调查:在取完地上部样方中用直径 8 cm 的根钻取至 40 cm 深度的土壤,每个样方重复取 3 钻。将样品中的土壤、石块及其他杂物去掉后放入 100 目网袋中清洗植物根系,将洗净的根系放在烘箱 80 ℃ 下烘干,得到地下部分干重。

表 3 实验设计与处理

Table 3 Experimental design and treatment

处理 Treatment	保水剂施用量 Application amount of super absorbent polymer/(kg/hm ²)	尿素 Urea(N,46%)		过磷酸钙 Superphosphate(P ₂ O ₅ ,18%)	
		施用量 Application amount/ (kg/hm ²)	有效养分含量 Available nutrient content/(kg/hm ²)	施用量 Application amount/ (kg/hm ²)	有效养分含量 Available nutrient content/(kg/hm ²)
T1	45	0	0	0	0
T2	60	0	0	0	0
T3	0	150	69	300	54
T4	0	250	115	400	72
T5	60	250	115	400	72
T6	60	150	69	300	54
T7	45	250	115	400	72
T8	45	150	69	300	54
CK0	0	0	0	0	0
CK1	0	0	0	0	0

1.4 数据处理

1.4.1 物种重要值

草地群落的重要值计算方法如下:

$$IV = RFE + RCO + RHI \quad (1)$$

式中, IV 为重要值, RFE 为相对频度, RCO 为相对盖度, RHI 为相对高度。

$$RFE = \frac{F_i}{\sum F_i}; \quad RCO = \frac{C_i}{\sum C_i}; \quad RHI = \frac{H_i}{\sum H_i} \quad (2)$$

式中, F_i 为某物种的频度, $\sum F_i$ 为所有物种的总频度; C_i 为某物种的盖度(m²), $\sum C_i$ 为所有物种盖度之和(m²); H_i 为某种植物种群的高度(m), $\sum H_i$ 样方中所有植物高度之和(m)。

1.4.2 物种多样性指数

本研究中物种丰富度用 1 m² 样方内出现的物种数表示,即物种丰富度指数等于出现在 1 m² 样方内的物种数。采用多样性指数 Simpson 指数, Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数进行多样性的测定,其计算公式如下:

$$\text{Simpson 指数} = 1 - \sum p_i^2 \quad (3)$$

$$\text{Shannon-Weiner 指数} = - \sum p_i \ln p_i \quad (4)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数} = \frac{(- \sum p_i \ln p_i)}{\ln s} \quad (5)$$

式中, P_i 为样方中第 i 种在群落中所占的比例。 S 为种 i 所在样方的物种总数。

利用 Excel 2016 软件对各样方数据进行初步整理,采用 SPSS 27.0 软件中的 ANOVA 过程进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 为差异显著,利用 GraphPad Prism 8 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 保水增肥措施对土壤含水量和植被特征的影响

2.1.1 土壤含水量

土壤含水量随季节降水量变化差异显著,6 月和 9 月不同土壤层水分含量如图 2 所示。从整体上讲,划破草皮的对照 CK_1 与其他划破草皮的对照其土壤含水量均比空白对照 CK_0 高,施用保水剂处理其土壤含水量高于不施处理,但其显著性略有差异。保水剂单施能显著提高土壤含水量,尤其在 2022 年 6 月和 2023 年降水较少时,单施较多保水剂 (T2) 处理 10—20 cm 土壤层含水量较对照 CK_0 显著 ($P<0.05$) 增加 28.1%—45.5%,但对 20—30 cm 土壤层含水量的影响与少施处理差异并不显著。在降水较为充足时,T1 处理能使 10—20 cm 土壤层中的含水量较对照增加 28.1%,且差异显著 ($P<0.05$)。保水剂与氮磷肥配施时,少量保水剂与氮磷肥的配施 (T7 和 T8) 处理 10—20 cm 土壤含水量分别较对照 CK_0 显著提高 23.7%—44.0%、18.6%—55.5%,20—30 cm 土壤含水量分别较对照 CK_0 显著提高 17.3%—35.4%、18.6%—31.9%,且差异显著 ($P<0.05$)。

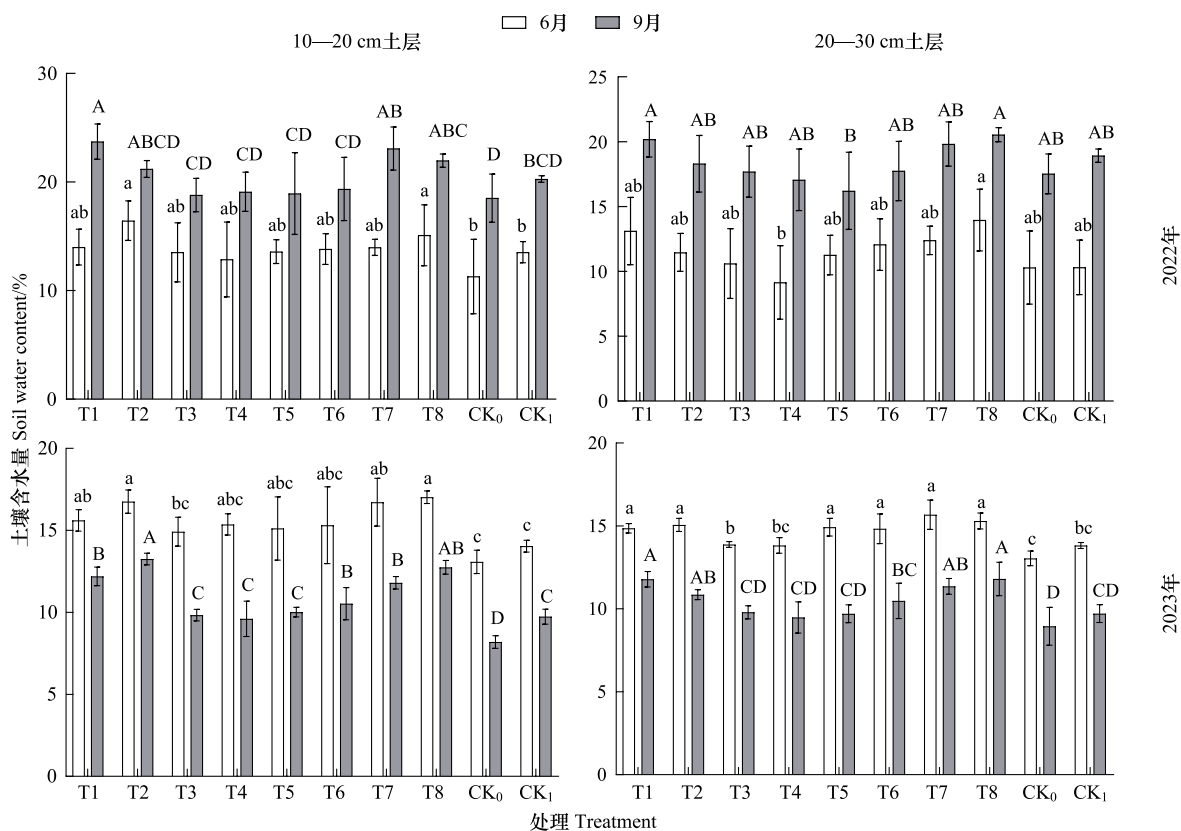


图2 保水增肥措施对土壤含水量的影响

Fig.2 Effects of water retention and fertilization measures on soil water content

T1:45 kg/hm²保水剂;T2:60 kg/hm²保水剂;T3:150 kg/hm²尿素+300 kg/hm²过磷酸钙;T4:250 kg/hm²尿素+400 kg/hm²过磷酸钙;T5:60 kg/hm²保水剂+250 kg/hm²尿素+400 kg/hm²过磷酸钙;T6:60 kg/hm²保水剂+150 kg/hm²尿素+300 kg/hm²过磷酸钙;T7:45 kg/hm²保水剂+250 kg/hm²尿素+400 kg/hm²过磷酸钙;T8:45 kg/hm²保水剂+150 kg/hm²尿素+300 kg/hm²过磷酸钙;CK₀:空白对照;CK₁:划破草皮对照;下同。不同小写字母表示 6 月份各处理间土壤含水量差异显著,不同大写字母表示 9 月份各处理间土壤含水量差异显著 ($P<0.05$)。

2.1.2 冠层高度和植被盖度

由于 2023 年降水量相对与 2022 年有所减少,由图 3 可知,各实验处理冠层高度和植被盖度较 2022 年存

在不同程度下降。然而,草地植物冠层高度均在 T3 (150 kg/hm²N+300 kg/hm²P) 处理时达到最大,分别为 44.9 cm 和 35.5 cm,较空白对照 CK₀ 分别显著提高 39.4%、34.7%。T8 (150 kg/hm²N+300 kg/hm²P+45 kg/hm²SAP) 处理次之,冠层高度分别为 42.7 cm、32.4 cm,较空白对照 CK₀ 分别提高 32.5%、22.8%,且差异显著。植被盖度在 T7 (250 kg/hm²N+400 kg/hm²P+45 kg/hm²SAP) 处理时达到最大,较对照 CK₀ 分别显著提高 21.1%、27.0%。T3 处理次之,分别较对照 CK₀ 显著提高 19.3%、21.0%。单施保水剂 T1 处理使草地植物冠层高度较 CK₀ 分别提高 13.6%、4.8%,盖度较 CK₀ 分别提高 4.2%、12.4%。施用氮磷肥对草地盖度的影响比较显著,氮磷肥无论单施或与保水剂配合施用均能有效提高草地盖度。

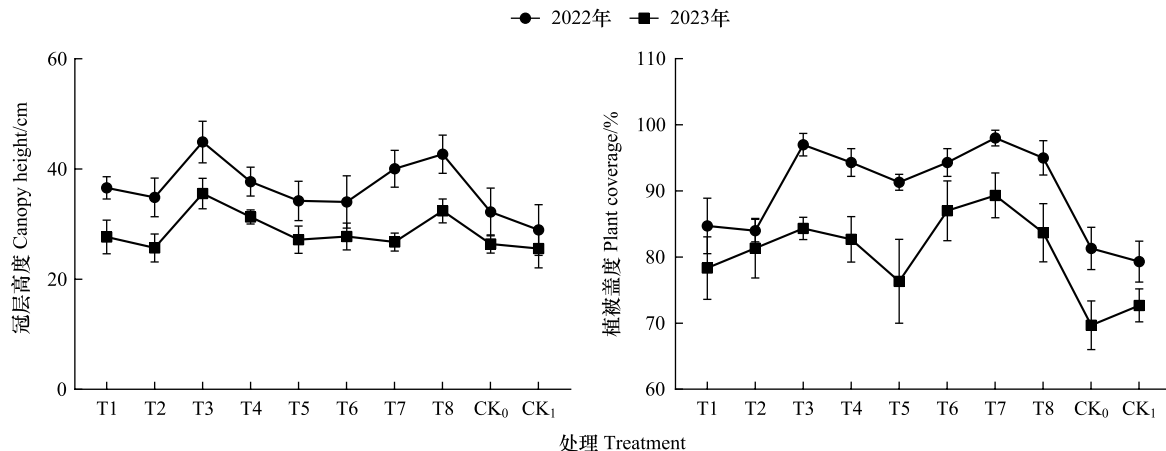


图3 保水增肥措施对冠层高度、植被盖度的影响

Fig.3 Effects of water retention and fertilization measures on canopy height and vegetation coverage

2.2 保水增肥措施对草地植物生物量的影响

2.2.1 地上生物量

保水剂和氮磷肥的单施与配施处理对不同植物类群地上生物量的影响不同。由表4可知,由于降水减少2023年不同类群植物除禾草外,其他类群植物地上生物量较2022年均有所降低,但菊科和禾草类植物在地上生物量组成中仍占有较大比重。两年实验结果得知,T7 (250 kg/hm²N+400 kg/hm²P+45 kg/hm²SAP) 处理均使群落地上生物量达到最大,分别较对照 CK₀ 显著增加 133.6%、56.9%。T3 (150 kg/hm²N+300 kg/hm²P) 处理次之,分别较对照 CK₀ 增加 102.2%、46.8%,且差异显著。施用氮磷肥对禾草类植物影响较大,且随着降水减少禾草类植物地上生物量有增加趋势。T4 处理禾本科植物地上生物量较 CK₀ 分别提高 33.3%、38.1%,且差异显著。T7 处理在 2022 年使禾本科植物地上生物量较 CK₀ 提高 17.6%,但在 2023 年较 CK₀ 显著提高 58.9%。保水剂单施(T1)处理显著提高了豆科植物地上生物量,较空白对照 CK₀ 分别增加 62.5%、141.7%。单施氮磷肥降低了豆科植物地上生物量,单施氮磷肥或保水剂能提高杂草类植物地上生物量。

2.2.2 地下生物量

由表5可知,2023年各处理地下生物量较2022年有所增加,不同保水增肥措施对根系主要分布层(0—10 cm)的地下生物量有显著影响。划破草皮对照 CK₁ 其0—30 cm 土层地下生物量2022年较空白对照 CK₀ 增加 15.4%,2023年较对照 CK₀ 增加 4.4%。单施保水剂时,少量施用(T1)处理0—30 cm 土层地下生物量较对照 CK₀ 分别提高 53.4%、29.4%。氮磷肥单施时,少量施用(T3)处理0—30 cm 土层植物地下生物量分别较对照 CK₀ 显著提高 79.5%、50.0%。保水剂与氮磷肥配施时,T7 处理0—30 cm 土层地下生物量分别较对照 CK₀ 显著提高 76.9%、75.0%,比单施保水剂 T1 处理分别提高 15.4%、35.2%,比单施氮磷肥的 T4 处理分别提高 32.4%、22.2%。

表 4 保水增肥措施对不同植物类群地上生物量的影响/(kg/m²)

Table 4 Effects of water retention and fertilization measures on aboveground biomass of different plant groups

年份 Year	处理 Treatment	菊科 Compositae	禾本科 Gramineae	豆科 Leguminosae	杂类草 Forbs	群落 Community
2022	T1	0.411±0.106de	0.129±0.029bc	0.026±0.000a	0.048±0.009a	0.614±0.067de
	T2	0.392±0.059e	0.127±0.024bc	0.018±0.002ab	0.054±0.013a	0.592±0.081de
	T3	0.957±0.229ab	0.170±0.055abc	0.006±0.001c	0.046±0.001a	1.179±0.164ab
	T4	0.743±0.175bc	0.196±0.072ab	0.010±0.003abc	0.052±0.009a	1.001±0.355bc
	T5	0.726±0.207bcd	0.244±0.005a	0.015±0.004abc	0.025±0.003ab	1.010±0.201bc
	T6	0.595±0.250cde	0.159±0.065abc	0.015±0.005abc	0.024±0.005ab	0.794±0.250cd
	T7	1.148±0.101a	0.172±0.035abc	0.019±0.002ab	0.023±0.006ab	1.362±0.118a
	T8	0.655±0.103bcde	0.098±0.023c	0.008±0.001bc	0.032±0.008ab	0.797±0.192cd
	CK0	0.385±0.103e	0.147±0.037bc	0.016±0.003ab	0.035±0.004ab	0.583±0.159de
	CK1	0.366±0.045e	0.093±0.031c	0.012±0.009abc	0.008±0.006b	0.489±0.073e
	CK1	0.366±0.045e	0.093±0.031c	0.012±0.009abc	0.008±0.006b	0.489±0.073e
2023	T1	0.261±0.067cd	0.254±0.041c	0.029±0.005a	0.037±0.002bc	0.560±0.087de
	T2	0.218±0.023d	0.277±0.014bc	0.010±0.003bc	0.036±0.010bcd	0.541±0.017de
	T3	0.361±0.041ab	0.344±0.030a	0.011±0.004bc	0.041±0.013b	0.756±0.016ab
	T4	0.345±0.043ab	0.326±0.017ab	0.008±0.002bc	0.051±0.017ab	0.735±0.019bc
	T5	0.344±0.020ab	0.217±0.037c	0.013±0.004b	0.011±0.006e	0.584±0.048d
	T6	0.274±0.028c	0.268±0.065bc	0.025±0.001a	0.016±0.004de	0.583±0.044d
	T7	0.397±0.009a	0.375±0.053a	0.018±0.002a	0.016±0.007cde	0.808±0.051a
	T8	0.383±0.004ab	0.217±0.057c	0.020±0.006a	0.064±0.036a	0.683±0.086c
	CK0	0.258±0.050cd	0.236±0.035c	0.012±0.001c	0.017±0.004cde	0.515±0.037e
	CK1	0.332±0.009b	0.146±0.027d	0.013±0.003b	0.013±0.007e	0.505±0.039e
	CK1	0.332±0.009b	0.146±0.027d	0.013±0.003b	0.013±0.007e	0.505±0.039e

同列不同字母表示各处理差异显著 ($P<0.05$)

表 5 保水增肥措施对不同土层地下生物量的影响/(kg/m²)

Table 5 Effects of water retention and fertilization measures on underground biomass in different soil depth

年份 Years	处理 Treatment	土层 Soil depth/cm			
		0—10	10—20	20—30	0—30
2022	T1	1.88±0.60ab	0.46±0.19a	0.06±0.01b	2.39±0.61ab
	T2	1.81±0.79ab	0.34±0.24a	0.03±0.01b	2.18±0.81ab
	T3	2.28±1.26a	0.45±0.24a	0.08±0.03b	2.80±1.44a
	T4	1.78±0.69ab	0.30±0.16a	0.00±0.00b	2.08±0.73ab
	T5	1.55±0.53ab	0.34±0.26a	0.10±0.01b	1.99±0.71ab
	T6	1.57±0.69ab	0.41±0.35a	0.07±0.01b	2.05±1.11ab
	T7	2.30±1.24a	0.38±0.25a	0.08±0.01b	2.76±1.44a
	T8	1.95±0.74ab	0.44±0.25a	0.22±0.19a	2.61±0.84a
	CK0	1.20±0.25b	0.36±0.14a	0.00±0.00b	1.56±0.28b
	CK1	1.48±0.66ab	0.32±0.16a	0.00±0.00b	1.80±0.79ab
	CK1	1.48±0.66ab	0.32±0.16a	0.00±0.00b	1.80±0.79ab
2023	T1	1.86±0.26c	0.60±0.05b	0.18±0.07a	2.64±0.20de
	T2	2.03±0.38bc	0.59±0.09b	0.00±0.00b	2.62±0.30de
	T3	2.25±0.09ab	0.73±0.10b	0.08±0.02ab	3.06±0.04bcd
	T4	2.50±0.43ab	0.39±0.08c	0.02±0.01b	2.92±0.37cde
	T5	2.44±0.30ab	0.33±0.09c	0.00±0.00b	2.76±0.31cde
	T6	2.63±0.35a	0.58±0.04b	0.03±0.01b	3.24±0.30abc
	T7	2.50±0.11ab	1.05±0.20a	0.016±0.0a	3.57±0.11a
	T8	2.60±0.23a	0.63±0.07b	0.20±0.04a	3.44±0.31ab
	CK0	1.68±0.13c	0.33±0.10c	0.02±0.01b	2.04±0.21f
	CK1	1.63±0.36c	0.33±0.10c	0.16±0.08a	2.13±0.34f
	CK1	1.63±0.36c	0.33±0.10c	0.16±0.08a	2.13±0.34f

2.3 保水增肥措施对植物相对重要值和多样性的影响

2.3.1 重要值

由表 6 可知,保水增肥措施使不同类群植物的重要值发生了改变,2023 年除空白对照 CK_0 外其他处理菊科植物重要值较 2022 年均有所下降,禾本科植物重要值有逐渐增加趋势。除 T3、T4、T5 处理和划破对照 CK_1 外,其余处理豆科植物重要值较 2022 年均有所增加。单施保水剂 T1 ($45\text{ kg/hm}^2\text{SAP}$) 处理两年间使豆科植物的重要值较 CK_0 分别增加 246.2%、179.8%。单施氮磷肥使禾本科重要值提高,杂草类植物的重要值下降,其中 T4 处理使禾本科植物重要值较对照 CK_0 分别增加 14.7%、58.1%,杂草类植物重要值较对照 CK_0 分别降低 59.7%、38.7%。保水剂与氮磷肥配施时,T5、T6、T7、T8 处理两年间豆科植物重要值较 CK_0 均有增加,杂草类植物重要值均有下降,但各处理间差异并不显著。与单施保水剂和氮磷肥的处理相比,等量保水剂和氮磷肥的配施一方面补充了植物对于水肥条件的需求使养分得到缓慢释放,另一方面降低了人为活动对于种群结构急剧影响,保护物种多样性使其结构功能不因外界环境干扰而发生变化。

表 6 保水增肥措施对草地重要值的影响

Table 6 Effects of water retention and fertilization measures on importance values of grassland

年份 Year	处理 Treatment	菊科 Compositae	禾本科 Gramineae	豆科 Leguminosae	杂类草 Forbs
2022	T1	1.45±0.30a	0.62±0.18a	0.45±0.20a	0.48±0.23ab
	T2	1.39±0.24a	0.70±0.10a	0.35±0.04ab	0.56±0.04ab
	T3	1.33±0.0.51a	0.76±0.23a	0.33±0.16ab	0.58±0.18ab
	T4	1.69±0.17a	0.86±0.28a	0.21±0.02ab	0.25±0.16b
	T5	1.58±0.25a	0.57±0.10a	0.30±0.07ab	0.56±0.14ab
	T6	1.52±0.10a	0.68±0.19a	0.33±0.16ab	0.47±0.19ab
	T7	1.69±0.46a	0.59±0.30a	0.22±0.05ab	0.50±0.23ab
	T8	1.64±0.28a	0.63±0.11a	0.21±0.08ab	0.53±0.32ab
	CK_0	1.19±0.18a	0.75±0.05a	0.13±0.02b	0.62±0.36a
	CK_1	1.73±0.17a	0.73±0.18a	0.24±0.05ab	0.29±0.21ab
2023	T1	1.16±0.22a	0.96±0.19a	0.47±0.13a	0.41±0.24b
	T2	0.94±0.34a	1.29±0.13a	0.31±0.03bc	0.46±0.22ab
	T3	1.24±0.33a	1.10±0.21a	0.27±0.043cd	0.39±0.16b
	T4	1.06±0.17a	1.44±0.18a	0.14±0.08d	0.36±0.06b
	T5	1.20±0.36a	1.10±0.32a	0.30±0.05bc	0.40±0.09b
	T6	1.18±0.30a	1.00±0.26a	0.38±0.04b	0.45±0.19ab
	T7	1.08±0.24a	1.23±0.45a	0.24±0.11cd	0.45±0.10ab
	T8	1.28±0.21a	0.88±0.14a	0.27±0.05bc	0.57±0.14ab
	CK_0	1.34±0.17a	0.91±0.29a	0.17±0.07cd	0.58±0.05ab
	CK_1	1.31±0.35a	0.98±0.30a	0.23±0.16cd	0.49±0.16b

2.3.2 草地植物物种多样性

草地植物多样性既能反映一定区域内物种的丰富程度,也能反映物种对具体生境的适应。由表 7 可知,与空白对照 CK_0 和划破草皮对照 CK_1 相比,2022 年和 2023 年各保水增肥处理物种数均有增加,但植物多样性指数变化各有差异。保水剂单施时,T1 处理物种数、个体数、物种优势度指数 Simpson、物种多样性指数 Shannon-wiener 及物种均匀度指数 Pielou 两年间均高于对照 CK_0 。单施氮磷肥,不论施多还是施少,Simpson 指数、Shannon-wiener 指数及 Pielou 指数两年都低于空白对照 CK_0 。T4 处理植物个体数较对照 CK_0 分别增加 22.5%、38.0%,但优势度指数 Simpson 分别显著降低 18.4%、6.85%,Shannon-wiener 指数分别降低 19.2%、7.4%,Pielou 指数分别降低 19.2%、5.6%。保水剂与氮磷肥配施时,少量氮磷肥与保水剂的配施 T8 处理 Simpson 指数和 Shannon-wiener 指数两年均高于对照 CK_0 ,仅 Pielou 指数与对照 CK_0 无显著差异。由此可表明

单施氮磷肥处理(T3、T4)不利于黄土丘陵沟壑区对草地物种多样性、优势度和均匀度维持,T1 和 T8 处理更有利于维持并提高草地植物物种多样性。

表 7 保水增肥措施对草地植物物种多样性的影响

Table 7 Effects of water retention and fertilization measures on grassland plant species diversity

年份 Year	处理 Treatment	物种数 Species	个体数 Individual number	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Weiner 指数 Shannon-Weiner index	Pielou 指数 Pielou index
2022	T1	18	360±55a	0.80±0.08a	1.88±0.32ab	0.81±0.05a
	T2	16	298±35a	0.80±0.05a	1.82±0.21ab	0.79±0.10ab
	T3	20	362±109a	0.70±0.04ab	1.60±0.12bc	0.70±0.05abc
	T4	16	387±35a	0.62±0.17b	1.35±0.30c	0.63±0.19c
	T5	18	292±34a	0.73±0.05ab	1.64±0.12abc	0.74±0.08abc
	T6	22	325±47a	0.74±0.04ab	1.60±0.14ab	0.73±0.06abc
	T7	19	356±164a	0.67±0.14ab	1.52±0.41bc	0.64±0.13bc
	T8	22	324±143a	0.80±0.04a	2.00±0.12a	0.77±0.04abc
	CK0	15	316±176a	0.76±0.07a	1.67±0.24abc	0.78±0.11abc
	CK1	14	268±43a	0.68±0.04ab	1.51±0.11bc	0.68±0.001abc
2023	T1	18	367±94bcd	0.79±0.03ab	1.84±0.13a	0.76±0.01a
	T2	20	346±67bcd	0.67±0.06e	1.55±0.04bc	0.66±0.06d
	T3	18	407±39ab	0.73±0.02cd	1.60±0.04bc	0.69±0.03bcd
	T4	16	410±63ab	0.68±0.02e	1.50±0.06c	0.67±0.05d
	T5	18	285±73d	0.74±0.04bcd	1.60±0.15bc	0.74±0.02ab
	T6	22	405±63ab	0.81±0.04a	1.81±0.04a	0.68±0.02cd
	T7	20	386±13abc	0.72±0.06cde	1.64±0.06b	0.70±0.04bcd
	T8	23	467±28a	0.77±0.02abc	1.82±0.02a	0.72±0.01bcd
	CK0	14	297±20d	0.73±0.02cd	1.62±0.04bc	0.71±0.03bcd
	CK1	15	354±21bcd	0.75±0.01bc	1.57±0.10bc	0.73±0.03abc

3 讨论

3.1 保水增肥措施对土壤含水量、植被特征的影响

黄土高原丘陵沟壑区属干旱半干旱地区,降水量少,土壤保水能力差,季节性集中降水易形成地表径流导致水土严重流失,水资源短缺成为该地区草地生态恢复与生产力发展的重要限制因素^[31]。施用保水剂对草地群落结构的影响主要在于对土壤含水量的调节,国内外众多研究表明施用保水剂可以有效提高植物根际的有效含水量,提高土壤持水能力,使土壤失水过程显著减缓,从而缓解植物干旱胁迫^[24,32–33]。然而,保水剂的施用量应根据当地降水量酌情而定,施用过量的保水剂不仅使保水剂的作用难以得到充分发挥,而且还会与植物根系争夺水分,不利于植物生长。本实验结果表明保水增肥处理对土壤含水量的影响主要在于,一方面划破草皮减少了地表径流使降水能够下渗到一定土壤深度,另一方面适量保水剂提高了土壤持水能力,抑制了土壤水分无效蒸发从而提高了土壤含水量。草地植被特征和生产力变化往往受到土壤水分和养分的共同控制^[31,34],尤其在黄土高原干旱半干旱区,草地植物群落对氮磷添加是否响应很大程度上取决于土壤水分状况。保水剂与氮磷肥配施减少了土壤养分淋失,提高了土壤养分的保蓄和缓释能力,使植物能尽可能多地从土壤中吸收水分和养分。在水分较为充足时,氮磷添加显著提高实验区菊科植物和禾本科植物冠层高度和植被盖度,这与 Ford 等人的研究结果一致^[35–39]。其原因是多年生菊科植物(如铁杆蒿、箭叶橐吾)、禾本科草(如本氏针茅)作为主要建群种,保水增肥措施提高了水肥利用效率增加了优势物种的竞争能力,使其快速占据并填补地上与地下空间的空白区域,获得更多水肥和光资源,加快优势植物生长,进而使植物冠层高度和植被盖度得以显著提升。

3.2 保水增肥措施对植物群落组成和生物量的影响

生物量是间接反映草地生产力的重要依据,也是衡量草原生态的主要指标。Xu 等^[40]在天然草地多年的植物地上生物量监测数据表明,单独增水或氮磷水共同添加均能显著提高地上生物量。经两年保水增肥实验表明,单施保水剂(T1)处理使草地群落地上生物量较空白对照 CK₀分别增加 5.3%、8.7%,单施氮磷(T3)处理较对照 CK₀分别显著增加 95.4%、33.9%,经保水剂与氮磷肥配施(T7)处理群落地上生物量两年间均达到最大,较对照 CK₀分别显著增加 125.6%、56.9%。尽管 T7 处理后菊科、禾本科、豆科植物地上生物量较对照 CK₀都有所增加,但不同年份,不同功能类群植物增加量不一致。2022 年试验地降水较为充足,菊科植物增加量最高,较对照 CK₀增加 198.2%,豆科植物次之,增加 18.75%,禾本科植物增加量为 17.6%,杂草类植物地上生物量下降 34.3%。2023 年试验地降水较少,禾本科植物增加量达到最大,较对照 CK₀增加 58.9%,菊科植物次之,增加 53.9%,豆科植物增加量为 50%,杂草类植物生物量较对照 CK₀略有下降。可能原因是菊科和禾本植物对光照、水分以及养分利用效率高于其他类群植物,而杂草类植物在资源获取中处于劣势,其生存空间不断被挤压,甚至逐渐从群落中消失。其最直接的表现是不同类群地上生物量和重要值的变化,经 T7 处理后菊科和禾本科植物的生物量在显著增加,两者的重要值在群落中占主导地位,而杂草类植物的重要值和地上生物量均在下降。保水增肥措施不仅解除了土壤养分和水分限制,水分与氮素存在互作效应,水分增加有助于氮肥肥效被植物更好利用^[41]。豆科和杂草类植物虽不具备菊科植物同等竞争优势,但在水分和养分较为充足时迅速生长在冠层高度上占据一定优势。保水增肥措施通过水分有效利用解除了豆科植物水分限制,促进根系发育,磷素添加提高了根瘤菌的固氮酶活性来促进生物固氮过程^[20],从而提高豆科植物的重要值和生物量。保水增肥措施对地下生物量的影响同样显著,单施保水剂处理(T1)在 2022 年和 2023 年使 0—30 cm 土层植物地下生物量较空白对照 CK₀分别提高 56.7%、29.4%,单施氮磷处理(T3)分别较对照 CK₀提高了 79.5%、50.0%,保水剂与氮磷配施处理(T7)分别较对照 CK₀提高了 76.9%、75.0%。草地地下生物量的提高与保水增肥措施对草地盖度和植物冠层高度的影响有密切联系。保水增肥措施一方面提高了植物冠层高度以获得更多的光合产物从而向地下分配,另一方面植被盖度的增加补充了土壤中的空缺,致使 0—10 cm 土壤层中的根生物量大幅度增加。

3.3 保水增肥措施对植物多样性的影响

植物群落物种多样性受水、肥、光照等多重因素的影响^[42],较高的物种多样性有利于草地生态系统长期稳定健康发展。水分是影响植物生长的关键因素^[43—45],国内外众多研究表明增水显著改善草地植物群落组成,提高了群落稳定性,对于加快半干旱区退化草地的恢复具有显著的作用^[44,46]。本实验表明,单施保水剂(T1)处理使 10—20 cm 土壤层含水量较对照提高 28.1%,物种数、个体数、Simpson 指数、Shannon-wiener 指数及 Pielou 指数较空白对照 CK₀均有不同程度增加。土壤水分含量提高可以有效缓解水分亏缺对植物生长的抑制作用,尤其对浅根植物^[21]的缓解作用更明显,增水不但提高了物种迁入速率和功能群数量,而且降低物种的丧失速率^[43],从而提高物种多样性,这与本研究中施用适量保水剂后物种数和多样性指数增加结果相似。多数研究认为,氮磷增加会使草地物种丧失^[44]、降低物种多样性^[45—47],也有研究表明适量的氮添加会改善植物组成结构^[48]。然而,本实验结果表明,氮磷添加或大多数氮磷与水的交互作用会降低 Pielou 指数,因为氮磷添加和保水剂的交互作用能增加冠层高度和群落盖度,加剧植物群落间的竞争,抑制底层植物生长使其受到光限制,造成群落中不同功能群植物分配层次不齐,最终导致物种多样性下降,这与 Ren 等^[49—50]研究结果一致。只有少量保水剂与适量氮磷配合(T8)处理下物种数与个体数在增加,物种多样性指数和优势度指数在上升,施用保水剂改善了群落物种组成,提高了群落均匀度,增加了物种多样性,可能是保水剂和氮添加交互作用下,水分增加抵消了氮添加对群落物种多样性的负面影响,物种均匀度未发生显著变化,这与 Yang 等^[51]的研究结果类似。

4 结论

通过在黄土高原丘陵沟壑区草地进行的保水增肥控制实验发现,短期施用保水剂和氮磷肥或氮磷肥与保

水剂配施对黄土区干旱半干旱草地植物冠层高度、植被盖度、植物群落 Pielou 指数、地上与地下生物量具有显著影响。单施保水剂处理(T1)和保水剂与氮磷肥配施处理(T7)均能显著提高土壤含水量,T1 处理显著增加豆科类植物的重要值和地上生物量,提高草地植物多样性。施用氮磷肥处理(T3)和氮磷肥与保水剂配施处理(T7)能显著提高植物冠层高度、植被盖度、地上生物量和地下生物量,降低草地植物多样性。少量保水剂与氮磷肥的配施处理(T8),生物量和物种优势度指数 Simpson 有所增加,物种多样性指数 Shannon-wiener 显著提高,可能是保水剂和氮磷交互作用抵消了氮添加对群落物种多样性的负面影响,物种均匀度指数 Pielou 未发生显著变化。

参考文献(References):

- [1] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [2] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- [3] 宗宁, 石培礼, 牛犇, 蒋婧, 宋明华, 张宪洲, 何永涛. 氮磷配施对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3458-3468.
- [4] 刘玉, 常小峰, 田福平, 刘振恒, 党志强, 武高林. 放牧对草地群落与土壤特征的影响. *西北植物学报*, 2016, 36(12): 2524-2532.
- [5] 刘海威, 张少康, 焦峰. 氮磷添加对不同退耕年限草本植被群落及土壤化学计量特征的影响. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 333-338.
- [6] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, Naeem S, Pan Q M, Huang J H, Zhang L X, Xing G H. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands. *Global Change Biology*, 2010, 16(2): 889.
- [7] Ronnenberg K, Wesche K. Effects of fertilization and irrigation on productivity, plant nutrient contents and soil nutrients in southern Mongolia. *Plant and Soil*, 2011, 340(1): 239-251.
- [8] Tian D S, Wang H, Sun J, Niu S L. Global evidence on nitrogen saturation of terrestrial ecosystem net primary productivity. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(2): 024012.
- [9] You C M, Wu F Z, Gan Y M, Yang W Q, Hu Z M, Xu Z F, Tan B, Liu L, Ni X Y. Grass and forbs respond differently to nitrogen addition: a meta-analysis of global grassland ecosystems. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1563.
- [10] Yang X X, Ren F, Zhou H K, He J S. Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 159-166.
- [11] Hautier Y, Niklaus P A, Hector A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science*, 2009, 324(5927): 636-638.
- [12] 张馨文, 安慧, 刘小平, 文志林, 王波, 杜忠毓. 短期氮添加对荒漠草原植物群落组成及稳定性的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2400-2409.
- [13] 郑婧, 余维维, 白宇轩, 张宇清, 秦树高, 吴斌. 氮素和水分添加对毛乌素沙地油蒿群落优势植物叶片性状的影响. *林业科学*, 2018, 54(10): 164-171.
- [14] Wei C Z, Yu Q, Bai E, Lü X T, Li Q, Xia J Y, Kardol P, Liang W J, Wang Z W, Han X G. Nitrogen deposition weakens plant-microbe interactions in grassland ecosystems. *Global Change Biology*, 2013, 19(12): 3688-3697.
- [15] Xu Z W, Wan S Q, Ren H Y, Han X G, Jiang Y. Influences of land use history and short-term nitrogen addition on community structure in temperate grasslands. *Journal of Arid Environments*, 2012, 87: 103-109.
- [16] 王党军. 退化典型草原对施用磷肥的响应机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [17] 戚智彦, 吕亚香, 刘伟, 孙佳美, 王璟, 潘庆民. 氮磷养分共同添加促进退化典型草原恢复的机制. *应用生态学报*, 2023, 34(1): 75-82.
- [18] 田德龙, 李泽坤, 徐冰, 鲁耀泽. SAP、PAM 复配对于干旱沙化牧区紫花苜蓿生长影响的研究. *节水灌溉*, 2018(6): 12-15.
- [19] 赵铭钦, 赵进恒, 张迪, 韩富根, 张广富, 李元实, 金洪石. 保水剂对烤烟光合特性日变化的影响. *中国农业科学*, 2010, 43(6): 1265-1273.
- [20] Xu Z W, Ren H Y, Cai J P, Wang R Z, Li M H, Wan S Q, Han X G, Lewis B J, Jiang Y. Effects of experimentally-enhanced precipitation and nitrogen on resistance, recovery and resilience of a semi-arid grassland after drought. *Oecologia*, 2014, 176(4): 1187-1197.
- [21] Chen H X, Ma L N, Xin X P, Liu J Y, Wang R Z. Plant community responses to increased precipitation and belowground litter addition: evidence from a 5-year semiarid grassland experiment. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(9): 4587-4597.
- [22] 杨莹博, 易显凤, 刘学录, 年丽丽, 马彪, 李亮亮, 李晓丹. 基于文献计量的草地恢复近二十年研究态势分析. *中国草地学报*, 2021, 43(7): 95-105.
- [23] Malik S, Chaudhary K, Malik A, Punia H, Sewhag M, Berkesia N, Nagora M, Kalia S, Malik K, Kumar D, Kumar P, Kamboj E, Ahlawat V, Kumar A, Boora K. Superabsorbent polymers as a soil amendment for increasing agriculture production with reducing water losses under water stress condition. *Polymers*, 2022, 15(1): 161.
- [24] 李春容, 罗言云, 王倩娜. 不同施肥和土壤保湿处理对康藏高原牧草生长和产量的影响. *西北农业学报*, 2020, 29(7): 990-999.
- [25] 李涵聪. 防蒸剂添加对典型草原土壤和植被的影响研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2023.

- [26] Harris G A. Changing philosophies of rangeland management in the United States. *Journal of Range Management*, 1977, 30(1): 75.
- [27] 杜峰, 梁宗锁, 徐学选, 山仑, 张兴昌. 陕北黄土丘陵区撂荒草地群落生物量及植被土壤养分效应. *生态学报*, 2007, 27(5): 1673-1683.
- [28] 贺启坤, 陈大岭, 李邵宇, 张峰, 孙宇, 郑佳华, 乔莽璐, 张彬, 赵萌莉. 阴山北麓不同恢复年限弃耕地植物群落生物量与土壤养分变化. *中国草地学报*, 2022, 44(10): 30-37.
- [29] 卢笑玥, 赵雪, 徐莉萍, 焦子怡, 王晨枫, 欧阳洪梁, 封伦, 邓健. 氮磷添加对黄土丘陵区撂荒草地优势植物功能性状的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(3): 49-59.
- [30] 曾鸿文, 温仲明, 陶宇, 张静, 朱朵菊. 延河流域 6 种草本植物功能性状变异来源分析. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 364-370.
- [31] Chen Z F, Xiong P F, Zhou J J, Yang Q, Wang Z, Xu B C. Grassland productivity and diversity changes in responses to N and P addition depend primarily on tall clonal and annual species in semiarid Loess Plateau. *Ecological Engineering*, 2020, 145: 105727.
- [32] 李佳岭, 李龙保, 廖宗文, 刘天增, 张巨明. 保水剂施用层次对草坪生长及土壤水肥的影响. *草业学报*, 2014, 23(4): 61-67.
- [33] 殷国梅, 阿拉坦其其格, 刘思博, 那日苏, 魏晓斌, 丁海君, 薛艳林, 白春利, 崔志刚, 张英. 施肥对轻度退化草甸草原割草地植物群落特征的影响. *畜牧与饲料科学*, 2019, 40(11): 53-56.
- [34] Niu D C, Yuan X B, Cease A J, Wen H Y, Zhang C P, Fu H, Elser J J. The impact of nitrogen enrichment on grassland ecosystem stability depends on nitrogen addition level. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1529-1538.
- [35] Ford H, Roberts A, Jones L. Nitrogen and phosphorus co-limitation and grazing moderate nitrogen impacts on plant growth and nutrient cycling in sand dune grassland. *The Science of the Total Environment*, 2016, 542(Pt A): 203-209.
- [36] Hazary M E H. Effect of nitrogen and phosphorus fertilizer on yield and nutritional quality of jumbo grass (*Sorghum* grass x Sudan grass). *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 2015, 3(8): 444-450.
- [37] Ren H Y, Xu Z W, Isbell F, Huang J H, Fang Y T. Exacerbated nitrogen limitation ends transient stimulation of grassland productivity by increased precipitation. *Ecological Monographs*, 2017, 87(3): 457-469.
- [38] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 修伟明, 张贵龙, 皇甫超河, 杨殿林. 氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响. *生态学报*, 2015, 35(19): 6460-6469.
- [39] Ren F, Song W M, Chen L T, Mi Z R, Zhang Z H, Zhu W Y, Zhou H K, Cao G M, He J S. Phosphorus does not alleviate the negative effect of nitrogen enrichment on legume performance in an alpine grassland. *Journal of Plant Ecology*, 2017, 10(5): 822-830.
- [40] Xu Z W, Wan S Q, Zhu G L, Ren H Y, Han X G. The influence of historical land use and water availability on grassland restoration. *Restoration Ecology*, 2010, 18(s1): 217-225.
- [41] Zhong M X, Song J, Zhou Z X, Ru J Y, Zheng M M, Li Y, Hui D F, Wan S Q. Asymmetric responses of plant community structure and composition to precipitation variabilities in a semi-arid steppe. *Oecologia*, 2019, 191(3): 697-708.
- [42] Robertson T R, Zak J C, Tissue D T. Precipitation magnitude and timing differentially affect species richness and plant density in the sotol grassland of the Chihuahuan Desert. *Oecologia*, 2010, 162(1): 185-197.
- [43] Xu Z W, Wan S Q, Ren H Y, Han X G, Li M H, Cheng W X, Jiang Y. Effects of water and nitrogen addition on species turnover in temperate grasslands in Northern China. *PLoS One*, 2012, 7(6): e39762.
- [44] DeMalach N, Zaady E, Kadmon R. Contrasting effects of water and nutrient additions on grassland communities: a global meta - analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(8): 983-992.
- [45] Avolio M L, Koerner S E, La Pierre K J, Wilcox K R, Wilson G W T, Smith M D, Collins S L. Changes in plant community composition, not diversity, during a decade of nitrogen and phosphorus additions drive above-ground productivity in a tallgrass prairie. *Journal of Ecology*, 2014, 102(6): 1649-1660.
- [46] 赵乌英嘎, 红梅, 德海山, 刘鹏飞, 马尚飞, 王文东, 杨殿林. 长期不同施氮水平对草原植物群落结构的影响. *西北植物学报*, 2020, 40(1): 141-149.
- [47] Suding K N, Collins S L, Gough L, Clark C, Cleland E E, Gross K L, Milchunas D G, Pennings S. Functional- and abundance-based mechanisms explain diversity loss due to N fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2005, 102(12): 4387-4392.
- [48] Tang Z S, Deng L, An H, Yan W M, Shanguan Z P. The effect of nitrogen addition on community structure and productivity in grasslands: a meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 31-38.
- [49] Ren Z W, Li Q, Chu C J, Zhao L Q, Zhang J Q, Dexiecuo Ai D A, Yang Y B, Wang G. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(1): 25-31.
- [50] Hooper D U, Johnson L. Nitrogen limitation in dryland ecosystems: responses to geographical and temporal variation in precipitation. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1): 247-293.
- [51] Yang H J, Li Y, Wu M Y, Zhang Z, Li L H, Wan S. Plant community responses to nitrogen addition and increased precipitation: the importance of water availability and species traits. *Global Change Biology*, 2011, 17(9): 2936-2944.