

# 黄土高原刺槐人工林林下植物多样性对 模拟降水变化的响应

邓 强<sup>1,2</sup>, 刘 迪<sup>3,4</sup>, 时新荣<sup>1,4</sup>, 袁志友<sup>1,4</sup>

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 林学院,

陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**气候变化对物种多样性具有重要影响,探究物种多样性对未来气候变化的响应规律是生态学研究的重点之一,但目前关于森林生态系统林下植物多样性对降水变化的响应研究仍然较少。利用野外控制穿透雨试验,观测了 9 个降水梯度处理(减雨 80%,60%,40%,20%和增雨 20%,40%,60%,80%及对照)对黄土高原刺槐人工林林下植物物种组成、群落结构和物种多样性的影响。结果表明:随着降水量的增加,土壤含水量呈增加趋势,减雨 80%处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤含水量分别比对照处理低 23.6%和 16.1%,增雨 80%处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤含水量分别比对照处理高 26.2%和 13.0%。不论降水减少或增加,都提高了蔷薇科和杂类草物种的重要值,但降低了豆科和禾本科物种的重要值,降水量的增加也提高了菊科物种的重要值。降水减少处理降低了物种多样性指数和均匀度指数,减雨 80%和 60%的物种多样性指数和均匀度指数显著低于对照组,而增雨 20%和 40%增加了物种多样性指数和均匀度指数,但增雨 60%和 80%降低了物种多样性指数和均匀度指数,增雨 80%的物种多样性指数和均匀度指数显著低于对照组。群落物种丰富度、多样性和均匀度指数与 0—20 cm 土层土壤含水量呈显著正相关关系, Simpson 指数与 20—40 cm 土层土壤含水量呈显著正相关关系( $R^2=0.630$ )。上述结果说明,黄土高原刺槐人工林林下多为一年生植物,主要受浅层土壤含水量的影响,不同生活型和水分生态类型植物对降水变化的响应存在差异,降水变化不利于水分胁迫耐受性低的物种生存,进而影响群落物种多样性。研究结果有助于深入了解降水对物种多样性的影响以及对气候变化背景下的黄土高原植被建设和生态恢复具有重要意义。

**关键词:**降水变化; 土壤含水量; 物种多样性; 黄土高原; 刺槐人工林; 控制试验

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0001-10

## Effects of Manipulative Precipitation on Plant Species Diversity in the Understory of Planted *Robinia pseudoacacia* Forest on the Loess Plateau, China

DENG Qiang<sup>1,2</sup>, LIU Di<sup>3,4</sup>, SHI Xinrong<sup>1,4</sup>, YUAN Zhiyou<sup>1,4</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Climate change has a significant impact on species diversity and it remains unclear that how species diversity responds to projected precipitation change, especially for understory communities in forest ecosystems. We investigated the effects of precipitation changes on species composition, community structure and

收稿日期:2020-08-04

修回日期:2020-08-10

**资助项目:**国家重点研发计划“植物—土壤—大气碳氮耦合循环动力学过程”(2016YFA0600800);国家自然科学基金面上项目“降水梯度上水养处理对黄土高原生态系统一些养分过程的影响”(31570438);陕西省百人计划(A289021701);陕西省自然科学基金基础研究计划(2018JZ3002)

**第一作者:**邓强(1989—),男,山东日照人,博士研究生,主要从事旱区林草生态研究。E-mail:meetdengq@163.com

**通信作者:**袁志友(1971—),男,山东济南人,研究员,博导,主要从事全球变化生态学研究。E-mail:zyyuan@ms.iswc.ac.cn

species diversity in the understory of planted *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau via a manipulative throughfall experiment. Soil moisture content increased with the increase of precipitation.  $-80\%$  precipitation treatment reduced the soil moisture contents in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers by 23.6% and 16.1%, respectively.  $+80\%$  precipitation treatment enhanced the soil moisture contents in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers by 26.2% and 13.0%, respectively. The precipitation treatments enhanced the importance values of Rosaceae species and forbs, but reduced the importance values of Leguminosae and Gramineae species. The importance value of Compositae species increased with increase of precipitation. Compared with the control, both  $+20\%$  and  $+40\%$  precipitation manipulations increased the species diversity index and evenness index, while  $-60\%$  and  $-80\%$  precipitation treatments decreased the species diversity index and evenness index. Meanwhile, the species diversity index and evenness index under  $-80\%$ ,  $-60\%$  and  $+80\%$  precipitation treatments were significantly lower than those of the control. The community species richness, diversity and evenness indices were all significantly positively correlated to the soil water content of 0—20 cm soil layer, while the Simpson index was significantly positively correlated to the soil water content of 20—40 cm soil layer ( $R^2=0.630$ ). These results indicated that understory community mainly composed by annual plants was more susceptible to the change of water content in shallow soil layer. The response of plant species to precipitation change varied depending upon life forms and water ecological types. Precipitation change was not conducive to the living of species with low water stress tolerance, which affected the species diversity. These results revealed that it was of great significance to explore the influence of precipitation change on species diversity for vegetation construction and ecological restoration of the Loess Plateau.

**Keywords:** precipitation; soil moisture content; species diversity; Loess Plateau; planted *Robinia pseudoacacia* forest; manipulative experiment.

以气候系统变暖和降水格局(降水量、降水间隔、降水季节分布和降水年际变异)变化为主要特征的全球气候变化已经成为国际公认的事实。IPCC 第五次评估报告指出,1880—2012 年全球海陆表面平均温度已上升  $0.85^{\circ}\text{C}$ , 北半球中纬度陆地降水呈增加趋势,极端天气和气候事件(如干旱、热浪、强降水)发生的频率和强度在增加<sup>[1]</sup>。众所周知,水分是植物体的重要组成部分,也是植物养分循环和流动的载体,在土壤—植被—大气系统物质与能量转化中起着核心和纽带的重要作用。未来气候变化导致的降水量变化将会对生态系统的结构、功能与过程产生深刻影响<sup>[2]</sup>。物种多样性是表征和评价生态系统结构和功能的重要指标,研究物种多样性对降水量变化的响应规律对未来气候变化下的植被建设和生态恢复具有重要意义。

由于降水格局、生态系统类型、土壤类型和物种组成等因素的差异,降水量变化对物种多样性的影响各不相同。如研究表明物种多样性与多年平均降水量在全球尺度上呈显著正相关关系,降水量增加允许更多物种在生理上耐受环境并达到最小存活种群来提高物种丰富度<sup>[3]</sup>。对于水分为主要限制因子的生

态系统,适度增加降水,更适宜的生境条件可以供更多的生命体生存,缓解种内和种间竞争,提高群落的物种丰富度、均匀度和多样性<sup>[4]</sup>。降水主要是通过改变土壤中的水分含量来间接影响植物群落,它具有一定的滞后效应和累积的效应,因此降水量短暂增加或单个湿润年对群落物种多样性的影响有限<sup>[5]</sup>。Adler 等<sup>[3]</sup>对美国堪萨斯州高草草原连续 36 a 的物种丰富度和降水量之间的关系进行了研究,结果表明单一年份的降水量与物种丰富度的相关性不强,物种丰富度在干旱年之后的湿润年里增加最多。降水变化也会导致物种种间关系的变化,导致群落优势种的更替。Gherardi 等<sup>[6]</sup>研究发现,长期干旱会导致美国西部荒漠草原灌木入侵,草本植物多度下降。在某些地区,降水量增加可能会通过某些形式的竞争性排斥导致物种多样性下降:最适宜高水分条件的物种垄断了有限的资源,从而遏制了其他物种的侵入和正常生长。前人研究表明,极端降水和极端干旱均会对植物多样性产生严重的影响,导致群落物种多样性显著下降<sup>[7]</sup>。另有一些研究表明,降水量变化对物种多样性影响不显著。研究发现,降水处理对青藏高原高寒草原群落物种多样性无显著影响,证明水分并不是该植

物群落的主要限制因子<sup>[8-9]</sup>。上述结果说明,由于降水变化程度和生态系统的巨大差异,物种多样性对降水变化的响应并不存在一致的规律。

降水变化对物种多样性的影响作为目前全球变化生态学热点问题,全球范围内已有大量研究,但主要集中在草地生态系统,关于森林生态系统物种多样性对降水变化尤其是极端降水量变化的响应研究仍然较少。

刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)具有耐旱、耐贫瘠、生长迅速、根蘖性好、易繁殖等特点,是黄土高原广泛种植的造林树种之一。但是在造林过程中存在树种选择单一,轻视林下草本和灌木的问题,一些林分的林冠郁闭后,林下层植被盖度低,其水土保持和水源涵养能力大打折扣<sup>[10]</sup>。研究表明,林下层植被(主要是草本和灌木)虽然只占森林生态系统生物量的很少的一部分,但是生物量和养分的周转速率比乔木树种快得多,同时具有涵养水源、保持水土的重要作用<sup>[11]</sup>。同时,由于黄土高原独特的植被和土壤条件,林下层植被对气候变化和人为干扰非常敏感<sup>[12]</sup>。目前,关于全球变化背景下黄土高原生态系统水文过程、生产力、碳循环、演替等方面已有大量研究,但是对于人工林林下植被的多样性、适应性及演替对降水量变化的响应研究较少。因此,开展黄土高原刺槐人工林林下植被物种多样性对降水变化的响应研究,对于提高黄土高原植被恢复效益、维护生物多样性及提高生态系统稳定性等方面具有重要意义。本研究以黄土高原 35 a 生刺槐人工林林下植被为研究对象,进行野外降水控制试验,旨在研究:(1)土壤含水量对 9 个降水量变化强度的响应规律;(2)群落物种组成和结构对降水量变化的响应规律;(3)群落物种多样性对降水量变化的响应规律;(4)探索土壤含水量和群落物种多样性的相关性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于陕西省咸阳市永寿县槐平林场,地处渭北黄土高原南缘与关中平原的交汇地带,属六盘山支脉千山余脉,为黄土高原丘陵沟壑地貌,地理位置为 107°56′—108°20′E, 34°29′—34°59′N, 海拔 1 116~1 505 m。该区属于暖温带大陆性季风气候,年平均气温 10.8℃,年平均降水量 570.1 mm,无霜期 210 d,试验期间月平均降雨量和月平均气温见图 1。土壤类型主要是灰褐土和黑垆土,呈中性、微碱性,pH 值为 6~8.5。研究区处于暖温性森林地带向暖温性森林草原地带的过渡地带,原始森林植被破坏殆尽,残

存有少量辽东栎、白桦、侧柏等天然次生林,现多为人工种植而形成的次生植被<sup>[13]</sup>。槐平林场现有林地面积 1.33 万 hm<sup>2</sup>,其中人工造林 1.07 万 hm<sup>2</sup>,造林树种以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)为主。刺槐人工林林下主要植物有蛇莓(*Duchesnea indica*)、山莓(*Rubus corchorifolius*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、黄花苜蓿(*Medicago falcata*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、早熟禾(*Poa annua*)、鹅观草(*Roegneria kamoji*)、赖草(*Leymus secalinus*)、大披针藎草(*Carex lanceolata*)、宽叶藎草(*Carex siderosticta*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、老鹳草(*Geranium wilfordii*)等。

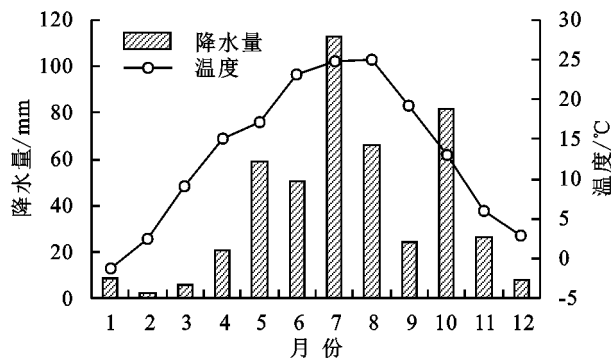


图 1 试验期间研究区月降水量和气温变化

### 1.2 试验设计

本试验于林龄 35 a 生的刺槐人工林中进行,选取立地条件相似、同时远离道路、人为干扰较少的 3 块 130 m × 60 m 样地,样地间隔大于 1 km,样地概况见表 1,样地布局见图 2。每块样地设置 9 块 10 m × 10 m 样方,采用随机区组设计,共设置 27 块样方,样方间隔大于 10 m,分别设置 9 种处理:P<sub>80</sub>- (拦截穿透雨面积为林地投影面积的 80%)、P<sub>60</sub>- (拦截穿透雨面积为林地投影面积的 60%)、P<sub>40</sub>- (拦截穿透雨面积为林地投影面积的 40%)、P<sub>20</sub>- (拦截穿透雨面积为林地投影面积的 20%)、CK(对照)、P<sub>20</sub>+ (施加 P<sub>20</sub>- 样地拦截的穿透雨)、P<sub>40</sub>+ (施加 P<sub>40</sub>- 样地拦截的穿透雨)、P<sub>60</sub>+ (施加 P<sub>60</sub>- 样地拦截的穿透雨)、P<sub>80</sub>+ (施加 P<sub>80</sub>- 样地拦截的穿透雨)。通过安装遮雨棚来控制降水,遮雨材料采用透光率 90% 的聚乙烯薄膜(图 2)。在每块减雨样方中,依据减雨比例铺设若干条 0.4 m × 10 m 的聚乙烯薄膜于木架上用于收集穿透雨,减雨薄膜一端离地 2 m,另一端离地 1 m。在遮雨棚低端铺设聚氯乙烯水管,用于将收集到的穿透雨转移出样方。根据气象资料计算,次降雨 P<sub>80</sub>- 拦截的穿透雨量最大不超过 1 m<sup>3</sup>,因此减雨样方外挖出开口 1 m × 1 m 深 1 m 的集水坑,并设计有盖子,用于存储转移出样方的降水。

每次降水结束后,人工将集水坑里的雨水均匀地转移到相同比例的增雨样方中。所有减雨薄膜于生长季开始前(2016 年 4 月)首次布设,生长季结束后(2016 年 10 月)移除,试验进行期间,每周将落于减雨薄膜的凋落物收集并均匀地撒回样地。为阻断样方内外

的地表径流和壤中流,于 2016 年 3 月沿每块样方的四周嵌入深度 0.5 m 露出地面 0.2 m 的聚氯乙烯隔水板。同期,在试验区内架设 FY-QBX 型自动气象站(武汉富源飞科电子科技有限责任公司)对大气降水量等气象参数进行观测。

表 1 刺槐人工林样地概况

样地	胸径/cm	树高/m	株数密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	土壤类型	海拔/m	坡向	坡度/(°)
1	16.00±2.23	16.42±0.85	2800	灰褐土	1330	南坡	8
2	16.14±1.48	17.30±0.92	2505	灰褐土	1401	东南坡	10
3	16.95±2.03	15.06±0.77	2620	灰褐土	1375	南坡	7

注:胸径与树高的数值为平均值±标准误。

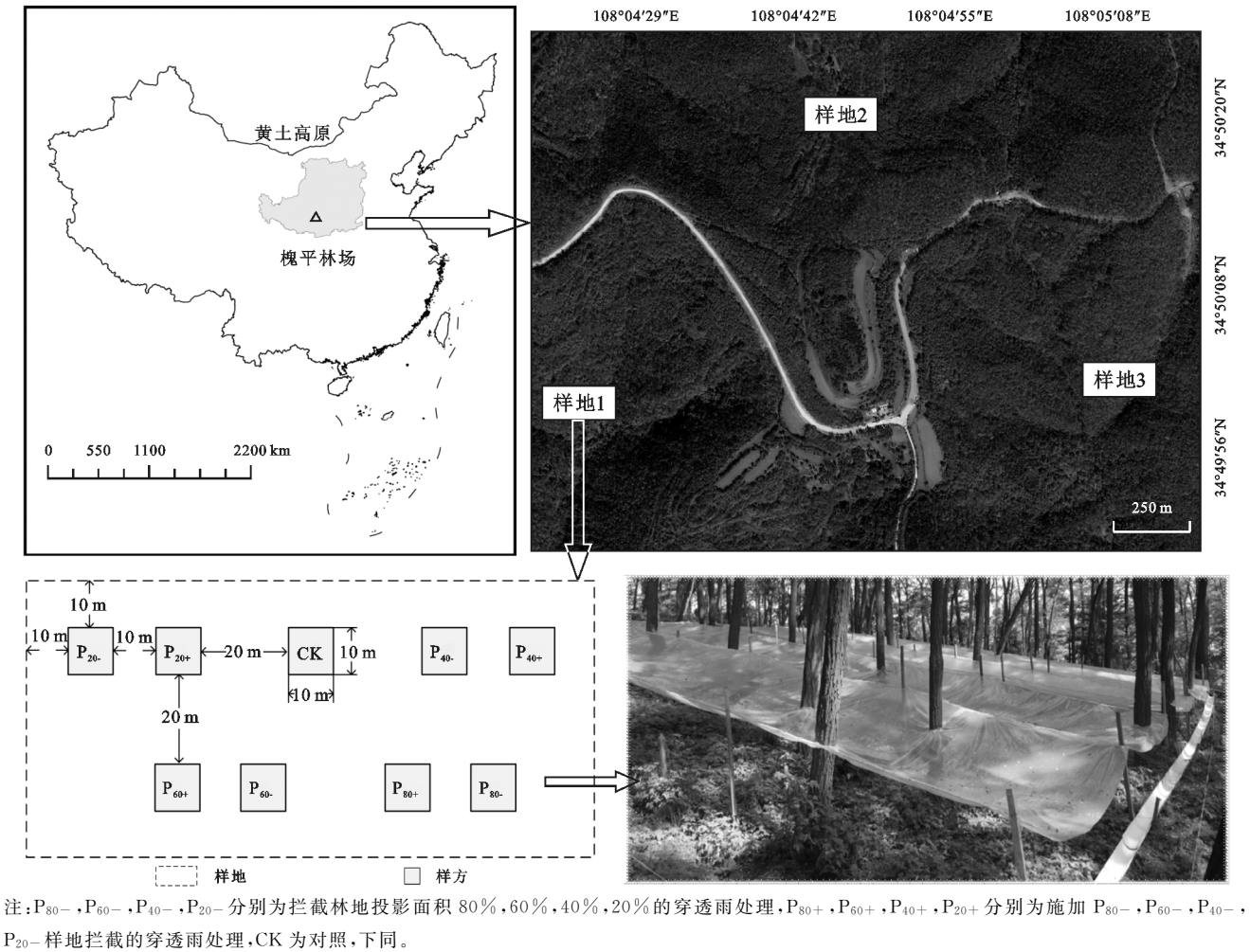


图 2 研究区域与试验布设示意图

1.3 数据收集

于 2016 年 8 月进行群落调查,在每个处理样地内随机选择 5 个 50 cm×50 cm 的样方,记录每个样方中出现的物种并测量盖度和多度,记录优势种。然后沿每块样地坡面的上、中和下部随机选择 5 点用土钻取样,分层采集 0—20 cm,20—40 cm 的土样并混合,每个样地重复 3 次,用烘干法测定土壤质量含水量。

1.4 数据计算与统计分析

(1) 物种重要值

重要值是研究某个物种在群落中的重要性的综合数量指标<sup>[14]</sup>,采用如下公式:

$$IV=(RA+RF+RC)/3$$

式中:IV 为重要值;RA 为相对多度,即某个种的个体数占全体物种个体数之和的百分比;RF 为相对频度,即某个种出现的样方数占所有种出现的样方数之

和的百分比;RC 为相对盖度,即某个种的分盖度占所有种的分盖度之和的百分比。

(2) 物种丰富度指数

Patrick 指数( $R$ ):  $R = S$

Margalef 指数( $M_a$ ):  $M_a = (S - 1) / \ln N$

式中: $S$  是样方内物种数; $N$  为样方中物种个体总数。

(3) 物种多样性指数

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

Shannon-Wiener 指数( $H'$ ):  $H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

$$P_i = IV_i / \sum_{i=1}^S IV$$

式中: $P_i$  为第  $i$  个物种的相对重要值; $IV_i$  为第  $i$  个物种的重要值。

(4) 物种均匀度指数

Pielou 均匀度指数( $E$ ):  $E = H' / \ln S$

运用 R(4.0.2) 进行数据的整理与分析,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 多重比较法检验 9 种降水处理之间土壤含水量、物种丰富度、多样性和均匀度指数差异显著性( $\alpha = 0.05$ ),采用线性回归分析分析土壤含水量和物种丰富度、多样性、均匀度指数的相关性。

2 结果与分析

2.1 降水处理对土壤含水量的影响

随着降水减少—对照—降水增加处理梯度,土壤含水量呈增加趋势,降水处理对不同土层土壤含水量的影响存在差异(表 2)。0—20 cm 土层, $P_{80-}$  土壤含水量最小,为 16.98%,显著低于对照( $p < 0.05$ ), $P_{60+}$ , $P_{80+}$  土壤含水量分别为 25.59%,28.05%,显著高于对照,其他降水处理与对照差异不显著;20—40 cm 土层, $P_{80-}$ , $P_{60-}$  土壤含水量分别为 14.69%,15.45%,显著低于对照, $P_{60+}$ , $P_{80+}$  土壤含水量分别为 18.65%,19.51%,显著高于对照,其他降水处理之间差异不显著。同一降水处理下,随着土层的增加,土壤含水量呈下降趋势。除  $P_{80-}$  外,其他降水处理 0—20 cm 土层土壤含水量显著高于 20—40 cm 土层。

2.2 降水处理对群落物种组成和结构的影响

由表 3 所示,刺槐人工林样地林下灌草层的分层现象不明显,灌木层物种数和个体数较少,主要有蔷薇科的蛇莓和山莓、豆科的达乌里胡枝子等。林下层共出现 31 种植物,分属 15 个科,优势种主要出现在蔷薇科、豆科、菊科和禾本科,这 4 科物种占总物种数的 58.06%。其中,对对照样地林下层出现植物 23 种,

群落优势种为早熟禾、鹅观草和艾蒿; $P_{20-}$  林下层出现植物 27 种,数量最多,群落优势种为山莓和早熟禾; $P_{80-}$  林下层共有 20 种植物,数量最少,群落优势种为山莓和艾蒿。

表 2 不同降水处理下不同土层土壤含水量

降水处理	含水量/%	
	0—20 cm	20—40 cm
$P_{80-}$	16.98±1.94Aa	14.69±0.41Aa
$P_{60-}$	19.10±1.11ABa	15.45±0.34Ab
$P_{40-}$	20.26±1.88ABa	15.99±0.64ABb
$P_{20-}$	21.25±1.44BCa	16.52±0.86ABb
CK	22.22±1.39BCa	16.97±0.47ABb
$P_{20+}$	23.63±1.07CDa	17.12±0.56BCb
$P_{40+}$	24.19±1.23CDa	18.03±0.97BCb
$P_{60+}$	25.59±1.41DEa	18.65±1.20CDB
$P_{80+}$	28.05±1.66DEa	19.51±0.53CDB

注:图表中数据均为平均值±标准误。同列不同大写字母表示不同降水处理之间差异显著( $p < 0.05$ ),同列不同小写字母表示不同土层之间差异显著( $p < 0.05$ )。 $P_{80-}$ , $P_{60-}$ , $P_{40-}$ , $P_{20-}$  分别为拦截林地投影面积 80%,60%,40%,20% 的穿透雨处理, $P_{80+}$ , $P_{60+}$ , $P_{40+}$ , $P_{20+}$  分别为施加  $P_{80-}$ , $P_{60-}$ , $P_{40-}$ , $P_{20-}$  样地拦截的穿透雨处理,CK 为对照,下同。

不同降水处理下刺槐人工林林下植物群落组成和结构发生了明显变化(表 3,图 3)。随着降水减少—对照—降水增加处理梯度,蔷薇科植物重要值呈先减少后增加趋势,最大值和最小值分别为 29.87( $P_{60-}$ )和 7.29( $P_{40+}$ ),并且优势种由山莓逐渐变为山莓和蛇莓,与对照相比,降水减少和  $P_{60+}$ , $P_{80+}$  显著提高了蔷薇科植物重要值;豆科植物优势种为达乌里胡枝子,与对照相比, $P_{80-}$ , $P_{60-}$ , $P_{40-}$ , $P_{60+}$ , $P_{80+}$  显著降低了豆科植物重要值,其他处理间差异不显著,最大值和最小值分别为 11.32(CK)和 0.05( $P_{80-}$ );随着降水减少—对照—降水增加处理梯度,菊科优势种由艾蒿逐渐变为艾蒿和黄花蒿,与对照相比, $P_{80-}$ , $P_{60-}$ , $P_{40-}$  显著降低了菊科植物重要值, $P_{60+}$  显著提高了菊科植物重要值,其他处理间差异不显著,最大值和最小值分别为 40.76( $P_{60+}$ )和 11.06( $P_{60-}$ );禾本科优势种为早熟禾和鹅观草,与对照相比, $P_{80-}$ , $P_{60+}$ , $P_{80+}$  显著降低了禾本科植物重要值, $P_{20+}$  显著提高了禾本科植物重要值,其他处理间差异不显著,最大值和最小值分别为 36.17( $P_{20+}$ )和 11.87( $P_{80+}$ );降水处理对杂类草物种组成和重要值影响较大,随着降水减少—对照—降水增加处理梯度,杂类草植物重要值呈先减少后增加趋势,最大值和最小值分别为 33.99( $P_{80+}$ )和 16.57( $P_{20-}$ ), $P_{80-}$  和  $P_{60-}$  大披针藜和宽叶藜消亡,紫花地丁、灰绿藜、鹅绒藤、马蔺重要值增加,杂类草植物

重要值显著高于对照,降水增加,大披针薹草逐渐为杂类草优势种, $P_{40+}$ , $P_{60+}$ , $P_{80+}$  杂类草植物重要值显著高于对照。

2.3 降水处理对群落物种多样性的影响

群落物种丰富度在不同降水处理间存在差异(图 4)。其中,对对照样地 Patrick 指数为 23, $P_{80-}$ , $P_{60-}$ ,

$P_{80+}$  Patrick 指数低于对照, $P_{40-}$ , $P_{20-}$ , $P_{20+}$ , $P_{40+}$  Patrick 指数高于对照, $P_{60+}$  Patrick 指数和对照相同。随着降水减少—对照—降水增加处理梯度,Margalef 指数呈先上升后下降趋势,最大值出现在  $P_{20-}$ 。与对照相比, $P_{80-}$  和  $P_{80+}$  显著降低了 Margalef 指数,其他降水处理对 Margalef 指数影响不显著。

表 3 不同降水处理下林下植物群落物种组成和重要值

功能群	物种	重要值								
		$P_{80-}$	$P_{60-}$	$P_{40-}$	$P_{20-}$	CK	$P_{20+}$	$P_{40+}$	$P_{60+}$	$P_{80+}$
蔷薇科	蛇莓 <i>Duchesnea indica</i>	6.22	5.97	3.64	6.37	5.71	3.62	1.05	7.49	10.14
	地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	—	—	2.41	4.12	3.48	2.91	2.57	5.12	4.91
	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	3.14	1.16	4.10	2.75	0.76	1.55	—	—	0.09
	山莓 <i>Rubus corchorifolius</i>	19.78	22.74	15.78	1.24	—	—	3.67	6.50	9.35
豆科	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	1.99	4.10	4.22	7.64	7.90	6.71	3.28	0.65	—
	黄花苜蓿 <i>Mcicago falcata</i>	—	—	1.84	1.98	2.19	2.47	3.11	0.23	—
	米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	—	0.41	—	1.45	1.23	0.30	1.64	0.17	0.05
菊科	艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	14.36	5.23	8.40	12.47	11.36	13.44	15.33	13.04	12.20
	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	—	2.04	3.45	5.54	7.43	6.53	8.00	17.45	9.96
	蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	3.14	0.46	5.41	6.13	4.55	3.61	3.57	3.71	2.14
	阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	4.05	3.33	2.75	2.10	2.17	1.04	0.90	0.93	0.04
	三脉紫菀 <i>Aster ageratoides</i>	—	—	0.15	—	0.70	0.06	1.42	0.78	1.55
	抱茎苦蕒菜 <i>Lxeris sonchifolia</i>	—	—	0.48	1.99	—	2.58	3.66	4.85	3.71
禾本科	早熟禾 <i>Poa annua</i>	5.70	12.20	15.94	17.06	13.51	15.06	10.78	4.21	5.77
	鹅观草 <i>Roegneria kamoji</i>	3.47	5.01	6.66	7.82	11.40	13.62	10.45	6.74	4.32
	赖草 <i>Leymus secalinus</i>	2.71	0.09	3.54	4.77	5.45	5.60	3.39	0.30	1.11
	毛马唐 <i>Digitaria chrysoblephara</i>	0.64	1.37	—	—	1.23	1.89	0.42	2.18	0.67
	羊茅 <i>Festuca ovina</i>	7.43	6.23	1.17	—	—	—	—	—	—
杂类草	大披针薹草 <i>Carex lanceolata</i>	—	—	0.79	3.71	5.60	7.73	10.43	10.68	14.87
	宽叶薹草 <i>Carex siderosticta</i>	—	—	1.52	2.64	4.29	4.11	6.94	4.29	6.74
	茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	—	1.25	4.46	1.40	3.45	0.95	1.57	5.96	9.14
	老鹳草 <i>Geranium wilfordii</i>	0.09	—	—	0.70	3.03	2.14	2.90	0.22	—
	薤白 <i>Allium macrostemon</i>	—	—	3.01	0.73	2.09	1.56	2.56	1.97	3.18
	露珠草 <i>Circaea cordata</i>	1.02	2.22	3.14	1.01	1.65	0.71	0.10	—	—
	紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	5.42	4.35	2.27	0.95	0.58	1.64	1.92	2.13	—
	唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i>	1.86	0.18	—	0.07	0.24	—	—	—	0.04
	败酱 <i>Patrinia scabiosaefolia</i>	—	—	0.08	0.95	—	0.17	0.34	0.40	0.02
	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	7.25	7.21	—	2.03	—	—	—	—	—
	鹅绒藤 <i>Cynanchum chinense</i>	4.49	6.48	3.35	1.74	—	—	—	—	—
	杠柳 <i>Periploca sepium</i>	2.88	0.35	—	0.64	—	—	—	—	—
	马蔺 <i>Iris lactea</i>	4.36	7.62	1.44	—	—	—	—	—	—

注:表中数据为平均值,“—”表示该种植物不存在。

2 种群落物种多样性指数随降水处理的变化规律基本一致(图 4)。随着降水减少程度的增加,Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数逐渐下降, $P_{80-}$  和  $P_{60-}$  物种多样性指数显著低于对照;随着降水

减少程度的增加,Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数先上升后下降,在  $P_{20+}$  处达到峰值;与对照相比, $P_{20+}$  和  $P_{40+}$  显著增加了 Simpson 指数, $P_{20+}$  显著增加了 Shannon-Weiner 指数, $P_{80+}$  显著降低了

Simpson 指数,  $P_{60+}$  和  $P_{80+}$  显著降低了 Shannon-Weiner 指数。

随着降水减少程度的增加, Pielou 均匀度指数逐渐下降,  $P_{80-}$ 、 $P_{60-}$ 、 $P_{40-}$  显著低于对照(图 4);随着降水减少程度的增加, Pielou 均匀度指数先上升后下降, 在  $P_{20+}$  处达到峰值,  $P_{40+}$  与对照差异不显著,  $P_{60+}$  和  $P_{80+}$  显著降低了 Pielou 均匀度指数。

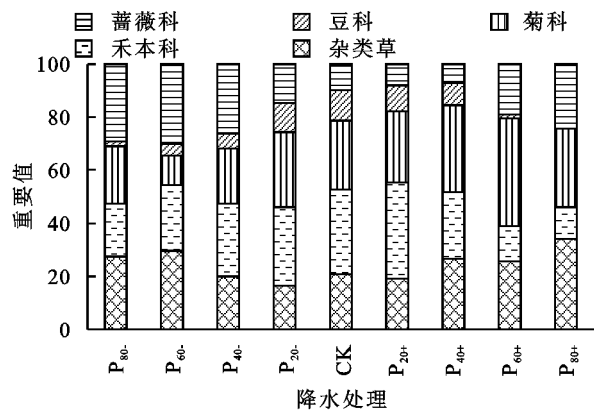
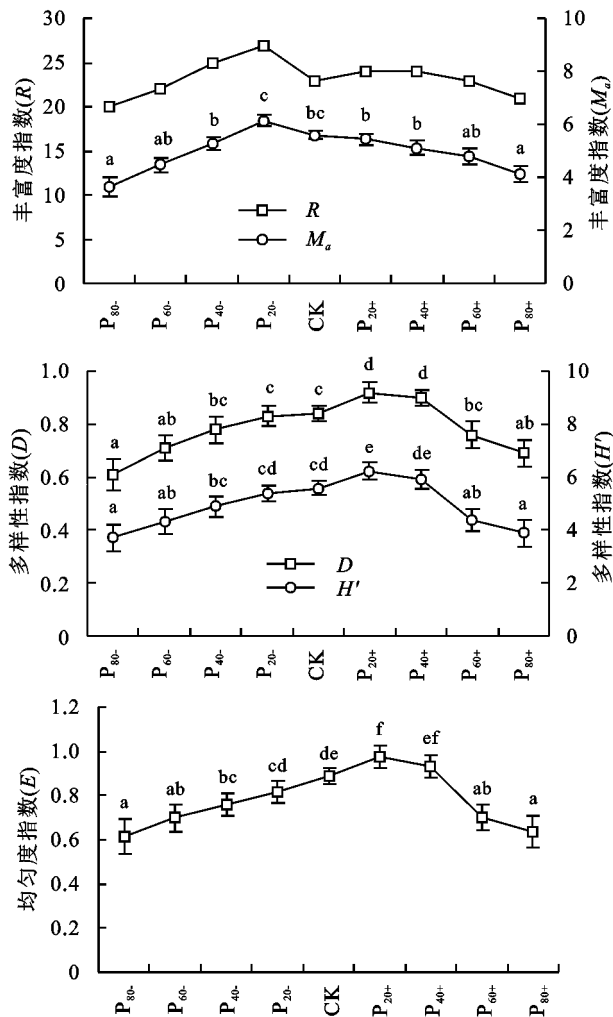


图 3 不同降水处理样地林下植物群落物种重要值



注: 图表中数据均为平均值±标准误。不同小写字母表示不同降水处理之间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 4 不同降水处理样地林下植物群落物种多样性

## 2.4 群落物种多样性与土壤含水量的相关性

群落物种丰富度、多样性和均匀度指数随土壤含水量增加呈先上升后下降趋势(图 5)。群落物种丰富度、多样性和均匀度指数与 0—20 cm 土层土壤含水量呈显著正相关关系; Simpson 指数与 20—40 cm 土层土壤含水量呈显著正相关关系( $R^2 = 0.630$ ,  $p < 0.05$ ); Margalef 指数、Shannon-Weiner 指数和 Pielou 均匀度指数与 20—40 cm 土层土壤含水量无显著相关关系( $p > 0.05$ )。

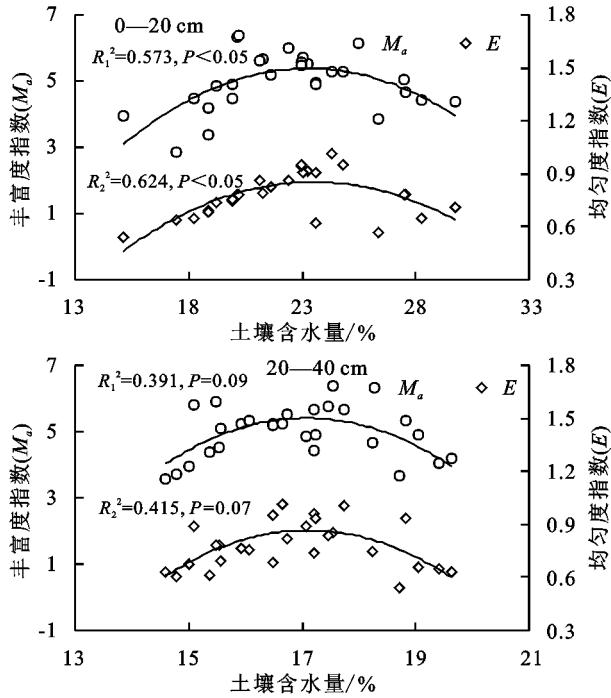
## 3 讨论

### 3.1 降水处理对群落物种组成和结构的影响

我们的研究表明, 生长季林内穿透雨增加、减少处理显著改变了黄土高原刺槐人工林土壤水分含量, 0—20 cm 土层土壤含水量的变化相对于 20—40 cm 土层更加明显, 与前人的研究结果一致<sup>[12,15]</sup>。研究区刺槐人工林林下灌草层的分层现象不明显, 主要原因是造林时经过全面整地, 天然灌草被破坏, 林冠郁闭后, 林下层的光照量不足, 使得灌木层和草本层的生长受到了抑制<sup>[10,13]</sup>。

林下层植被主要由蔷薇科、豆科、菊科和禾本科植物构成, 植物水分生态类型以中生、中旱生植物占主要优势, 符合黄土高原半干旱区的植被组成特征, 与郭琳等的研究结果一致<sup>[13]</sup>。降水减少和增加处理都会提高蔷薇科物种重要值, 表现出较强的适应性。优势种蛇莓和山莓都属于耐旱、耐贫瘠、适应性强的物种, 并且具有蔓生性, 形态为矮小的灌木覆被在地面上, 并且具有强大的根系, 使其能很好地适应极端水分条件<sup>[16]</sup>。豆科植物优势种为达乌里胡枝子, 极端降水处理显著降低了豆科物种重要值, 这与段东平在黄土丘陵区天然草地群落进行的人工补水试验结果一致<sup>[17]</sup>。可能的原因是, 相对于其他草本植物, 达乌里胡枝子根系较深, 主要利用较深层土壤水分, 土壤表层增加的降水对其影响有限, 并且达乌里胡枝子为中旱生植物, 极端干旱环境不利于其生长<sup>[17-18]</sup>。菊科优势种主要为艾蒿和黄花蒿, 都属于中生性蒿属植物, 相对于分布在黄土高原森林草原和典型草原地带旱生性的铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)和芨蒿(*Artemisia giraldii*), 更容易受到干旱胁迫的影响。因此, 降水减少处理显著降低了菊科物种重要值<sup>[19]</sup>。早熟禾和鹅观草属于中生植物, 生态位较宽, 但是过分的干旱胁迫和水涝均不利于其生长, 因此极端降水处理显著降低了禾本科物种重要值<sup>[20]</sup>。与对照相比, 降水增加处理提高了杂类草物种重要值, 这

与 Miao 等<sup>[21]</sup>对青藏高原东北缘草地植物群落的研究结果一致,说明群落中地位较低的伴生种能够在外界环境改善的条件下充分利用生长繁殖所需的资源。大披针藁草和宽叶藁草是簇丛型中生植物,增加降水显著提高了其重要值。寇萌等<sup>[22]</sup>对黄土高原延河流域植物群落特征的研究发现,大披针藁草是降水量较高的中南部区域草本群落的优势种。降水减少,杂类



草物种重要值增加,这与张志南等<sup>[23]</sup>对黄土高原半干旱区天然草地群落的研究结果一致。灰绿藜、鹅绒藤、杠柳、马蔺这 4 种植物为研究区林下层植被偶见种,仅出现在降水减少处理样地,并且随着降水量下降逐渐成为群落优势种。灰绿藜、杠柳、马蔺都属于耐旱、耐盐碱植物,具有较宽的生态位,在极端干旱胁迫下仍能生存<sup>[24-25]</sup>。

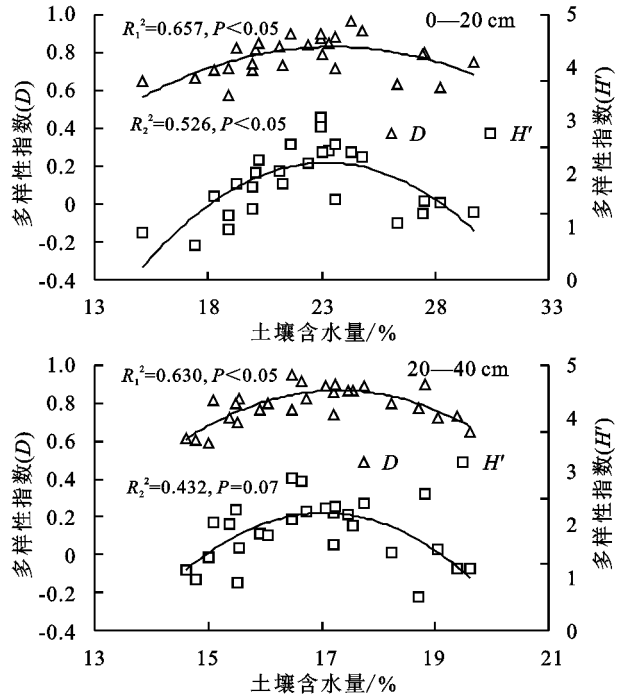


图 5 群落物种多样性与土壤含水量的关系

### 3.2 降水处理对群落物种多样性的影响

物种多样性是表征和评价植物群落组成和功能的重要指标。本研究中,除  $P_{80-}$ 、 $P_{60-}$ 、 $P_{60+}$  和  $P_{80+}$  外,其他降水处理物种数都高于对照,符合 Connell<sup>[26]</sup>的“中度干扰”假说,即中等程度的干扰使竞争替代减弱,从而维持较高的物种多样性。Grime<sup>[27]</sup>指出,环境可以通过两种不同的方式影响物种丰富度,一是影响物种优势度;二是影响潜在丰富度(物种库)。本研究中,降水变化促进了多年生草本植物和灌木的萌发。前人研究表明,降水量增加或减少都可能打破土壤潜在种子库中部分种子休眠,促使其萌发,进而增加物种数<sup>[28-29]</sup>。不同降水处理下 Margalef 指数变化规律与 Patrick 指数略有不同,表明降水处理后物种数增加,但是样方内物种个体总数下降。刺槐人工林林下物种多样性指数和均匀度指数随降水处理表现出基本一致的变化规律。物种多样性随降水量的减少呈下降趋势,一定程度的降水增加有利于物种多样性提高,过量降水显著降低物种多样性。我们的结果与黄土高原典型天然草地群落进行

的相似降水变化处理试验的结果基本一致<sup>[30]</sup>。相对于 20—40 cm 土层,0—20 cm 土层土壤含水量对群落物种多样性的影响更显著,这是由于群落主要由草本植物构成,主要利用浅层土壤的水分,深层土壤含水量变化对其影响较小。

不同生态系统物种多样性对降水变化的响应存在差异,主要是由于气候、土壤、生态系统类型、降水变化的程度和频度等多种复杂因素共同导致的。大量研究表明,降水量和物种多样性之间存在正相关关系<sup>[15,29,31-32]</sup>。降水量增加,植物能获取更多的水分用于生长和发育,缓解水分胁迫,同时能够降低群落内种群之间的生态位重叠程度,缓解种间竞争,使得同一生境能容纳更多的物种生存<sup>[4,31]</sup>。对于水分为主要限制因子的干旱、半干旱生态系统,降水量增加对物种多样性的促进作用更加明显<sup>[15,29,32-33]</sup>。但是,研究证实,过量降水会降低群落物种多样性<sup>[15,30-31,33]</sup>。这是由于过量降水会导致涝害发生,导致土壤缺氧和土壤退化,超越了植物生理耐受范围,影响植物体吸收水分和养分,进而引起植物生长发育受阻,甚至死

亡<sup>[2,34]</sup>。还有一些研究发现,降水变化对群落物种多样性没有显著影响<sup>[8-9,35]</sup>。造成这种现象可能的原因,一是生态系统通过改变群落物种组成,可以抵抗一定程度的短期降水变化对物种多样性的影响<sup>[35]</sup>;二是降水变异程度小,不足以对物种多样性产生显著影响<sup>[8]</sup>。前人研究证实,由于生态系统具有抵抗力稳定性,极端气候变化并不一定引起极端的生态系统反应<sup>[7,36]</sup>。Alon 等<sup>[37]</sup>的研究表明,极端干旱(5—8 月截雨 66%,6—7 月截雨 100%)处理显著降低了荒漠草原沙生针茅群落优势种的丰富度和生物量,缓解了群落内的种间竞争,其他物种相对丰富度提高,从而短期内提高了物种多样性和均匀度。张蕊等<sup>[28]</sup>在内蒙古荒漠草原进行的相同极端干旱处理试验也得到了相似的结果。

姜基春等<sup>[38]</sup>研究了黄土高原 4 种植被带草本群落物种多样性对降水变化的响应规律,结果表明,典型草地和荒漠草地物种多样性与降水量呈正相关,森林带和森林—草原带草本群落物种多样性随降水量的增加呈下降趋势。这说明黄土高原森林林下草本植物群落受乔木与灌木的影响,群落物种多样性对降水变化的响应规律要比草地群落复杂的多。本研究发现,一年生草本植物受降水变化的影响最大,与王军锋等<sup>[32]</sup>在黄土高原荒漠草原进行的降水控制试验的结果一致。一年生草本植物根系分布较浅,相对于多年生草本植物和灌木,更容易受到浅层土壤水分波动的影响,干旱胁迫时不能利用土壤深层的水分,过量降水导致的土壤涝害对其影响也较大。前人研究发现,黄土高原刺槐人工林在成熟之后,林下层物种多样性随着林龄的增加逐渐下降,并且灌木层基本消失<sup>[13]</sup>。根据生态系统稳定性理论,生物多样性可以提高系统对干扰的抵抗力,生物多样性越高系统稳定性较高,可以一定程度的减小降水量变化对生态系统的影响<sup>[39]</sup>。因此,未来降水变化将不可避免的影响黄土高原刺槐人工林林下植物多样性,进而影响到生态系统结构和功能的稳定性。

## 4 结论

随着降水量的增加,土壤含水量呈增加趋势,降水处理对 0—20 cm 土层土壤含水量的影响大于 20—40 cm 土层。不论降水减少或增加,都提高了蔷薇科和杂类草物种的重要值,但降低了豆科和禾本科物种的重要值,降水量的增加也提高了菊科物种的重要值。降水减少处理降低了物种多样性指数和均匀

度指数,并且随着降水减少程度的增加呈下降趋势。增雨 20%和 40%增加了物种多样性指数和均匀度指数,但增雨 60%和 80%降低了物种多样性指数和均匀度指数。群落物种丰富度、多样性和均匀度指数与 0—20 cm 土层土壤含水量呈显著正相关关系。研究降水变化对物种多样性的影响对气候变化背景下的黄土高原植被建设和生态恢复具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 张彬,朱建军,刘华民,等.极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J].植物生态学报,2014,38(9): 1008-1018.
- [3] Adler P B, Levine J M. Contrasting relationships between precipitation and species richness in space and time[J]. *Oikos*, 2007,116(2):221-232.
- [4] 白春利,阿拉塔,陈海军,等.氮素和水分添加对短花针茅荒漠草原植物群落特征的影响[J].中国草地学报,2013,35(2):69-75.
- [5] Niu S, Wu M, Han Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe[J]. *New Phytologist*, 2008,177(1):209-219.
- [6] Gherardi L A, Sala O E. Enhanced precipitation variability decreases grass- and increases shrub-productivity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015,112(41):12735-12740.
- [7] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, et al. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland[J]. *Science*, 2002,298(5601):2202-2205.
- [8] 李晓刚,朱志红,周晓松,等.刈割、施肥和浇水对高寒草甸物种多样性、功能多样性与初级生产力关系的影响[J].植物生态学报,2011,35(11):1136-1147.
- [9] 李长斌,彭云峰,赵殿智,等.降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响[J].水土保持研究,2016,23(6):185-191.
- [10] 陈云明,梁一民,程积民.黄土高原林草植被建设的地带性特征[J].植物生态学报,2002,26(3):339-345.
- [11] 杜忠,蔡小虎,包维楷,等.林下层植被对上层乔木的影响研究综述[J].应用生态学报,2016,27(3):963-972.
- [12] 刘迪,邓强,时新荣,等.黄土高原刺槐人工林根际和非根际土壤磷酸酶活性对模拟降水变化的响应[J].水土保持研究,2020,27(1):95-103.
- [13] 郭琳,宋西德,张永,等.永寿县刺槐人工林下植物多样性比较研究[J].西北林学院学报,2010,25(3):20-23.
- [14] 任继周.草业科学研究方法[M].北京:中国农业出版

- 社,1998:27-28.
- [15] 王悦骅,王忠武,潘占磊,等.载畜率和模拟降水对荒漠草原植物物种多样性的影响[J].中国草地学报,2018,40(2):89-94.
- [16] 王鹏霄,程许娜,苏金乐.内乡宝天曼自然保护区悬钩子属植物资源状况及经济价值分析[J].西部林业科学,2011,40(4):84-88.
- [17] 段东平.黄土丘陵区天然草地群落特征对人工补水的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [18] 程杰,程积民,呼天明.气候变化对黄土高原达乌里胡枝子种群分布格局的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):35-40.
- [19] 王勇,梁宗锁,龚春梅,等.干旱胁迫对黄土高原4种蒿属植物叶形态解剖学特征的影响[J].生态学报,2014,34(16):4535-4548.
- [20] 郭郁频,米福贵,闫利军,等.不同早熟禾品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J].草业学报,2014,23(4):220-228.
- [21] Miao F, Guo Z, Xue R, et al. Effects of grazing and precipitation on herbage biomass, herbage nutritive value, and yak performance in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plos One, 2015,10(6):0127275.
- [22] 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):1561-1571.
- [23] 张志南,武高林,王冬,等.黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系[J].草业学报,2014,23(6):313-319.
- [24] 李裕元,邵明安.子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J].生态学报,2004(2):252-260.
- [25] 骆丹丹,白小明,孙艳敏,等.甘肃野生马蔺(*Iris lacteal* var. *chinensis*)对干旱胁迫的生理响应及抗旱性[J].中国沙漠,2019,39(5):210-221.
- [26] Connell H J. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. Science, 1978,199(4335):1302-1310.
- [27] Grime J P. Plant strategies and vegetation processes [M]. London:Wiley, 1979.
- [28] 张蕊,赵学勇,王少昆,等.极端干旱对荒漠草原群落物种多样性和地上生物量碳氮的影响[J].生态环境学报,2019,28(4):715-722.
- [29] Liu H F, Liu T, Han Z Q, et al. Germination heterochrony in annual plants of *Salsole* L.:an effective survival strategy in changing environments[J]. Scientific Reports, 2018,8(1):65-76.
- [30] 刘海威.黄土丘陵区草地群落生物学及生态化学计量学特征对降水改变的响应分析评价[D].陕西杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2018.
- [31] 王长庭,王启基,沈振西,等.模拟降水对高寒矮嵩草草甸群落影响的初步研究[J].草业学报,2003,12(2):25-29.
- [32] 王军锋,张丽华,赵锐锋,等.荒漠草原区不同生活型植物生长对降水变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(3):778-786.
- [33] 张晓龙,周继华,蔡文涛,等.水分梯度下黑河流域荒漠植物群落多样性特征[J].生态学报,2017,37(14):4627-4635.
- [34] Kreyling J, Wenigmann M, Beierkuhnlein C, et al. Effects of extreme weather events on plant productivity and tissue die-back are modified by community composition[J]. Ecosystems, 2008,11(5):752-763.
- [35] Zhong M X, Song J, Zhou Z X, et al. Asymmetric responses of plant community structure and composition to precipitation variabilities in a semi-arid steppe[J]. Oecologia, 2019,191(3):697-708.
- [36] Hoover D L, Knapp A K, Smith M D. Resistance and resilience of a grassland ecosystem to climate extremes [J]. Ecology, 2014,95(9):2646-2656.
- [37] Alon M, Sternberg M. Effects of extreme drought on primary production, species composition and species diversity of a Mediterranean annual plant community[J]. Journal of Vegetation Science, 2019,30(6):1045-1055.
- [38] 姜基春,王国强,郭宁,等.黄土高原4种植被带草本群落特征及其对降水变化的响应[J].西北植物学报,2019,39(10):1861-1867.
- [39] Ives A R, Carpenter S R. Stability and diversity of ecosystems[J]. Science, 2007,317(5834):58-62.