

宁夏荒漠草原地上净初级生产力对降水的响应及其影响因子分析

赵雅欣,张翼,罗叙,王誉陶,尉剑飞,梁晓谦,周欣扬,李建平*

(宁夏大学林业与草业学院,宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】地上净初级生产力(ANPP)是植被群落特征重要表征指标,降水变化是影响干旱区荒漠草原植被群落特征的关键因素。在气候变化背景下,研究降水变化对荒漠草原地上净初级生产力的影响,对荒漠草原适应性管理具有重要的现实意义。【方法】在毛乌素沙地南缘荒漠草原,利用遮雨棚和人工补水措施模拟了5种降水梯度,分别为自然降水的33%、66%、100%、133%、166%(记为R33、R66、CK、R133和R166),研究了荒漠草原地上净初级生产力(ANPP)对5种降水梯度的响应。【结果】降水变化影响物种数量和多样性指数,增加降水或减少降水均能减少物种数量。ANPP受降水量变化影响,不同优势种的ANPP对降水变化响应均不同,增加降水使猪毛蒿(*Artemisia scoparia*) ANPP增高,蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*) ANPP降低。土壤有机碳(SOC)、土壤总氮(STN)、土壤总磷(STP)含量在R33处理下低于CK处理,SOC和STN在R166处理下高于CK处理。适当增加或减少降水均能降低土壤含水量(SWC),其中R133与其他处理有显著差异($P<0.05$)。SWC、pH值、SOC、STN、STP与ANPP之间均呈正相关关系,而STP与地下生物量(BGB)呈负相关性。【结论】荒漠草原ANPP对降水量呈现正反馈趋势,同时降水量通过影响群落多样性和土壤理化性质间接影响ANPP,研究结果对荒漠草原生态系统功能评估和适应性管理提供了有力支撑。

关键词:荒漠草原;降水变化;植被;地上净初级生产力;土壤特性

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0206-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.023



由降水变化引起的生态系统结构和功能的改变对自然产生了巨大而深远的影响,其中生态系统的可持续性关系到人类社会和经济的持续发展。随着全球气候变化的加剧,降水分布格局发生显著变化,具体表现为北半球平均降水量增加,中纬度大部分陆地的极端降水事件频繁发生且强度增加^[1-2]。荒漠草原生态系统是干旱、半干旱地区重要的陆地生态系统类型,由于其易受养分流失、干旱胁迫、沙漠化等影响,

生态系统稳定性差,对于气候变化具有先天的脆弱性和敏感性^[3],更容易受外界的干扰和影响而发生正向或反向演替,降水变化通过直接影响植被特征及微生物特征,进而影响草地生态系统结构和稳定性^[4]。在全球气候变化的大背景下,降水量和土壤含水量对草地生态系统群落结构的稳定性以及与功能发挥中起着重要且复杂的调控作用,影响着草地植物群落物种多样性和丰富度等指标的变化^[5],因此评估气候变化对地上净初级生产力(ANPP)的影响具有重要的生态学意义^[6-7]。

ANPP可作为评价草原生态系统生产功能的主要指标之一^[8]。ANPP决定草地生态系统的基本功能,是草地植被—土壤反馈机制中的重要指标,也是控制养分循环、碳循环、水循环的重要环节^[9]。研究表明降水量和ANPP表现出非线性正相关关系(考虑生态系

收稿日期:2024-03-20;**修回日期:**2024-05-20

基金资助:宁夏自然科学基金项目(2023AAC02029);国家自然科学基金项目(32160336)

作者简介:赵雅欣(1998-),女,内蒙古自治区巴彦淖尔人,硕士研究生。E-mail:zyxtt1026@163.com

*通信作者,研究方向为草地生态与气候变化。

E-mail:lijianpingsas@163.com

统差异)和线性正相关关系(不考虑生态系统差异)^[10]。受地域差异的影响,不同地区的草地群落物种可能具有不同的抵抗性,例如英国巴克斯顿草地生态系统,长期的干旱并没有降低该区域的植被生物量^[11]。此外,当降水量持续增加到一定阈值,草地植被 ANPP 开始下降,进而减少该地区生态系统生产力^[12]。内蒙古呼伦贝尔草甸草原模拟气候变化的长期试验显示,温度升高和减少降水的协同作用可以导致 ANPP 发生剧烈波动^[13]。研究显示,不同降水梯度、降水强度及降水时间对草地生态系统植被产生不同的影响,尤其是对地上净初级生产力(ANPP)的影响非常显著^[14]。内蒙古温性荒漠草原、典型草原和草甸草原的 ANPP 对 5—7 月降水的响应尤为强烈,其中 7 月响应最强^[15],半干旱草地生态系统的物种丰富度和 ANPP 对减雨处理的敏感性更强^[16]。

目前,对于草地生态系统 ANPP 对降水变化的响应机制尚未有统一的结论,且关于荒漠草地植被生产力与土壤特性之间相关性的研究还比较匮乏。本研究在不同降水梯度下,研究植被组成、物种多样性、生物量及土壤养分特征等指标对不同降水变化的响应特征,明确荒漠草原生产力对降水变化的响应动态,揭示降水变化背景下荒漠草原植被生产力的主要影响因素,以期对草地生态系统生产力对全球气候变化(降水变化)的响应机制提供理论支撑。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究区位于盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站,地理位置 $37^{\circ}04' \sim 38^{\circ}10' \text{ N}$, $106^{\circ}30' \sim 107^{\circ}47' \text{ E}$,属于宁夏中部干旱带,平均海拔 1 600 m,地势南高北低。北邻毛乌素沙地,南接黄土高原,由南向北从黄土高原丘陵区向鄂尔多斯台地过渡,属于典型的过渡地带。

年均温 8.1°C , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年积温为 $3\,430^{\circ}\text{C}$; 全年降水稀少,年均降水量 290 mm,主要集中在 7—9 月,期间降水量约占全年总降水量的 60%; 年蒸发量 2 132 mm。2019—2021 年盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站降水量分别为 323.1、201.5 和 249.2 mm, 7—9 月平均降水量分别为 31.7、68.3 和 44.3 mm; 无霜期约为 162 d 左右。试验区域土壤质

地多为沙壤和粉砂壤,土壤 pH 均值 8.3,肥力低下^[17]。群落以蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)为优势种^[18-19]。

1.2 试验设计

以近 40 年试验区年平均降水量和年际降水极值为依据(图 1),利用人工遮雨棚(图 2)和人工补水方式模拟 5 个不同降水梯度,分别为自然降水的 33%、66%、100%、133%、166% (记作 R33、R66、CK、R133、R166),对 33% 和 66% 减雨区,采用钢架结构和凹型长条透明塑料板通过人工遮雨的方式分别遮挡小区面积的 2/3 和 1/3; 对 133% 和 166% 增雨区,每次降雨后利用雨量筒测定降水量,按照小区面积计算增雨量,并一次性用洒水壶均匀洒到增雨区。为防止水分扩散,每个小区四周利用 1.2 m 宽的塑料板进行水分隔离,地下埋藏深度 1.1 m,地上漏出 10 cm 阻止地表径流。每个水分控制小区中心设置一个 2 m 深的 TDR 管,每半个月定点测定土壤水分。小区面积为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$,每个降水处理重复 3 次,共计 15 个小区。

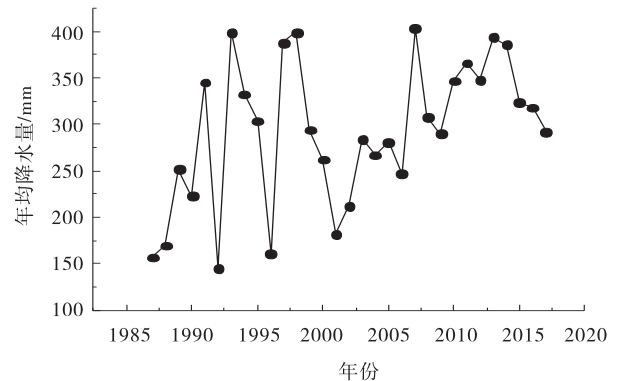


图 1 1987—2017 年盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站降水情况分布图

Fig. 1 Distribution map of precipitation in Northern Yanchi Desert Steppe Observation and Research Station of Ningxia from 1987 to 2017

1.3 测定指标与测定方法

试验于 2017 年布设完成,之后按照试验方案每次自然降雨后进行补充降水,分别在 2019—2021 年 8 月进行野外植被调查。每个小区随机选取 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方格,调查植被种类、高度、密度、频度、植被盖度、生物量等。其中,盖度采用针刺法测定,频度采用样圆法测定,样方中出现的各物种个体数量计为密度,高度以各物种的自然高度为准。将样方内植物地上部

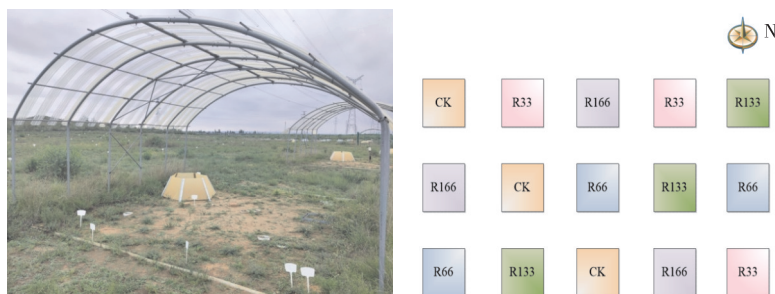


图2 试验样地设计图

Fig. 2 Test plot design

分进行分种采集并放入信封中,获得去除其他杂质后的地上材料部分;将1/4样方块内0~40 cm植物根系全部挖出,并按种类分类。将地上和地下植物材料带回实验室在流水下冲洗干净,随后放入65℃烘箱中烘干至恒重,并称重(精确至0.1 g),分别获得植物地上净初级生产力(ANPP)和地下生物量(BGB)。根据植被调查结果计算重要值和群落多样性指数,包括 Gleason 指数、Shannon 指数、Pielou 指数、Simpson 指数。同时每块样地取0~30 cm的土,每10 cm为一层,共3层,测定新鲜土壤风干后的土壤理化性质。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾滴定法测定;土壤总氮(STN)通过微量凯氏定氮消化法测定(Elementar, Vario EL III, 德国);土壤总磷(STP)采用钼蓝比色法测定^[20];通过数字 pH 计(pH400、189 Spectrum、Aurora、IL USA)以1:2.5(w/v)土壤与水的比例测量土壤 pH 值;使用 TDR(TRIME-PICO 64/32 TDR, 美国)测定土壤含水量(SWC)。

Gleason 物种丰富度是指特定空间范围内的物种丰富程度^[21],Simpson 优势度指数可以判断群落物种多样性。Shannon—Wiener 指数是通过物种数量来反映群落种类多样性,指数值越大,说明群落信息量越大^[5],Pielou 均匀度指数体现植物群落分布的均匀程度^[22]。各指标计算公式为^[22]:

Gleason 物种丰富度指数:

$$D = S / \ln A \quad (1)$$

式中: S 为群落中的总物种数, A 为样方面积。

Simpson 优势度指数:

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

式中: P_i 是物种相对重要性(由频度计算出)。物种相对重要性的计算公式为:

$$P_i = W_i / W \quad (3)$$

式中: W_i 是物种 i 的个体数, W 是样方内所有物

种数量。

Shannon—Wiener 指数:

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (4)$$

式中: P_i 为属于种 i 的个体数在全部个体中的比例。

Pielou 均匀度指数:

$$J = H' / \ln S \quad (5)$$

式中: H' 是 Shannon—Wiener 指数, S 是样方内的物种数。

1.4 数据分析和统计方法

采用 Microsoft 2016 进行数据处理和整合, SPSS 26.0 对数据进行统计分析, Origin2024 和 Canoco 5.0 作图。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)对不同降水处理下植物多样性指数和土壤养分进行比较,对土壤理化性质和 ANPP、BGB 等植被因子之间的相关性进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 降水变化对物种组成及群落多样性的影响

由表1可知,在R166和R133处理下群落物种数量相对CK均较少,R33处理下群落物种数量减少到10种。在增水处理小区骆驼蓬(*Peganum harmala*)、猪毛蒿和华北白前(*Vincetoxicum mongolicum*)重要值增加,砂珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)、牛枝子、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)和乳浆大戟(*Euphorbia esula*)重要值降低;在减水处理小区砂珍棘豆、甘草、远志、猪毛菜(*Kali collicinum*)、华北白前和骆驼蓬重要值增加,牛枝子、蒙古冰草、叉枝鸦葱(*Lipschitzia divaricata*)和乳浆大戟在减水处理后重要值有所降低(表1)。优势种牛枝子在增水处理和减水处理下重要值均减少,增水处理的减少

程度大于减水处理。此外,在 R66 处理下,甘草、猪毛菜重要值均高于 CK 对照处理,说明适当减少降水可以增加部分植物种的数量。随着降水量减少,旱生植

物甘草、砂珍棘豆和砂蓝刺头(*Echinops gmelinii*)出现 R33 处理小区中;降水增加,骆驼蓬和砂蓝刺头出现在 R166 处理小区中。

表 1 不同降水下处理下的植物重要值

Table 1 Plant important values under different precipitation treatments

科属	物种	重要值				
		R33	R66	CK	R133	R166
豆科 Leguminosae	砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	0.026 3	0	0.019 5	0	0
	牛枝子 <i>Lespedeza potaninii</i>	0.264 4	0.253 5	0.290 4	0.164 1	0.154 2
	柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	0	0	0.010 9	0	0
	甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	0.028 1	0.039 1	0.004 3	0	0
禾本科 Gramineae	蒙古冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	0.129 2	0.315 2	0.247 9	0.187 3	0.265 3
菊科 Compositae	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	0.237 7	0.226 8	0.213 6	0.429 3	0.351 5
	叉枝鸦葱 <i>Lipschitzia divaricata</i>	0	0.006 5	0.010 6	0	0.035 2
	砂蓝刺头 <i>Echinops gmelinii</i>	0.004 8	0	0	0	0.012 4
	远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	0.202 8	0.094 1	0.131 2	0.153 9	0.073 5
苋科 Amaranthaceae	猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	0.019 9	0.041 3	0.009 5	0.002 8	0.014 9
夹竹桃科 Apocynaceae	华北白前 <i>Vincetoxicum mongolicum</i>	0.057 9	0	0.007 5	0	0.036 8
白刺科 Nitrariaceae	骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	0.028 9	0	0	0.042 6	0.048 1
石蒜科 Amaryllidaceae	蒙古韭 <i>Allium mongolicum</i>	0	0	0	0.013 7	0
大戟科 Euphorbiaceae	乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	0	0.023 5	0.054 6	0.006 3	0.008 1
总物种数		10	8	11	8	10

增水处理和减水处理均能降低 Shannon—Wiener 指数(图 3-A)和 Pielou 指数(图 3-B),增水处理会降低 Gleason 指数(图 3-C)和 Simpson 指数(图 3-D)。Simpson 指数在减水处理下升高,Gleason 指数在 R66 处理下最高。不同降水处理间,除 Simpson 指数在 R66、R133 和 R166 中与其他处理有显著差异($P < 0.05$),其余指数和特征均没有显著差异。

2.2 降水变化对地上净初级生产力的影响

ANPP 值与降水量密切相关,2019 年试验区域年降水量最高,同年 ANPP 值最高(图 4,图 5)。2019 年 ANPP 在减水处理和增水处理中均增加(图 4),对增水处理的响应更明显,R166 处理下 ANPP 最高,R166 与其他降水处理间有显著差异($P < 0.05$)。2020 年 ANPP 在减水处理和增水处理中均增加,且减水处理下的 ANPP 远高于对照处理和增水处理,ANPP 在对照和增水处理下均低于其他年份,不同降水处理间无显著差异($P > 0.05$)。2021 年 ANPP 在减水处理和增水处理中均减少(图 4),且不同降水处理间没有显著差异($P > 0.05$),ANPP 在 R166 处理下高于 R133 处理,在 R66 处理下最低。

不同优势种的 ANPP 对降水变化响应差异较大

(图 6),其中远志的 ANPP 值最低。蒙古冰草 ANPP 值在减水和增水处理下均低于 CK 处理,R133 处理下最低,R166 处理高于 R133 处理。猪毛蒿在增水处理下的 ANPP 显著高于 CK 处理,在减水处理下的 ANPP 低于 CK 处理。猪毛蒿的 ANPP 值在 R133 处理下最高,R33 处理高于 R66 处理。减水处理下,远志的 ANPP 值高于对照处理和增水处理,在 R66 处理下最高。牛枝子 ANPP 值在减水处理下低于 CK 处理,在 R166 处理下最高,在 R33 处理下最低。减水处理下,除远志 ANPP 高于对照处理,其余优势种 ANPP 均低于 CK 处理;增水处理下,蒙古冰草 ANPP 低于 CK 处理,猪毛蒿 ANPP 高于 CK 处理,远志 ANPP 在 R133 处理下最高,牛枝子 ANPP 在 R166 处理下最高。不同优势种的 ANPP 值在不同降水处理间均没有显著差异。

2.3 降水变化对土壤特征的影响

SOC、STN 和 STP 在 R33 处理下均低于 CK 处理,SOC 和 STN 在 R166 处理下高于 CK 处理。SOC 在 R133 处理下最低,在 R166 处理下最高,此外随着降水量的减少,SOC 也逐渐下降(图 7-A)。STN 在 R133 处理下最低,R66 和 CK 处理下相同,在 R166 处

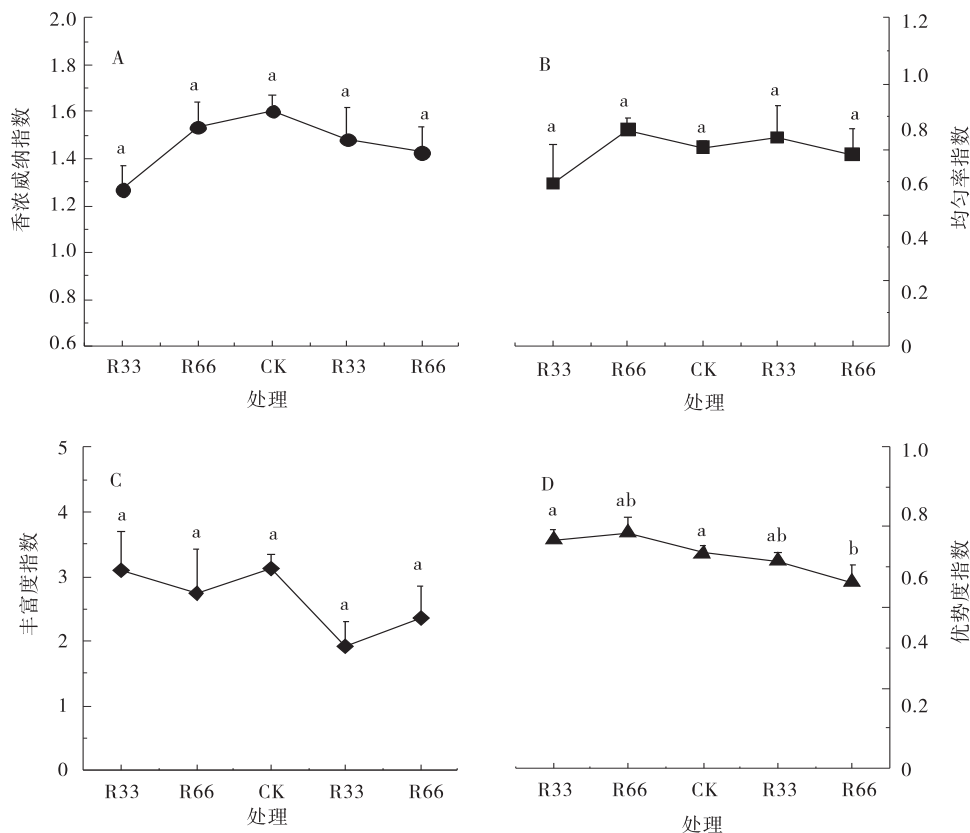


图3 不同降水处理下荒漠草原植被群落多样性指数

Fig. 3 Responses of vegetation community diversity to different precipitation treatments in desert steppe

注:小写字母代表不同降水处理下多样性指数的差异($P < 0.05$),下同。

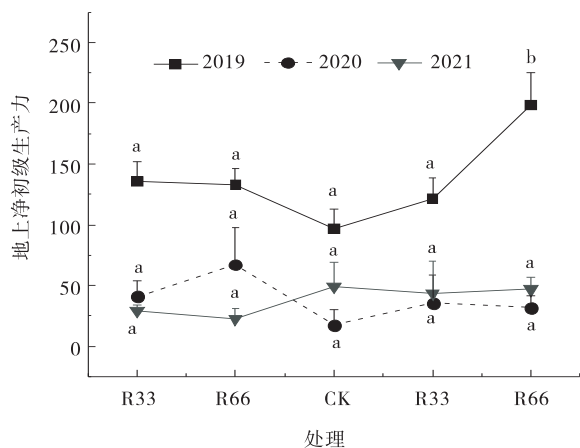


图4 不同降水处理下荒漠草原地上净初级生产力

Fig. 4 Response of above-ground net primary productivity to precipitation changes in desert steppe

理下最高。STP在R33处理下最低,R66和CK处理下最高且相同,随着降水量的增加,STP逐渐降低(图7-B)。SOC、STN、STP(图3-C)在不同降水处理下无显著差异。

土壤pH在不同降水处理间无明显变化和显著差异,在R66处理下最低(图7)。SWC在R166处理下最高,随着降水量的增加,SWC呈现先减少后增加的趋势(图7)。

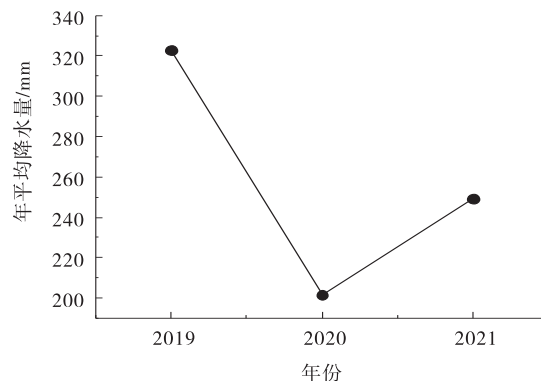


图5 2019–2021年荒漠草原宁夏野外科学观测研究站降水量

Fig. 5 Precipitation of Ningxia field scientific observation and research station in desert steppe from 2019–2021

势(图7)。SWC在R133处理下与其他处理有显著差异。

2.4 降水变化与土壤-植被相关性

通过对荒漠草原植被特征和土壤理化性质之间做冗余分析(图8)可得,SWC和BGB、ANPP、Gleason指数之间为正相关关系,与BGB相关性最大;与Simpson指数、Pielou指数和Shannon—Wiener指数之间为负相关关系。SOC和pH与Simpson指数、Glea-

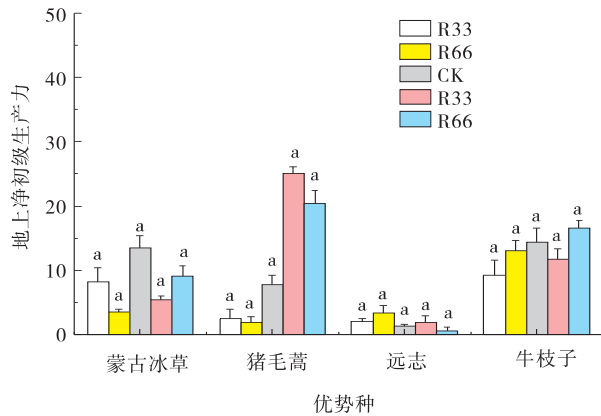


图 6 不同降水处理下荒漠草原不同优势种地上净初级生产力
Fig. 6 Response of above-ground net primary productivity of different dominant species in desert steppe to precipitation changes

son 指数、ANPP、BGB 之间为正相关关系,且 SOC 的相关性数值大于 pH;与 Pielou 指数、Shannon—Wiener 指数之间为负相关关系。STN 与 Pielou 指数呈现负相关关系,与其他植被特征因子呈现正相关关系且与 Gleason 指数的相关性最大。STP 与 ANPP、Gleason 指数、Simpson 指数、Shannon—Wiener 指数之间为正相关关系,与 ANPP 的相关性最小;STP 与 BGB、Gleason 指数之间为负相关关系。

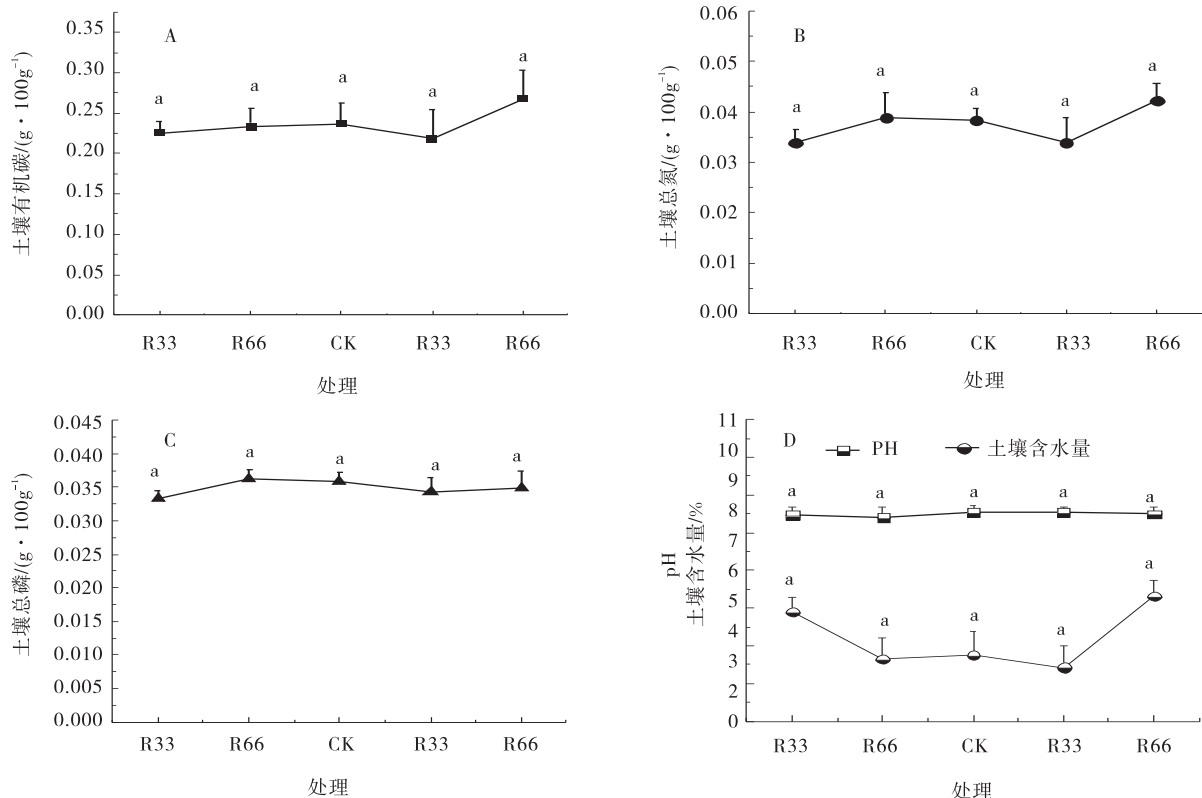


图 7 不同降水处理下荒漠草原土壤理化性质

Fig. 7 Response of desert steppe soil physical and chemical properties to different precipitation treatments

3 讨论

3.1 荒漠草原植被多样性和生产力对降水变化的响应

生物多样性是生态系统生产力的主要驱动力,是判定一个生态系统是否稳定的重要指标之一^[23],通过不同梯度的降水处理,荒漠草原生物多样性发生改变。水分是草地生态系统中最关键的限制因素^[24],同时也是最主要的有效资源,从种子萌发^[25]、幼苗生长^[26]乃至后期光合作用^[27],水分的作用始终贯穿其中,进而影响不同生长期的植物生产力^[28]。本研究结果表明,增加降水和减少降水均能减少物种数量,只是植物种类有所差别(表 1)。在干旱和半干旱草地生态系统中,物种密度低,种间竞争小^[29],水分利用方式和种间相互作用都可能对物种丰富度和群落结构产生间接影响。不同植物生长季节降水增加或减少也可能引起物种多样性变化^[30],在增加降水的过程中会提高生物量,同时引起物种组成和群落结构的变化,进而改变群落多样性^[31]。先前研究结果表明,禾草在增雨区的响应远低于减雨区,而一年生植物则相反^[32],笔者的结果与之类似,蒙古冰草对减水处理的

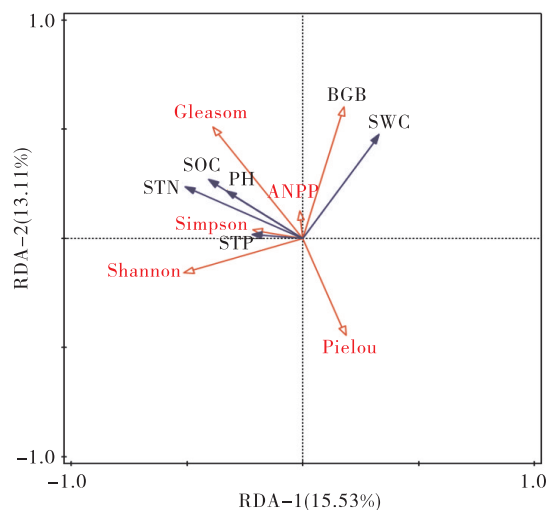


图8 荒漠草原土壤理化性质与植被特征因子的RDA排序
Fig. 8 Redundancy analysis of soil physical and chemical properties with vegetation characteristics factors in desert steppe

响应要强于增水处理,具体表现为该物种在群落中的占比变化起伏较大,同时蒙古冰草的ANPP值在R66处理下远低于对照处理。本研究发现,猪毛蒿和骆驼蓬等多年生草本植物对增水处理的响应尤为强烈,其中猪毛蒿ANPP值在增水处理下显著增加,说明多年生植物更适合在水分充足的环境中生长。不同植物对土壤中水分和有效利用元素(如氮磷钾)的吸收方式不同,导致植物群落结构和植被组成发生变化^[33],其中最明显的表现为植株盖度、生物量以及多样性指数的改变^[34]。我们的结果表明,ANPP在降水量减少时降低,而Simpson指数在增水处理下降低,这说明降水量与物种丰富度之间的正相关关系并不是一成不变的^[8],群落的组成也会随着降水时期的变化而变化^[35]。

3.2 荒漠草原土壤特征对降水变化的响应

众多学者对土壤物理和化学特性在草原生态系统中的响应进行了深入研究,但尚未获得一致的结论,除水分资源外,土壤有效资源(如氮磷钾等营养元素)、土壤质地和人为干扰等因素也对土壤物理化学特征的变化产生影响。本试验SOC、STN、SWC在R166处理下显著增加,说明一定程度的降水会刺激土壤理化性质的积累,原因可能是水分的大量增加改变了植被对水分的利用方式和效率且增加土壤微生物的活性^[36],从而改变了土壤特性^[37],实现土壤有效养分的更多积累。一项关于荒漠草原土壤盐渍化的研

究表明,随着土壤盐渍化程度加剧,土壤pH值升高而SOC和STN则降低^[38],这与本研究pH在R133处理下最高,SOC和STN在R133处理下最低结果相一致。研究表明,土壤微生物活性在较为干旱的地区(降水较少)显著降低^[39],进而导致土壤有机物质分解速率减慢^[40],植被生产力降低,这与本研究中SOC、STP、STN在R33处理下降低的结论一致,降水量的减少会阻碍植物根毛吸收土壤内营养物质^[41],也有可能降低土壤中有有机物质的积累^[2]。试验区域土壤pH整体呈弱碱性且变化幅度较小,说明降水变化对土壤pH的影响不显著,或许与试验周期较短有关,同时土壤pH也受到土壤质地、微生物和凋落物等因素的调节^[42]。本试验结果显示,土壤含水量在R133处理下减少而在R33处理下增加,这可能受样地中植被特征和凋落物影响,凋落物增加可提高表层土壤持水能力,增加土壤含水量^[43]。有研究表明^[44],在植物生长初期,由于植物对水分需求较少因此土壤水分主要依靠降水补充;在植物生长中后期,植物对水分需求量增加导致土壤水分被大量吸收,因此即使增加降水土壤含水量也会有所下降。

3.3 荒漠草原植被特征与土壤理化性质之间的关系

关于ANPP和BGB对降水变化的响应及其对降水变化敏感性的研究发现,在相同降水处理下,ANPP比BGB更敏感^[45],这与在本研究中SWC、pH、SOC、STN、STP与ANPP之间均有正相关关系,而STP与BGB呈现负相关性结果一致。Knapp曾提出双不对称模型来解释和预测不同降水量变化对ANPP的影响,即在正常自然降水范围内,ANPP对降水量是正效应的不对称响应,而在极端降水条件下,ANPP对降水量是负效应的不对称性响应^[12]。SWC、pH、SOC、STN、STP与Pielou指数之间均为负相关关系,说明不同植被特征因子对土壤理化性质的解释结果是不同的。虽然降水变化对植物—土壤互作机制产生了一定影响,但是关于环境因子如何影响土壤—植物的相关性一直没有确切的结论,比如有研究表明土壤养分与气候环境因子变化的关系在不同试验方法下可能得到不一致的结论^[46]。

4 结论

ANPP和BGB对降水变化呈现正反馈趋势;荒漠

草原增加和减少降水物种数量均会减少;短期降水变化下SOC、STP、STN等指标并未发生显著变化;降水可能通过影响SOC、STN、STP等指标间接作用于植物多样性和ANPP。

参考文献:

- [1] 董思言,高学杰. 长期气候变化——IPCC第五次评估报告解读[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 56—59.
- [2] Fry E L, Manning P, Power S A. Ecosystem functions are resistant to extreme changes to rainfall regimes in a mesotrophic grassland [J]. *Plant and Soil*, 2014, 381 (1—2): 351—365.
- [3] 李建平,张翼,罗叙,等. 荒漠草原生态系统对气候变化的生态响应[M]. 银川:宁夏人民出版社, 2021: 198.
- [4] 韩国栋,焦树英,毕力格图,等. 短花针茅草原不同载畜率对植物多样性和草地生产力的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 182—188.
- [5] 杜忠毓,安慧,文志林,等. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(6): 2359—2371.
- [6] Byrne K M, Lauenroth W K, Adler P B. Contrasting Effects of Precipitation Manipulations on Production in Two Sites within the Central Grassland Region, USA [J]. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 1039—1051.
- [7] Knapp A K, Ciais P, Smith M D. Reconciling inconsistencies in precipitation—productivity relationships: implications for climate change [J]. *New Phytologist*, 2017, 214 (1): 41—47.
- [8] Dong S, Sha W, Su X, *et al.* The impacts of geographic, soil and climatic factors on plant diversity, biomass and their relationships of the alpine dry ecosystems: Cases from the Aierjin Mountain Nature Reserve, China [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 170—177.
- [9] Chase J M, Leibold M A, Downing A L, *et al.* The effects of productivity, herbivory, and plant species turnover in grassland food webs [J]. *Ecology*, 2000, 81 (9): 2485—2497.
- [10] Wilcox K R, Shi Z, Gherardi L A, *et al.* Asymmetric responses of primary productivity to precipitation extremes: A synthesis of grassland precipitation manipulation experiments [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4376—4385.
- [11] Grime J P, Fridley J D, Askew A P, *et al.* Long-term resistance to simulated climate change in an infertile grassland [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(29): 10028—10032.
- [12] Zhang N, Liu W, Yang H, *et al.* Soil microbial responses to warming and increased precipitation and their implications for ecosystem C cycling [J]. *Oecologia*, 2013, 173 (3): 1125—1142.
- [13] 张存厚,王明玖,张立,等. 呼伦贝尔草甸草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟[J]. *草业学报*, 2013, 22(3): 41—50.
- [14] 王志鹏,张宪洲,何永涛,等. 降水变化对藏北高寒草原化草甸降水利用效率及地上生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6): 1822—1828.
- [15] 郭群,胡中民,李轩然,等. 降水时间对内蒙古温带草原地上净初级生产力的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(15): 4808—4817.
- [16] 张嘉嘉. 不同时期降雨变化对中国北方半干旱草地生态系统物种丰富度和地上净初级生产力的影响[D]. 郑州:河南大学, 2018.
- [17] 梁晓谦,李建平,张翼,等. 荒漠草原植被及土壤生态化学计量对降水的响应[J]. *草业科学*, 2022, 39(5): 864—875.
- [18] 马生花,谢应忠,胡海英,等. 荒漠草原2种典型群落类型下土壤含水量与土壤粒径分布的关系[J]. *中国水土保持*. 2019(7): 61—65.
- [19] 周静静,马红彬,周瑶,等. 荒漠草原不同带间距人工柠条林平茬对林间生境的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26 (5): 40—50.
- [20] 张静静,刘尊驰,鄢创,等. 土壤pH值变化对3种草原类型土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2021, 30(2): 69—81.
- [21] 张馨文,安慧,刘小平,等. 短期氮添加对荒漠草原植物群落组成及稳定性的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40 (8): 2400—2409.
- [22] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I α 多样性的测度方法(下) [J]. *生物多样性*, 1994(4): 231—239.
- [23] David T, Petter B R, Forest I. Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(26): 10028—10032.

- 10394—10397.
- [24] Knapp A K, Beier C, Briske D D, *et al.* Consequences of More Extreme Precipitation Regimes for Terrestrial Ecosystems[J]. *Bioscience*, 2008, 58(9): 811—821.
- [25] Stampfli A, Zeiter M. Mechanisms of structural change derived from patterns of seedling emergence and mortality in a semi-natural meadow[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(4): 516—563.
- [26] Evans S E, Byrne K M, Lauenroth W K, *et al.* Defining the limit to resistance in a drought-tolerant grassland: long-term severe drought significantly reduces the dominant species and increases ruderals[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 99(6): 1500—1507.
- [27] De Boeck H J, Lemmens C M H M, Bossuyt H, *et al.* How do climate warming and plant species richness affect water use in experimental grasslands?[J]. *Plant and Soil*, 2006, 288(1—2): 249—261.
- [28] Yahdjian L, Sala O E. Vegetation structure constrains primary production response to water availability in the Patagonian steppe[J]. *Ecology*, 2006, 87(4): 952—962.
- [29] Wu G, Zhang Z, Wang D, *et al.* Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519(B): 1362—1367.
- [30] 夏露, 张苏人, 刘培培, 等. 增温和增/减水及氮沉降对中国草地植物多样性影响的研究进展[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(4): 158—165.
- [31] Eskelinen A, Harrison S P. Resource colimitation governs plant community responses to altered precipitation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(42): 13009—13014.
- [32] Harpole W S, Potts D L, Suding K N. Ecosystem responses to water and nitrogen amendment in a California grassland[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2341—2348.
- [33] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 等. 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[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6460—6469.
- [34] 张杰琦. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落结构的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [35] Anderson T M. Plant compositional change over time increases with rainfall in Serengeti grasslands[J]. *Oikos*, 2008, 117(5): 675—682.
- [36] Von Rein I, Gessler A, Premke K, *et al.* Forest understory plant and soil microbial response to an experimentally induced drought and heat-pulse event: the importance of maintaining the continuum[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(8): 2861—2874.
- [37] Zhang W, Ren C, Deng J, *et al.* Plant functional composition and species diversity affect soil C, N, and P during secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 91—99.
- [38] 王燕, 赵哈林, 董治宝, 等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤有机碳和全氮变化特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 200—205.
- [39] Arriaga L, Maya Y. Spatial variability in decomposition rates in a desert scrub of Northwestern Mexico[J]. *Plant Ecology*, 2007, 189(2): 213—225.
- [40] Teklay T. Decomposition and nutrient release from pruning residues of two indigenous agroforestry species during the wet and dry seasons[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 77(2): 115—126.
- [41] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(4): 808—824.
- [42] 杨天成, 海春兴, 李晓佳, 等. 内蒙古典型草原区土壤理化性质对不同利用方式的响应[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(4): 139—146.
- [43] 王冬, 杨政, 郝红敏, 等. 黄土区退耕草地凋落物—土壤界面水分过程特征研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 80—84.
- [44] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 942—950.
- [45] Zhang J, Li J, Xiao R, *et al.* The response of productivity and its sensitivity to changes in precipitation: A meta-analysis of field manipulation experiments[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2021, 32(1): e12954.
- [46] Yuan Z Y, Jiao F, Shi X R, *et al.* Experimental and observational studies find contrasting responses of soil nutrients to climate change[J]. *Elife*, 2017, 6: e23255.

Response of above-ground net primary productivity to precipitation change and influence factors in desert steppe of Ningxia

ZHAO Ya-xin, ZHANG Yi, LUO Xu, WANG Yu-tao, YU Jian-fei ,
LIANG Xiao-qian, ZHOU Xin-yang, LI Jian-ping*

(College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract:【Objective】Precipitation change is a key factor affecting the characteristics of desert grassland vegetation communities in arid zones, and above-ground net primary productivity (ANPP) is an important characterization index of vegetation communities, the study of precipitation change effects on above-ground net primary productivity of desert grasslands has important practical significance for the adaptive management of desert grasslands under the background of climate change. 【Method】In this study, we took the desert grassland at the southern edge of the Mu Us Sandy Land as the research object, and simulated five different precipitation gradients by using artificial rain shelters and artificial recharge precipitation, which were 33%, 66%, 100%, 133%, and 166% of the natural precipitation (R33, R66, CK, R133, and R166), and systematic studied about the response of aboveground net primary productivity to precipitation changes in desert steppes. 【Result】The results showed that changes in precipitation affected species number and diversity index, increasing or decreasing precipitation could decrease species number. ANPP has affected by precipitation changes. ANPP of different dominant species respond differently to precipitation changes. Increasing precipitation increases the ANPP content of *Artemisia scoparia* and decreases the ANPP content of *Agropyron mongolicum*. The contents of soil organic carbon (SOC), soil total nitrogen (STN), and soil total phosphorus (STP) under R33 treatment were lower than CK treatment, while SOC and STN under R166 treatment were higher than CK treatment. Appropriate increase or decrease precipitation can reduce soil water content (SWC), among which R133 was significantly different from other treatments ($P < 0.05$). There is a positive correlation between SWC, pH, SOC, STN, STP and ANPP, while has negative correlation between STP and below-ground biomass (BGB). 【Conclusion】Desert grassland ANPP shows a positive feedback trend to precipitation, and precipitation indirectly affects ANPP by affecting community diversity, soil physical and chemical properties. The research results provide strong support for desert grassland ecosystem function assessment and adaptive management.

Key words: desert steppe; precipitation variation; vegetation; net primary productivity; soil characteristics

(责任编辑: 靳奇峰)