

DOI: 10.5846/stxb202005251334

杜忠毓, 安慧, 文志林, 王波, 张馨文. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应. 生态学报, 2021, 41(6): 2359-2371.

Du Z Y, An H, Wen Z L, Wang B, Zhang X W. Response of plant community structure and its stability to water and nitrogen addition in desert grassland. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2359-2371.

荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应

杜忠毓¹, 安 慧^{1,*}, 文志林², 王 波², 张馨文¹

1 宁夏大学 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

2 盐池县草原实验站, 盐池 751506

摘要:通过在荒漠草原开展增水和增氮野外控制试验,研究增水和增氮对荒漠草原植物群落结构、物种多样性及群落稳定性的影响。结果表明:(1)增水和增氮处理显著影响了荒漠草原植物群落结构和地上生物量,而对植物群落稳定性影响不显著($P > 0.05$)。增水处理显著增加了豆科和禾本科植物地上生物量(101.3%和57.9%)($P < 0.05$);增水+增氮处理显著增加了植物群落盖度(43.2%)和地上生物量(112.4%)及不同功能群(禾本科和杂类草)植物盖度(75.5%和47.3%)和地上生物量(139.3%和85.7%)($P < 0.05$)。与增氮处理相比,增水+增氮处理显著增加了植物群落和不同功能群(禾本科和杂类草)植物高度、盖度和地上生物量($P < 0.05$)。(2)增水、增氮和增水+增氮处理均显著降低了植物群落 Pielou 指数(11.7%、8.7%和10.2%)($P < 0.05$)。(3)增水和增水+增氮处理提高了荒漠草原植物群落稳定性,而增氮处理降低了荒漠草原植物群落稳定性。增水处理荒漠草原植物群落稳定性效应大于增水+增氮处理。研究表明,荒漠草原植物群落结构受到氮沉降和降水增加的共同影响。增加降水对荒漠草原植物群落稳定性的积极效应可能会抵消部分氮沉降的消极影响,荒漠草原植物群落地上生物量及群落稳定性可能有所增加。

关键词:荒漠草原;增水;增氮;群落结构;地上生物量;群落稳定性

Response of plant community structure and its stability to water and nitrogen addition in desert grassland

DU Zhongyu¹, AN Hui^{1,*}, WEN Zhilin², WANG Bo², ZHANG Xinwen¹

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China/Ministry of Education Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Grassland Experiment Station of Yanchi, Yanchi 751506, China

Abstract: Desert grassland is predicted to be responsive to global climate change, such as increased atmospheric nitrogen deposition and precipitation. The structure, function and stability of plant community in desert grassland are often directly and indirectly affected by increased nitrogen deposition and precipitation. However, the response mechanism of plant community structure and stability in desert grassland to increase nitrogen deposition and precipitation are still not clear. We conducted the field experiments with water and nitrogen addition in desert grassland of Ningxia, China. We assessed the effects of increased atmospheric nitrogen deposition and precipitation on the plant community structure, species diversity and the plant community stability. The field experiment was conducted with four treatments, including control (CK), water addition (W), nitrogen addition (N), and water addition+nitrogen addition (W+N). We found that: (1) the plant

基金项目:国家自然科学基金项目(31960244);宁夏自然科学基金项目(2020AAC03292);宁夏回族自治区西部一流学科项目(NXYLXK2017B06)

收稿日期:2020-05-25; 网络出版日期:2021-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: anhui08@163.com

community structure and aboveground biomass were effected significantly by water and nitrogen addition in desert grassland, but the plant community stability were not changed significantly ($P>0.05$). The plant aboveground biomass of Leguminosae and Gramineae were increased significantly by water addition (101.3% and 57.9%) ($P<0.05$). The coverage and aboveground biomass of plant community were significantly increased by 43.2% and 112.4% under water and nitrogen addition together, respectively. Water and nitrogen addition together also significantly increased the coverage (75.5% and 47.3%) and aboveground biomass (139.3% and 85.7%) of Leguminosae and Gramineae ($P<0.05$). Compared with nitrogen addition, water and nitrogen addition together significantly increased the height, coverage, aboveground biomass of plant community and different functional groups (Leguminosae and Gramineae) ($P<0.05$). (2) The Pielou index of plant community was decreased significantly by water addition, nitrogen addition, water and nitrogen addition together (11.7%, 8.7% and 10.2%) ($P<0.05$). (3) Plant community stability was improved by water addition, water and nitrogen addition together in desert grassland, while reduced by nitrogen addition. The effect of plant community stability by water addition was better than that of water and nitrogen addition together. The results indicated that the plant community structure would be affected by nitrogen deposition and precipitation increment in desert grassland. The positive effects of the increased precipitation on plant community stability in desert grassland may potentially offset negative effects of nitrogen deposition. Increased precipitation might lead to the increase of plant community aboveground biomass and plant community stability in desert grassland.

Key Words: desert grassland; water addition; nitrogen addition; community structure; aboveground biomass; community stability

全球气候变化正不断影响着陆地生态系统,例如大气氮(N)沉降量的增加^[1]、降水格局的改变和极端气候事件的频发^[2]。随着经济、农业等的进一步发展,未来中国区域的氮沉降量可能会继续增加^[3]。适当的氮沉降可以补充土壤养分,在一定程度上能够缓解植物生长所受到的氮限制,对植物地上部生长起到良好的促进作用^[4]。但过量的氮沉降则会导致氮富集、引起土壤酸化,影响土壤微生物的活性以及植被和土壤碳氮的再分配^[5],改变植物群落结构及其物种多样性^[6-7],导致植物群落稳定性发生变化^[8-9],对植物群落及生态系统的功能和服务产生负效应^[10]。大气氮沉降往往会受到降水的影响,根据预测,在未来的100年内降水格局(时间和空间)和降水事件(极端降水)均会发生变化,例如中国北方的降水量可能会增加30—100 mm^[11],且降水量的增减趋势在不同地区存在差异,极端降水事件的频发会导致降水格局年内和年际变异增大^[12]。草地生态系统对气候变化十分敏感,该区植物群落结构和功能及其稳定性往往会受到氮沉降和降水量增加的直接或间接影响^[13-14]。然而草地植物群落结构及其稳定性对氮沉降和降水量增加的响应机制仍然不清楚,研究氮沉降和降水量增加对草地植物群落结构及其稳定性的影响具有重要意义,这有助于我们理解草地植物群落对全球气候变化的适应策略。

草地是陆地生态系统的重要组成部分,具有调节气候、涵养水源、防风固沙、改良土壤、保护生物多样性等生态服务和功能^[15]。近年来,全球气候变化和人为干扰加剧,草地植物群落面临着稳定性下降和功能衰退等诸多问题^[16-17]。草地植物群落的稳定是草地植物群落存在的必要调节和重要功能的表现^[18-19],对草地生态系统的可持续发展具有积极意义。在全球气候变化背景下,氮沉降和降水量的增加对草地生态系统植物的生长及其结构与功能起着复杂的调控作用^[20],改变着草地植物群落物种多样性和生产力进而影响群落的稳定性^[14]。研究表明,施肥对植物群落稳定性的影响与物种多样性有直接关系,往往会伴随物种多样性的增加(减小)而增加(减小)^[21]。氮添加后植物群落物种多样性和稳定性均降低^[22]。也有研究表明植物群落稳定性与物种多样性并非具有直接的相关性,而是一种虚假相关导致物种丰富度下降而植物群落稳定性增加^[23]。水分也是影响干旱区植物群落稳定性的重要因素之一^[24]。有研究显示内蒙古草原植物群落稳定性与年降雨量呈显著正相关^[25]。也有研究表明增加降雨对草地植物群落稳定性没有显著影响,可能是研究空间尺度大

小和持续时间的差异等原因造成的^[26]。因此,环境资源的变化对草地植物群落稳定性的影响存在着不确定性。

荒漠草原是草原向荒漠过渡的旱生化草原生态系统,是干旱、半干旱地区陆地生态系统的主体部分,也是对气候变化和人类干扰敏感性较高的生态系统。荒漠草原植物群落结构及其稳定性对该区生态系统功能和服务具有重要影响。目前增水和增氮对荒漠草原植物群落影响的研究多集中于群落结构特征^[27]、凋落物分解^[28]、土壤呼吸^[29]、土壤微生物群落结构^[30]及土壤化学计量特征^[31-32]等方面。关于增水、增氮及其交互作用对荒漠草原植物群落稳定性的研究较少,荒漠草原植物群落稳定性对增水和增氮的响应亟需进一步研究。鉴于此,本研究以宁夏盐池县荒漠草原为研究对象,探讨荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮及其交互作用的响应。拟解决以下科学问题:(1)荒漠草原植物群落结构及不同功能群(豆科、禾本科和杂类草)植物对增水和增氮如何响应?(2)增水和增氮对荒漠草原植物群落物种多样性及其群落稳定性将会产生什么样的影响?以期干旱、半干旱地区荒漠草原生态系统的可持续健康发展和管理提供理论支撑与实践依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在宁夏回族自治区盐池县的宁夏农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站的荒漠草原内进行。该站位于鄂尔多斯台地向黄土高原过渡带,是荒漠向典型草原的过渡区域(37°31'N, 106°93'E, 海拔1523 m)。地处气候属中温带大陆性气候,年均气温7.6℃,年均无霜期165 d。年均降水量约300 mm,其中70%以上降水集中在6—9月,降水年际变化率大,年均蒸发量约2384 mm。土壤结构松散,肥力低下,土壤pH为8.4,土壤有机碳含量为6.17 g/kg,全氮含量为0.63 g/kg,全磷含量为0.30 g/kg,全钾含量为14.35 g/kg,碱解氮为36.14 mg/kg,速效磷为4.25 mg/kg,速效钾为174.10 mg/kg,主要以灰钙土、淡灰钙土为主。该区植被类型有草原、沙地和荒漠植物,群落中常见的植物种类以旱生和中旱生类型为主,主要有草原霞草(*Gypsophila davurica*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)、短翼岩黄耆(*Hedysarum brachypterum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。干旱少雨且基质较差,植物生长矮小,群落层片结构多呈单层。

1.2 试验设计

2017年8月选择地势平坦的荒漠草原进行围封并建立全球变化联网试验样地。2018年5月选择全球联网试验样地的增水(W)和增氮(N)处理进行实验,包括对照(CK)、增水(W)、增氮(N)和增水+增氮(W+N)4个处理,每个处理6次重复,共计24个样方。实验采用完全随机区组设计,每个样方面积为6 m×6 m,样方间均设置有2 m宽的缓冲带。采用全球草地生态系统营养物研究网络(Nutrient Network, NutNet; <http://nutnet.umm.edu/>)的试验设计^[33],每年N的添加量为10 g/m²,为树脂包膜尿素[(NH₂)₂CO]。2018和2019年5月初将(NH₂)₂CO在降雨前进行均匀撒施。增水处理在自然降水量的基础上增加50%的降水。计算每次的自然降水量,于2018和2019年每年5—10月对所有增水处理的6 m×6 m样方进行均匀增水。并在增水样方四周均用防锈铁皮埋深100 cm,且高出地面15 cm以防止样方内外表层水分径向流动。

1.3 测定方法

2019年8月下旬进行植被调查,并采用收获法对地上生物量进行收获。为避免边缘效应,实验均在每个样方的核心区(4 m×4 m)内进行,核心区内设置1个1 m×1 m的永久固定小样方用于植被调查。调查永久固定小样方内植物的物种数、个体数、高度和盖度等指标。盖度利用1 m×1 m网络状样方格进行测定。并在每个样方核心区内另设置2个0.2 m×1 m小样方用于植物地上生物量的测定。将0.2 m×1 m小样方内所有植物分物种收集,在60℃下烘48 h至恒重后将地上生物量按物种进行称重(精度为0.01 g),对同一样方的2个0.2 m×1 m小样方内各个物种的干物质质量累加计算样方地上生物量(g/m²)。样地内植物以恩格勒分类系

统中的科为单位进行功能群划分,划分为豆科植物、禾本科植物和杂类草 3 个功能群。

1.4 数据计算

1.4.1 物种多样性指标

物种丰富度是指一定空间范围内分布的物种数量的多寡。Shannon-Wiener 指数是基于物种数量反映植物群落种类多样性,可以描述种的个体出现的紊乱和不确定性,植物群落中植物种类增多代表了群落的复杂程度增高,指数值越大,群落所含的信息量越大。Pielou 指数反映植物群落的均匀程度,利用各站点的物种奇异性,估计该植物群落物种分布的均匀程度^[34]。本研究物种多样性采用植物群落物种丰富度(R)、Shannon-Wiener 指数(H')、和 Pielou 指数(J)表示。其计算公式^[34]为:

重要值(IV):

$$IV = (RH + RC + RB)/3 \quad (1)$$

式中, RH 为相对高度; RC 为相对盖度; RB 为相对多度。

物种丰富度(R):

$$R = S \quad (2)$$

Shannon-Wiener 指数(H'):

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

Pielou 指数(J):

$$J = H'/\ln S \quad (4)$$

式中, S 为 1 m^2 样方内所有植物物种数; P_i 为物种 i 个体数占样方中所有物种个体的比率, $P_i = N_i/N$, N_i 为物种 i 的个体数, N 为样方中所有物种个体数之和。

1.4.2 荒漠草原植物群落稳定性

(1) 植物群落稳定性以群落物种密度变异系数(Coefficient of variation, CV)的倒数(ICV)表示^[35]:

$$ICV = \mu/\sigma \quad (5)$$

其中, μ 是样方中各物种的平均密度, σ 是各物种密度的标准差。ICV 的值越小,植物群落稳定性越差;反之,植物群落稳定性越高。

(2) 植物群落 Godron 稳定性:

综合郑元润^[36]和罗久富等^[24]对 Godron 稳定性^[37]测定方法改进后的数学方法,利用植被盖度进行度量植物群落结构的稳定性^[38]。并将一元二次方程改为一元三次方程进行拟合,以提高拟合精确度^[39]。先将样方中不同植物的盖度由大到小排序,换算成相对盖度后,将相对盖度按照由大到小顺序逐步累加,即为累积相对盖度(y);然后将样方内植物总和取倒数,按照植物种类顺序逐步累积,即为种累积百分数(x)。以种累积百分数为横轴 x ,累积相对盖度为纵轴 y ,并将各个物种对应的点(x, y)作图,最后利用曲线方程进行拟合,同时做直线 $y = 100-x$,其与平滑曲线的交点即为植物群落稳定性参考点。具体公式如下:

$$RC_i = C_i/C_T \quad (6)$$

RC_i 表示第 i 个物种的相对盖度, C_i 为第 i 个物种的盖度, C_T 为样方物种总盖度。

$$x = \sum_{i=1}^S \frac{1}{S} \quad (7)$$

x 为种累积百分数, i 代表第 i 个物种, S 为总物种数。

$$y = \sum_{i=1}^S RC_i \quad (8)$$

y 为累积相对盖度, RC_i 为第 i 个物种的相对盖度, S 为总物种数。

直线方程为:

$$y = 100 - x \quad (9)$$

平滑曲线拟合方程与直线方程联立,解得 x 值后,选取 x, y 均为实数且大于 0 的结果,计算交点坐标 (x, y) 与稳定点 $(20, 80)$ 间的欧氏距离^[40]。该距离越短,表明该交点坐标越接近稳定参考点 $(20, 80)$,表明植物群落越稳定;反之,则越不稳定。

增水、增氮、增水+增氮处理对荒漠草原植物群落稳定性影响效应利用响应比 (Response ratio, RR) 进行衡量^[41]:

$$RR = \ln(X_t/X_c) = \ln X_t - \ln X_c \quad (10)$$

式中: X_c 为对照, X_t 为处理,同时计算响应比(RR)的95%置信区间(95% CI)。若响应比大于0且95%置信区间不包括0,则表明处理对植物群落稳定性具有显著正效应;若响应比小于0且95%置信区间不包括0,则表明处理对植物群落稳定性具有显著负效应;如果95%置信区间包括0,则表明处理对植物群落稳定性无显著影响。

1.5 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析。用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 和单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对荒漠草原植物群落总盖度、地上生物量、物种多样性及不同功能群 (豆科、禾本科和杂类草) 植物高度、多度、盖度、物种重要值、地上生物量进行差异分析。统计分析前均对数据进行正态分布和方差齐次性检验。本研究中所有数据均通过检验,利用最小显著性差异法 (LSD) 多重比较检验组间差异;所有检验显著水平均为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 增水和增氮对荒漠草原植物群落高度、多度和重要值的影响

增水显著影响植物群落高度、豆科植物和杂类草植物高度及杂类草的多度,增氮对禾本科植物多度影响显著,增氮和增水对植物群落高度和豆科植物高度具有显著交互作用 (表 1, $P<0.05$)。与增氮处理相比,增水+增氮处理显著增加植物群落高度和不同功能群植物高度 (豆科、禾本科植物和杂类草) (图 1, $P<0.05$)。与对照相比,增水+增氮处理使杂类草植物高度显著提高了 19.5% (图 1, $P<0.05$)。增氮处理使禾本科植物多度显著降低了 16.2%,增水+增氮处理使植物群落多度和禾本科植物多度分别显著降低了 15.9% 和 22.1% (图 1, $P<0.05$)。

表 1 增水和增氮对荒漠草原群落和不同功能群植物高度、多度和重要值影响的方差分析 (P)

Table 1 Results of Two-way ANOVA of the effects of water and nitrogen addition on height, abundance and importance value of plant community and different functional groups in desert grassland (P)

处理 Treatment	高度 Height				多度 Abundance				物种重要值 Species important value		
	群落 Community	豆科 Leguminosae	禾本科 Gramineae	杂类草 Forbs	群落 Community	豆科 Leguminosae	禾本科 Gramineae	杂类草 Forbs	豆科 Leguminosae	禾本科 Gramineae	杂类草 Forbs
W	0.024	0.043	0.080	0.014	0.088	0.662	0.196	0.043	0.488	0.949	0.634
N	0.768	0.748	0.862	0.715	0.068	0.050	0.013	0.773	0.031	0.921	0.216
W×N	0.025	0.024	0.050	0.077	0.676	0.061	0.808	0.679	0.444	0.663	0.979

W: 增水 Water addition; N: 增氮 Nitrogen addition

增氮处理豆科植物重要值显著降低 (表 1, 图 2, $P<0.05$)。增水、增氮和增水+增氮处理使禾本科植物重要值增加 (图 2)。与对照相比,增水和增氮处理植物群落物种数均由 15 种降低至 14 种,而增水+增氮处理植物群落物种数由 15 种增加至 17 种 (表 2)。群落中不同植物对增水和增氮处理的响应不一致,增水、增氮及增水+增氮处理后猫头刺 (*Oxytropis aciphylla*)、砂蓝刺头 (*Echinops gmelinii*) 和沙葱 (*Allium mongolicum*) 消失,

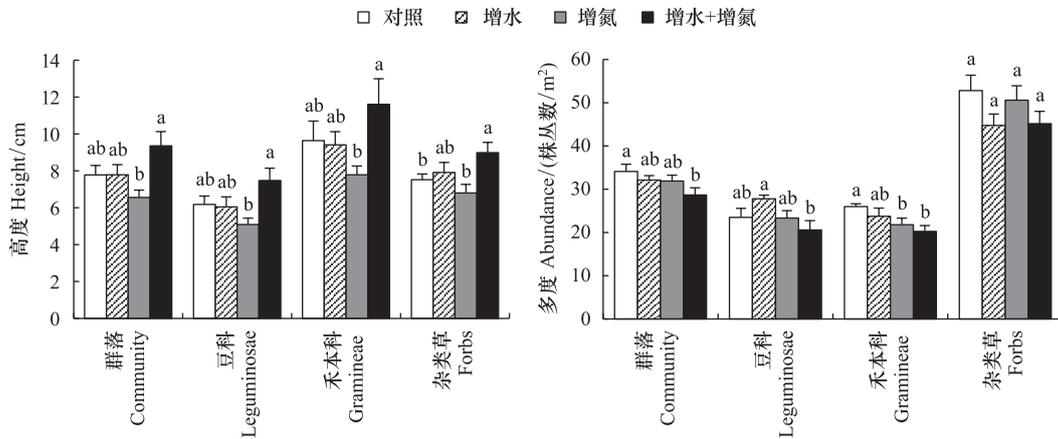


图1 增水和增氮对荒漠草原植物群落和不同功能群植物高度及多度的影响(平均值±标准误差)

Fig.1 Effects of water and nitrogen addition on height and abundance of plant community and different functional groups in desert grassland (Mean±SE)

不同小写字母表示不同处理的植物群落和同一功能群植物高度和多度差异显著;W: 增水 Water addition; N: 增氮 Nitrogen addition

达乌里胡枝子重要值降低,草原霞草和冬青叶兔唇花(*Lagochilus ilicifolius*)重要值增加(表2)。

2.2 增水和增氮对荒漠草原植物群落盖度和地上生物量的影响

增水、增氮显著影响植物群落盖度和不同功能群(豆科、禾本科和杂类草)植物盖度,增水与增氮对植物群落盖度、禾本科和杂类草植物盖度有显著交互作用(表3, $P < 0.05$)。增水+增氮处理植物群落盖度、禾本科和杂类草植物盖度分别显著增加了43.2%、75.5%和47.3%(图3, $P < 0.05$)。增氮处理豆科植物盖度显著降低了44.6%(图3, $P < 0.05$)。增水显著影响植物群落地上生物量、豆科和禾本科植物地上生物量,而增氮显著影响植物群落地上生物量、禾本科植物和杂类草植物地上生物量(表3, $P < 0.01$)。除禾本科植物外,增水和增氮对植物群落地上生物量和不同功能群(豆科和杂类草)植物地上生物量具有显著交互作用(表3, $P < 0.05$)。

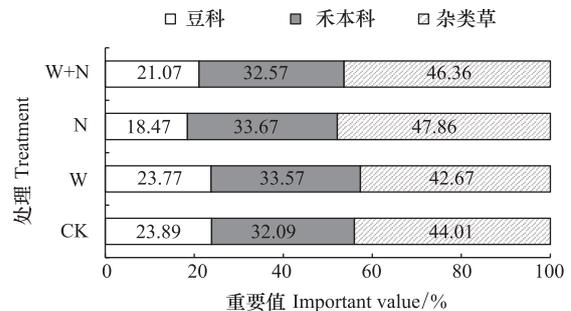


图2 增水和增氮对荒漠草原不同功能群植物重要值的影响
Fig.2 Effects of water and nitrogen addition on importance value of different functional groups plant in desert grassland

增水+增氮处理使植物群落地上生物量、豆科植物、禾本科植物和杂类草植物地上生物量分别显著增加了112.4%、50.1%、139.3%和85.7%,增水处理使豆科和禾本科植物地上生物量分别显著增加了101.3%和57.9%(图3, $P < 0.05$)。增氮处理杂类草植物地上生物量显著增加了33.3%(图3, $P < 0.05$)。

表2 增水和增氮对荒漠草原植物群落物种组成及其重要值的影响

Table 2 Effects of water and nitrogen addition on species composition and importance value of plant community in desert grassland

功能群 Functional group	物种 Species	CK	W	N	W+N
豆科 Leguminosae	短翼岩黄耆 <i>Hedysarum brachypterum</i>	0.118	0.127	0.119	0.109
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	0.215	0.203	0.115	0.202
	砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	0.040	0.036	0.026	0.008
	猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	0.016	—	—	—
禾本科 Gramineae	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	0.031	—	0.035	0.040
	短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	—	0.061	—	—

续表

功能群 Functional group	物种 Species	CK	W	N	W+N
杂草类 Forbs	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	0.377	0.347	0.375	0.366
	阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	0.191	0.170	0.157	0.149
	米蒿 <i>Artemisia dalai-lamae</i>	0.168	0.158	0.139	0.172
	薊 <i>Cirsium japonicum</i>	—	—	—	0.019
	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	—	—	0.013	0.032
	砂蓝刺头 <i>Echinops gmelinii</i>	0.009	—	—	—
	草原霞草 <i>Gypsophila davurica</i>	0.310	0.321	0.324	0.380
	冬青叶兔唇花 <i>Lagochilus ilicifolius</i>	0.090	0.099	0.156	0.097
	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	—	0.001	0.023	0.025
	远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	0.040	0.024	—	—
	银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	—	0.012	—	0.014
	北芸香 <i>Haplophyllum dauricum</i>	0.093	0.109	0.091	0.104
	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0.057	0.016	0.038	0.011
	牛心朴子 <i>Cynanchum hancockianum</i>	—	—	0.057	0.032
	沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	0.023	—	—	—
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	—	—	—	0.006	
总物种数 Total number of species		15	14	14	17

—:代表该物种在本处理中不存在

表 3 增水和增氮对植物群落和不同功能群落植物盖度及地上生物量影响的方差分析

Table 3 Results of Two-way ANOVA of the effects of water and nitrogen addition on coverage and aboveground biomass of plant community and different functional groups in desert grassland

处理 Treatment	盖度 Coverage				地上生物量 Aboveground biomass			
	群落 Community	豆科 Leguminosae	禾本科 Gramineae	杂类草 Forbs	群落 Community	豆科 Leguminosae	禾本科 Gramineae	杂类草 Forbs
W	<0.001	0.003	0.001	0.018	<0.001	<0.001	<0.001	0.052
N	0.013	0.001	0.001	0.003	<0.001	0.192	0.001	<0.001
W×N	0.021	0.157	0.008	0.019	0.042	0.004	0.205	0.009

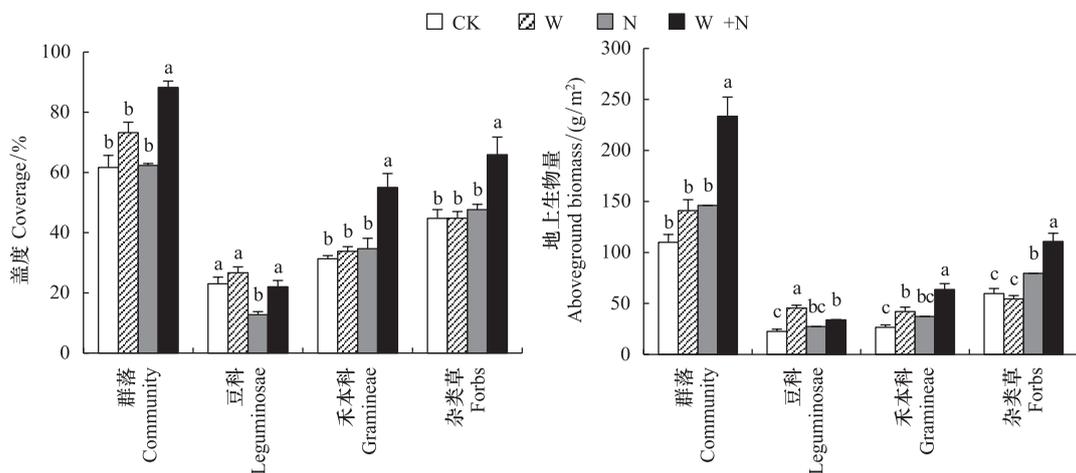


图 3 增水和增氮对荒漠草原植物群落及不同功能群植物盖度和地上生物量的影响

Fig.3 Effects of water and nitrogen addition on coverage and aboveground biomass of plant community and different functional groups in desert grassland

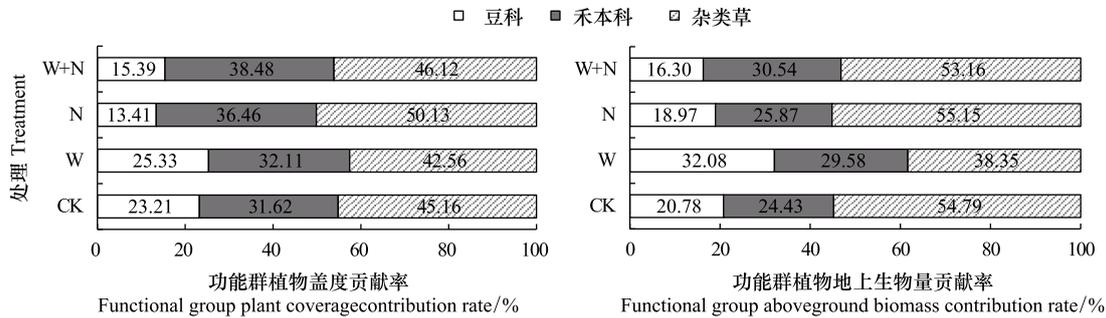


图4 增水和增氮对荒漠草原不同功能群植物盖度和地上生物量贡献率的影响

Fig.4 Effects of water and nitrogen addition on the percentage of coverage and aboveground biomass of different functional groups in desert grassland

增氮、增水+增氮处理降低了豆科植物对植物群落盖度和地上生物量的贡献率,增加了禾本科植物对植物群落盖度和地上生物量的贡献率(图4)。增水处理增加了豆科、禾本科植物对植物群落盖度和地上生物量的贡献率,降低了杂类草植物对植物群落盖度和地上生物量的贡献率(图4)。

2.3 增水和增氮对荒漠草原植物群落物种丰富度、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数的影响

增水、增氮及其交互作用显著影响植物群落 Pielou 指数(表4, $P < 0.05$)。增水处理植物群落物种丰富度增加,增氮和增水+增氮处理植物群落物种丰富度下降(图5)。不同处理后植物群落 Shannon-Wiener 指数均有所降低(图5)。增水、增氮及增水+增氮处理显著降低了植物群落 Pielou 指数(11.7%、8.7%和 10.2%)(图5, $P < 0.05$)。

表4 增水和增氮对荒漠草原植物群落物种多样性指数和稳定性影响的方差分析

Table 4 Results of Two-way ANOVA of the effects of water and nitrogen addition on plant community species diversity index and plant community stability in desert grassland

处理 Treatment	物种丰富度 Species richness	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 指数 Pielou index	植物群落稳定性 Stability of plant community
W	0.763	0.188	0.010	0.046
N	0.920	0.331	0.141	0.123
W×N	0.275	0.736	0.041	0.782

2.4 增水和增氮对荒漠草原植物群落稳定性的影响

增水显著影响植物群落稳定性(表4, $P < 0.05$)。与增水处理相比,增氮处理显著降低了植物群落稳定性(图6, $P < 0.05$)。增水和增水+增氮处理提高了植物群落稳定性,而增氮处理降低了植物群落稳定性(图6)。增水和增水+增氮处理对植物群落稳定性有正效应,且增水处理植物群落稳定性效应高于增水+增氮处理,而增氮处理对植物群落稳定性有负效应(图6)。

对照的稳定性拟合曲线与直线交点坐标为(27.22, 72.78)(表5, 图7),与植物群落稳定参考点(20, 80)的欧式距离为 10.21。增水和增水+增氮处理的稳定性拟合曲线与直线的交点坐标分别为(26.09, 73.91)和(26.31, 73.69),与植物群落稳定参考点(20, 80)的欧式距离分别为 8.61 和 8.92(表5, 图7),增水和增水+增氮处理的稳定性拟合曲线与直线的欧式距离均小于对照。增氮处理的稳定性拟合曲线与直线的交点坐标为(33.23, 66.77),交点坐标与植物群落稳定参考点(20, 80)间的欧式距离为 18.71(表5, 图7),大于对照的欧式距离。Godron 稳定性与 ICV 稳定性结果一致,与对照相比,增水和增水+增氮处理增加了植物群落稳定性,而增氮处理降低了植物群落稳定性。

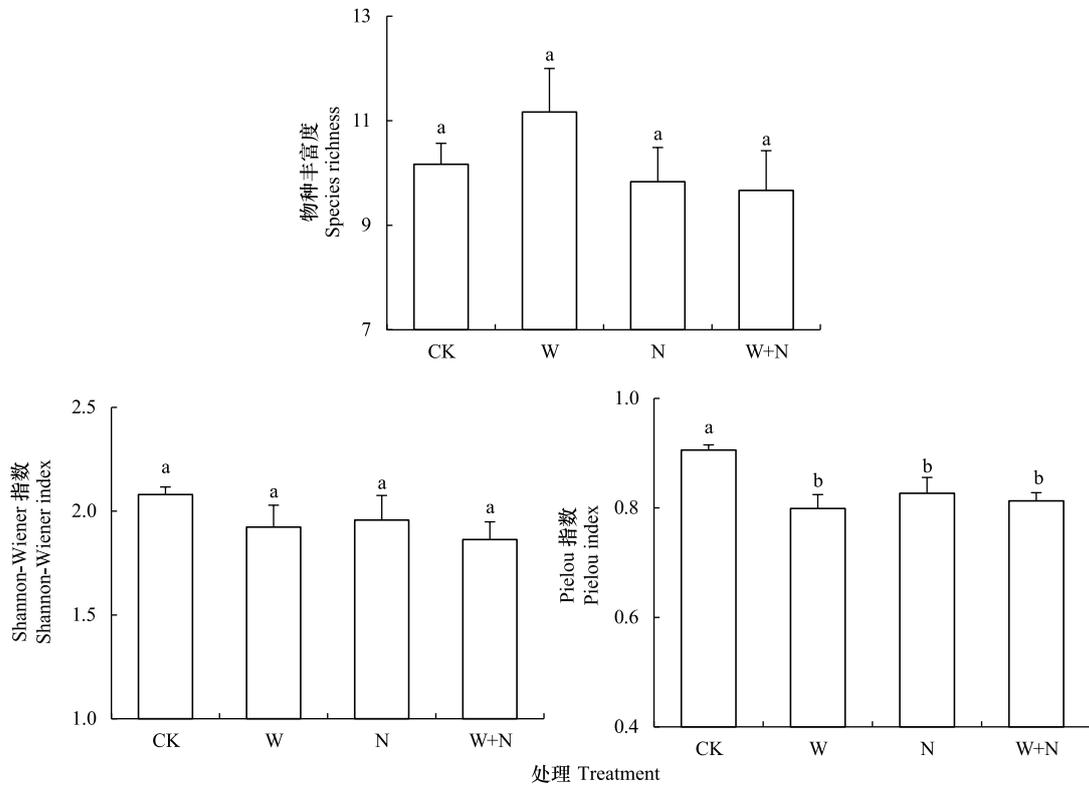


图 5 增水和增氮对荒漠草原植物群落物种多样性指数的影响

Fig.5 Effects of water and nitrogen addition on species diversity index of plant community in desert grassland

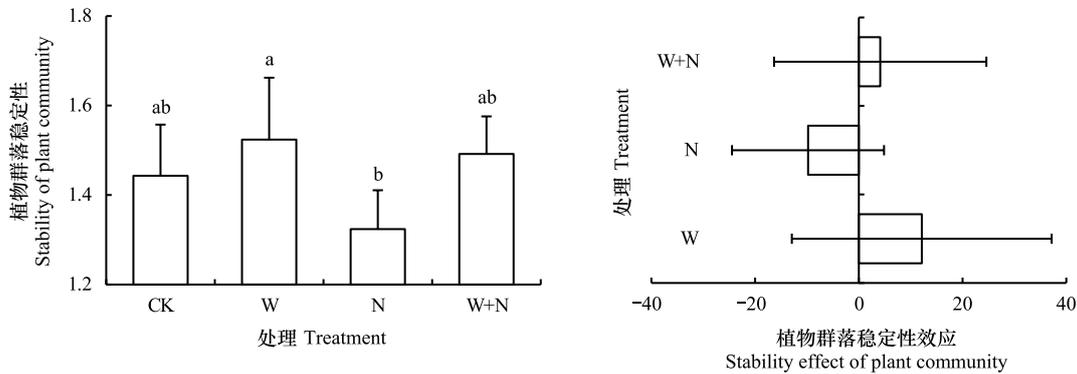


图 6 增水和增氮对荒漠草原植物群落稳定性及其效应的影响

Fig.6 Effects of water and nitrogen addition on plant community stability and stability effects in desert grassland

表 5 增水和增氮对荒漠草原植物群落稳定性的影响(Godron 法)

Table 5 Effects of water and nitrogen addition on plant community stability in desert grassland(Godron's method)

处理 Treatment	拟合曲线 Fitting curve	R^2	交点坐标 Intersection coordinates	欧氏距离 Euclidean distance
CK	$y = 0.0002x^3 - 0.0495x^2 + 3.6606x + 5.7778$	0.999	(27.22, 72.78)	10.21
W	$y = 0.0002x^3 - 0.0490x^2 + 3.7239x + 6.5599$	0.999	(26.09, 73.91)	8.61
N	$y = 0.00003x^3 - 0.0180x^2 + 2.3984x + 5.8355$	0.999	(33.23, 66.77)	18.71
W+N	$y = 0.0002x^3 - 0.0521x^2 + 3.7794x + 6.6792$	0.994	(26.31, 73.69)	8.92

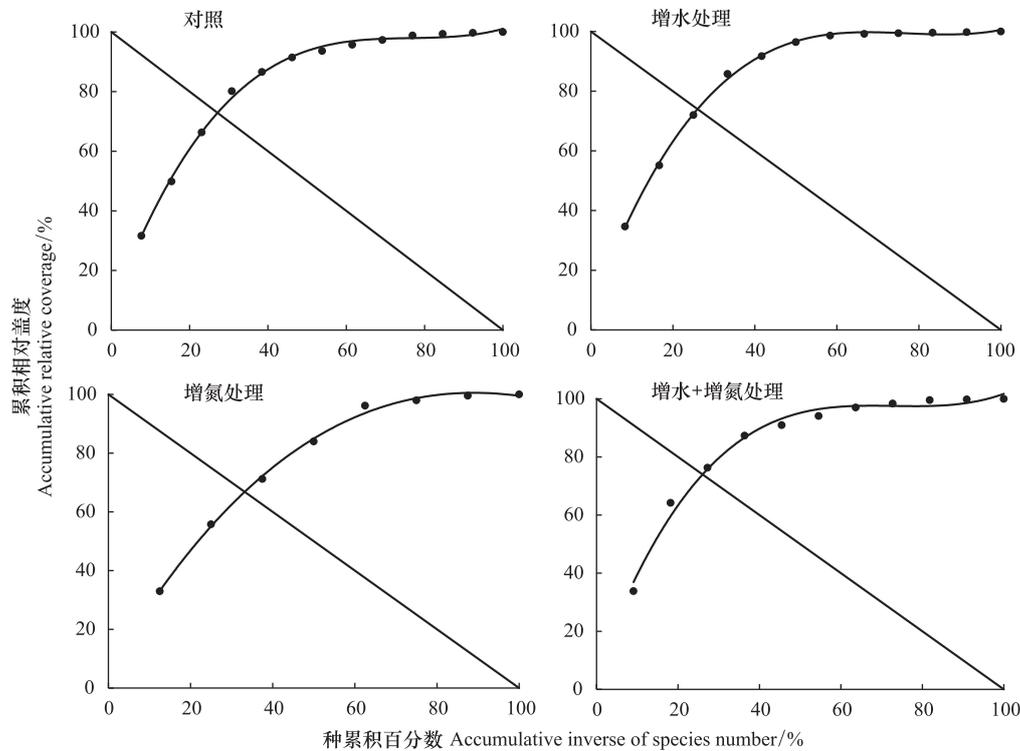


图7 增水和增氮处理荒漠草原植物群落 Godron 稳定性拟合曲线

Fig.7 Godron stability simulated curves of plant community under water and nitrogen addition in desert grassland

3 讨论

3.1 增水和增氮对荒漠草原植物群落结构及地上生物量的影响

增氮增加了土壤中的有效资源,能够恢复和提高土壤肥力;增水能促进氮肥肥效的释放,增水和增氮能够促进植物的生长。研究表明,增水和增氮能显著增加典型草原和荒漠草原植物群落的地上生物量^[42-43],这与本研究中增水+增氮处理显著提高植物群落及不同功能群(豆科、禾本科和杂类草)植物地上生物量的结果一致。但不同植物对土壤中水分和有效氮的吸收利用方式和敏感性的不同,导致植物群落结构发生不同的变化^[42]。其最直接的表现是植物群落的盖度和地上生物量及不同植物重要值的变化^[44-45]。本研究中,增水+增氮处理后群落中豆科植物盖度和重要值降低,禾本科和杂类草植物盖度和重要值增加;尽管增水+增氮处理群落不同功能群(豆科、禾本科和杂类草)植物地上生物量均显著增加,但豆科植物、禾本科植物和杂类草植物的地上生物量增加量不一致(分别增加了50.1%、139.3%和85.7%),其中禾本科植物地上生物量增加最高。可能是因为本研究中增水+增氮处理后禾本科和杂类草植物盖度与豆科植物盖度相比更高,并且禾本科植物的平均高度与豆科植物和杂类草植物相比更高(图1),能够获得更多的光资源,导致禾本科植物生长速度加快^[46],最终使得禾本科植物在群落中处于优势地位。长期以来,荒漠草原因地处较低的可利用性水分区而导致其对增水十分敏感^[47]。增水不仅有助于土壤中氮肥肥效的发挥^[42],而且还可通过调节土壤微生物的活性和功能,改善土壤结构,促进土壤环境的良性发展^[44],进而加快陆地的碳循环^[30],促进植物对土壤有效养分的吸收,有利于植物的生长。本研究中,增水+增氮处理增加了禾本科植物对植物群落盖度和地上生物量的贡献率,这可能是由于禾本科植物对增加的营养资源具有充分高效的利用能力,例如其对土壤中有效氮具有较高的利用效率^[45-46]。本研究中增水+增氮处理降低了豆科植物对群落盖度及豆科植物和杂类草植物对群落地上生物量的贡献率。这也说明禾本科植物与豆科植物和杂类草植物相比对土壤中有效氮具有更高的利用效率,其能够在资源竞争中占据优势地位,进而导致豆科植物和杂类草植物地上生物量对群落地上生

物量的贡献率下降。

3.2 增水和增氮对荒漠草原植物群落丰富度和物种多样性的影响

植物群落较高的物种多样性能够促进生态系统的稳定,使草地生态系统稳定和健康发展^[41,48]。然而,植物群落物种多样性的变化往往会受到土壤有效资源等多重因素的影响,其对于土壤有效资源变化响应的机理较为复杂。众多学者通过施肥等野外控制方式研究植物群落物种多样性对土壤有效资源变化的响应,但至今未能达成一致的结论。多数研究认为施肥会导致植物群落物种多样性下降^[49-50],也有研究表明施肥能够增加物种多样性^[51]。土壤水分有效性是制约荒漠生态系统植物生长最重要的因素^[52],有研究表明物种丰富度会随着降水量的增加而增加^[7],这与本研究中增水处理后物种丰富度有所增加结果相似。本研究中,增水+增氮处理植物群落物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数均有所下降,这与赵新风等^[53]研究结果一致。本研究中增水+增氮处理后植物群落 Pielou 指数显著下降,且增水和增氮对植物群落 Pielou 指数具有显著交互效应。可能是因为增水加速了土壤有效养分(例如氮素)的溶解和流动,提高了植物对土壤速效养分的利用效率,造成植物群落种间竞争加剧,导致 Pielou 指数显著下降。然而,群落中不同植物对土壤有效养分利用策略的不同,可能也会导致其对增氮处理的响应不同^[54],例如增加了不同物种间的重叠度,加剧物种间的竞争强度^[55],最终造成群落不同功能群植物在群落中分配参差不齐。此外,增水和增氮后也可能会削弱植物对原有土壤有效养分的竞争,改变不同植物对地上光资源的利用方式^[45,56],最终导致植物群落物种分布的不均匀。

3.3 增水和增氮对荒漠草原植物群落稳定性的影响

植物群落变异系数的倒数(ICV)是传统上多用来衡量植物群落稳定的一种方法。Godron 稳定性是一种操作简单,标准统一的评定植物群落稳定性的一种方法^[39]。本研究选取 ICV 植物群落稳定性和 Godron 稳定性两种不同的方法分析增水和增氮处理对荒漠草原植物群落稳定性的影响。两种方法结果一致,表明两种方法能准确描述增水和增氮对荒漠草原植物群落稳定性的影响。本研究中,增水和增水+增氮处理后荒漠草原植物群落 Godron 稳定性拟合曲线与直线的交点坐标距稳定点的欧式距离小于对照,即说明增水和增水+增氮处理的荒漠草原植物群落稳定性高于对照,荒漠草原植物群落稳定性有所增加,表现为正效应。本研究中,增水处理后荒漠草原植物群落稳定性效应大于增水+增氮处理,表明降水增加能在一定程度上抵消氮沉降增加对植物群落稳定性的负面影响^[25]。而增氮处理的荒漠草原植物群落 Godron 稳定性拟合曲线与直线的交点坐标距稳定点的欧式距离大于对照,荒漠草原植物群落稳定性为负效应,表明增氮处理会导致荒漠草原植物群落稳定性下降,这与增氮降低了青藏高原高寒草地植物群落稳定性的结果相似^[8]。其主要原因可能是增氮增加了土壤中有效氮含量,降低了植物群落中物种的异步性,进而降低了植物群落稳定性^[25]。也有研究表明,物种多样性的降低也会导致植物群落稳定性下降^[9]。本研究中,增氮处理降低了物种多样性,这可能与荒漠草原植物群落稳定性下降有关。增氮处理后土壤氮素限制作用的降低可能会导致荒漠草原受到其他有效资源的限制(如水分和磷元素),进而使荒漠草原植物群落稳定性下降^[9,25]。也有研究认为,群落中功能群植物及优势物种对增水和增氮响应结果的差异也可能会导致植物群落稳定性发生变化^[57]。植物群落稳定性不仅与植物群落组成紧密相关,还可能受土壤养分、气候条件、外界干扰等因素调控^[58]。

4 结论

通过对宁夏荒漠草原进行增水和增氮野外控制试验,发现增水和增氮对荒漠草原植物群落高度和豆科植物高度、植物群落 Pielou 指数及群落盖度和地上生物量具有显著交互作用。增水+增氮处理显著增加了植物群落和不同功能群(禾本科和杂类草)植物盖度及植物群落地上生物量和不同功能群(豆科、禾本科和杂类草)植物地上生物量。增水、增氮和增水+增氮处理显著降低了植物群落 Pielou 指数。与对照相比,增水和增水+增氮处理植物群落稳定性有所增加,其中增水处理荒漠草原植物群落稳定性效应大于增水+增氮处理;增氮处理植物群落稳定性有所下降。荒漠草原植物群落结构会受到氮沉降和降水量增加的交互影响。增水对荒漠草原植物群落稳定性的积极作用可能会抵消部分氮沉降的消极作用,荒漠草原植物群落地上生物量及其

稳定性可能有所增加。

参考文献 (References):

- [1] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw R M, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [2] 方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应. *科学通报*, 2018, 63(2): 136-140.
- [3] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erismann J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [4] 王晶, 王姗姗, 乔鲜果, 李昂, 薛建国, 哈斯木其尔, 张学耀, 黄建辉. 氮素添加对内蒙古退化草原生产力的短期影响. *植物生态学报*, 2016, 40(10): 980-990.
- [5] 杨振安. 青藏高原高寒草甸植被土壤系统对放牧和氮添加的响应研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2017.
- [6] 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.
- [7] Yang H J, Wu M Y, Liu W X, Zhang Z, Zhang N L, Wan S Q. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 452-465.
- [8] 张静, 董世魁, 赵珍珍, 李帅, 韩雨晖, 沙威, 沈豪, 刘世梁, 董全民, 周华坤, 土旦加, 祁星民, 王浩善. 模拟氮沉降对青海湖流域高寒草原植物群落组成及稳定性的影响. *草业科学*, 2019, 36(11): 2733-2741.
- [9] 武倩. 长期增温和氮素添加对荒漠草原植物群落稳定性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [10] Stevens C J, Dise N B, Gowing D J G, Mountford J O. Loss of forb diversity in relation to nitrogen deposition in the UK: regional trends and potential controls. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1823-1833.
- [11] 李香云, 岳平, 郭新新, 张蕊, 赵生龙, 张森溪, 王少昆, 左小安. 荒漠草原植物群落光合速率对水氮添加的响应. *中国沙漠*, 2020, 40(1): 116-124.
- [12] 郭群. 草原生态系统生产力对降水格局响应的研究进展. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2201-2210.
- [13] 张晓琳, 翟鹏辉, 黄建辉. 降水和氮沉降对草地生态系统碳循环影响研究进展. *草地学报*, 2018, 26(2): 284-288.
- [14] Zhang Y H, Loreau M C, Lü X T, He N P, Zhang G M, Han X G. Nitrogen enrichment weakens ecosystem stability through decreased species asynchrony and population stability in a temperate grassland. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1445-1455.
- [15] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [16] 韦惠兰, 祁应军. 中国草原问题及其治理. *中国草地学报*, 2016, 38(3): 1-6, 18-18.
- [17] 赵敏, 徐文兵, 孔杨云, 王先之, 于应文. 祁连山东段干旱草原 2 种群落物种构成及稳定性研究. *西北植物学报*, 2017, 37(9): 1847-1853.
- [18] Yang H J, Jiang L, Li L H, Li A, Wu M Y, Wan S Q. Diversity-dependent stability under mowing and nutrient addition: evidence from a 7-year grassland experiment. *Ecology Letters*, 2012, 15(6): 619-626.
- [19] 高润梅, 石晓东, 郭跃东. 山西文峪河上游河岸林群落稳定性评价. *植物生态学报*, 2012, 36(6): 491-503.
- [20] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vöosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.
- [21] Dodd M E, Silvertown J, McConway K, Potts J, Crawley M. Stability in the plant communities of the park grass experiment: the relationships between species richness, soil pH and biomass variability. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1994, 346(1316): 185-193.
- [22] Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367(6461): 363-365.
- [23] 杨中领. 青藏高原东部高寒草甸群落结构和功能对施肥和放牧的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [24] 罗久富, 周金星, 赵文霞, 董林水, 郑景明. 围栏措施对青藏高原高寒草甸群落结构和稳定性的影响. *草业科学*, 2017, 34(3): 565-574.
- [25] Xu Z W, Ren H Y, Li M H, van Ruijven J, Han X G, Wan S Q, Li H, Yu Q, Jiang Y, Jiang L. Environmental changes drive the temporal stability of semi-arid natural grasslands through altering species asynchrony. *Journal of Ecology*, 2015, 103(5): 1308-1316.
- [26] 崔超. 人工增雨和布氏田鼠对内蒙古草原植物凋落物分解和群落结构的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [27] 孙羽, 张涛, 田长彦, 李晓林, 冯固. 增加降水对荒漠短命植物当年牧草生长及群落结构的影响. *生态学报*, 2009, 29(4): 1859-1868.
- [28] 霍利霞, 红梅, 赵巴音那木拉, 高海燕, 叶贺. 氮沉降和降雨变化对荒漠草原凋落物分解的影响. *生态学报*, 2019, 39(6): 2139-2146.
- [29] 刘涛, 张永贤, 许振柱, 周广胜, 侯彦会, 林琳. 短期增温和增加降水对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1043-1053.
- [30] Na X F, Yu H L, Wang P, Zhu W W, Niu Y B, Huang J Y. Vegetation biomass and soil moisture coregulate bacterial community succession under altered precipitation regimes in a desert steppe in northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136: 107520.
- [31] 黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 马飞, 韩磊. 控雨对荒漠草原植物、微生物和土壤 C、N、P 化学计量特征的影响. *生态学报*, 2018, 38(15):

- 5362-5373.
- [32] 牛玉斌, 余海龙, 王攀, 樊瑾, 王艳红, 黄菊莹. 氮磷添加对荒漠草原植物群落多样性和土壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响. 生态学报, 2019, 39(22) : 8462-8471.
- [33] Borer E T, Seabloom E W, Mitchell C E, Cronin J P. Multiple nutrients and herbivores interact to govern diversity, productivity, composition, and infection in a successional grassland. *Oikos*, 2014, 123(2) : 214-224.
- [34] 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). 生物多样性, 1994, 2(4) : 231-239.
- [35] 王恒方, 吕光辉, 周耀治, 曹靖. 不同水盐梯度下功能多样性和功能冗余对荒漠植物群落稳定性的影响. 生态学报, 2017, 37(23) : 7928-7937.
- [36] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探. 林业科学, 2000, 36(5) : 28-32.
- [37] 简小枚, 税伟, 王亚楠, 王前锋, 陈毅萍, 江聪, 项子源. 重度退化的喀斯特天坑草地物种多样性及群落稳定性——以云南沾益退化天坑为例. 生态学报, 2018, 38(13) : 4704-4714.
- [38] 王鲜鲜, 张克斌, 王晓, 杨晓辉. 宁夏盐池四儿滩湿地-干草原植被群落稳定性研究. 生态环境学报, 2013, 22(5) : 743-747.
- [39] 廖哈茹, Tuvshintogtokh I, 郭通, 赵景学. 围封对蒙古荒漠草原和高山草原植物群落组成及稳定性的影响. 北京大学学报: 自然科学版, 2020, 56(3) : 471-478.
- [40] 李海涛, 刘小丹, 张克斌, 苗静, 西拉杰·马默. 宁夏盐池南海子湿地交错带判定及植被稳定性分析. 草业科学, 2016, 33(12) : 2544-2550.
- [41] Zhou Z H, Wang C K, Jin Y. Stoichiometric responses of soil microflora to nutrient additions for two temperate forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(4) : 397-406.
- [42] 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.
- [43] 白春利, 阿拉塔, 陈海军, 单玉梅, 额尔敦花, 王明玖. 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. 中国草地学报, 2013, 35(2) : 69-75.
- [44] 陈文业, 赵明, 李广宇, 魏强, 王芳, 刘振恒, 朱丽, 张继强, 孙飞达. 不同类型施肥水平对甘南沙化高寒草甸植物群落特征及生产力的影响. 自然资源学报, 2012, 27(2) : 254-267.
- [45] 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.
- [46] 邱波, 罗燕江. 不同施肥梯度对甘南退化高寒草甸生产力和物种多样性的影响. 兰州大学学报: 自然科学版, 2004, 40(3) : 56-59.
- [47] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *BioScience*, 2008, 58(9) : 811-821.
- [48] 张景慧, 黄永梅. 生物多样性与稳定性机制研究进展. 生态学报, 2016, 36(13) : 3859-3870.
- [49] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 艾桂艳, 杨丹, 毛瑛. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响. 应用生态学报, 2009, 20(8) : 1838-1844.
- [50] 张杰琦, 李奇, 任正炜, 杨雪, 王刚. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响. 植物生态学报, 2010, 34(10) : 1125-1131.
- [51] 沈景林, 孟杨, 胡文良, 连大伟. 高寒地区退化草地改良试验研究. 草业学报, 1999, 8(1) : 9-14.
- [52] Báez S, Collins S L, Pockman W T, Johnson E J, Small E E. Effects of experimental rainfall manipulations on Chihuahuan Desert grassland and shrubland plant communities. *Oecologia*, 2013, 172(4) : 1117-1127.
- [53] 赵新风, 徐海量, 张鹏, 涂文霞, 张青青. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响. 植物生态学报, 2014, 38(2) : 167-177.
- [54] Bai Y X, She W W, Zhang Y Q, Qiao Y G, Fu J, Qin S G. N enrichment, increased precipitation, and the effect of shrubs collectively shape the plant community in a desert ecosystem in northern China. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 135379.
- [55] Harpole W S, Tilman D. Grassland species loss resulting from reduced niche dimension. *Nature*, 2007, 446(7137) : 791-793.
- [56] Ren Z W, Li Q, Chu C J, Zhao L Q, Zhang J Q, Ai D X C, Ying 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.
- [57] Ma Z Y, Liu H Y, Mi Z R, Zhang Z H, Wang Y H, Xu W, Jiang L, He J S. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production. *Nature Communications*, 2017, 8(1) : 15378.
- [58] Wen D, He N P, Zhang J J. Dynamics of Soil organic carbon and aggregate stability with grazing exclusion in the inner mongolian grasslands. *PLoS One*, 2016, 11(1) : e0146757.