

DOI: 10.11686/cyxb2019232

<http://cyxb.magtech.com.cn>

朱湾湾, 王攀, 樊瑾, 等. 降水量及 N 添加对宁夏荒漠草原土壤 C : N : P 生态化学计量特征和植被群落组成的影响. 草业学报, 2019, 28(9): 33—44.

Zhu W W, Wang P, Fan J, *et al.* Effects of precipitation and N addition on soil C : N : P ecological stoichiometry and plant community composition in a desert steppe of Ningxia, northwestern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(9): 33—44.

降水量及 N 添加对宁夏荒漠草原土壤 C : N : P 生态化学计量特征和植被群落组成的影响

朱湾湾¹, 王攀¹, 樊瑾¹, 牛玉斌¹, 余海龙¹, 黄菊莹^{2*}

(1. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学环境工程研究院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 了解降水格局改变和大气氮(N)沉降增加背景下土壤碳(C) : 氮(N) : 磷(P)平衡关系的改变是否会影响到荒漠草原植被群落组成, 基于 2017 年在宁夏荒漠草原设立的降水量(降水量减少 50%、降水量减少 30%、自然降水量、降水量增加 30%和降水量增加 50%)、N 添加(0 和 5 g · m⁻² · yr⁻¹)及其交互作用的野外试验, 初步分析了土壤 C : N : P 生态化学计量特征和植物群落组成的变化趋势以及二者的关系。结果表明, 增加降水量降低了土壤有机 C、全 N 和 N : P。N 添加及其与降水量的交互作用对土壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响较小; 适量增加降水量刺激了多数植物生长, 提高了群落多样性。过量增加降水量导致猪毛蒿种群生物量急增, 且 N 添加对降水量效应有促进作用, 从而降低了群落多样性; 土壤含水量、全 N、有机 C 和 N : P 与种群生物量关系较为密切, 土壤含水量、有机 C、C : P 和 C : N 与多样性指数存在较强的相关关系。以上结果意味着降水量会通过调控土壤水分有效性, 改变土壤与植物之间 N 和 P 的满足程度, 从而对植物生长策略和群落多样性产生影响; 短期 N 添加对土壤养分有效性影响较小。因此, 还需通过长期的原位试验, 对 N 添加及其与降水量交互作用下土壤 C : N : P 计量平衡与植物群落组成的关系进行深入探讨。

关键词: 干旱半干旱区; 降水格局改变; 大气 N 沉降增加; 植物群落多样性; 土壤 C : N : P

Effects of precipitation and N addition on soil C : N : P ecological stoichiometry and plant community composition in a desert steppe of Ningxia, northwestern China

ZHU Wan-wan¹, WANG Pan¹, FAN Jin¹, NIU Yu-bin¹, YU Hai-long¹, HUANG Ju-ying^{2*}

1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Change in precipitation pattern and increase in atmospheric nitrogen (N) deposition are two important consequences of global change. Soil carbon (C) : nitrogen (N) : phosphorus (P) ecological stoichiometry could reflect soil organic C level and N and P supply and thus would be closely related to plant growth. Previous studies have reported that both of the changes in precipitation and N deposition may lead to the decoupling of soil C : N : P ecological stoichiometry. In order to better understand whether the changes in soil C : N : P ecological stoichiometry could affect plant community composition under changing precipitation regimes and increasing atmospheric N deposition, we conducted a field experiment in a desert steppe of Ningxia, northwestern China, invol-

收稿日期: 2019-04-09; 改回日期: 2019-06-05

基金项目: 宁夏高等学校科学研究项目(NGY2017003)和国家自然科学基金项目(31760144 和 31360111)资助。

作者简介: 朱湾湾(1996-), 女, 河南洛阳人, 在读硕士。E-mail: 2350384309@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: juyinghuang@163.com

ving five precipitation treatments (50% reduction in precipitation, 30% reduction in precipitation, natural precipitation, 30% increase in precipitation, and 50% increase in precipitation) and two N addition treatments (0 and $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$) in 2017, and primarily explored the changes in both soil C : N : P ecological stoichiometry and plant community composition and their relationships in August, 2018. It was found that increased precipitation led to decreases in soil organic C, total N, and N : P, whereas N addition and its interaction with precipitation had little influences on soil C : N : P ecological stoichiometry; a moderate increase in precipitation stimulated the growth of most plants and thus increased community diversity. An excessive increase in precipitation resulted in a sharp increase of *Artemisia scoparia* biomass, combined with the positive effects of N addition, resulting in a reduction of community diversity. To a certain extent, soil water content, total N, organic C, and N : P were closely related to plant population biomass, while soil water content, organic C, C : P, and C : N had closer relationships with diversity indices. Taken together, the results above indicate that precipitation could change N and P relationships between soil supply and plant demand through regulating soil water availability, thus changing plant growth strategy and community diversity; short-term N addition had little effect on soil nutrient availability, consequently, a long-term in situ experiment is needed to further explore mechanisms influencing soil C : N : P stoichiometric balance effects on plant community composition under N addition and the interaction between these effects and precipitation change.

Key words: arid and semi-arid regions; changing precipitation regimes; increasing atmospheric N deposition; plant community diversity; soil C : N : P

降水格局改变和大气氮(N)沉降增加是全球变化的两个重要方面。据报道,全球总降水量在过去一个世纪有增加趋势,但在干旱与半干旱地区减少,干旱和洪涝等极端降水事件的频率呈明显增加趋势^[1]。如与1961—1980年相比,1981—2010年间我国西北地区降水量总体上呈增加趋势,但其东部区(如宁夏和陕西部分地区)年降水量呈降低趋势^[2]。另一方面,化石燃料以及化肥的过度使用等导致N沉降量较工业革命前明显增加。近年来随着大气污染物控制措施的实施,N沉降速率在发达国家有所下降,但在发展中国家仍呈上升趋势^[3]。就我国而言,虽然南方等地区N沉降速率有所减缓,但西北地区N沉降速率加快^[4]。降水量和N沉降调控着土壤水分和N有效性,影响着植物资源利用策略,从而会直接影响到植被群落结构^[5-6]。植物群落组成是反映生态系统稳定性的重要指标,因此有必要针对西北地区敏感生态系统开展二者相关效应的研究,尤其是受降水和N限制的草原生态系统。

草原生态系统功能的正常发挥对维持区域性及全球生态平衡起着极为重要的作用^[7]。降水量和N有效性是草原生态系统植物生长的主要限制因子,且降水量在介导N沉降效应方面发挥着重要作用^[8],因此已有国内学者研究了二者交互作用对草原生态系统植物群落多样性的影响,如针对青海高寒草原、内蒙古草甸草原、内蒙古典型草原的研究^[9-11]。荒漠草原是干旱半干旱区的主要草原生态系统,具有植物群落结构简单、生态系统稳定性差等特点;区域干旱少雨且N沉降临界负荷低^[12],因此对降水格局改变和N沉降增加较为敏感。宁夏荒漠草原地处毛乌素沙地南缘,是区域重要的生态屏障,然而目前针对宁夏荒漠草原的相关研究还比较缺乏。在宁夏荒漠草原开展模拟降水量改变和N沉降增加下植物生物量和群落多样性变化特点的研究,可为充分认识全球变化背景下干旱半干旱区退化生态系统的反应与适应提供基础数据。

生态化学计量学是研究生态系统多元素平衡关系的一门新兴学科。土壤C : N : P化学计量比是反映土壤内部3种元素循环的主要指标,综合了生态系统功能的变异性,因此有助于确定生态系统过程对全球变化的响应^[13]。一般而言,土壤元素关系具有一定的内稳性,对于维持生态系统稳定性具有重要意义。然而,近年来降水格局改变和N沉降增加导致土壤C : N : P平衡关系趋于解耦^[14-15]。土壤C : N : P化学计量比可以较好地反映土壤有机C水平和养分供给状况^[16-17],而二者又直接影响着植物的生长发育,因此趋于解耦的元素平衡关系可能会直接作用于植物群落组成。目前,国内已有研究分析了自然生境下干旱半干旱区土壤C : N : P生

态化学计量特征与植物群落组成的关系^[18-19], 尚未见降水量和 N 添加下针对宁夏荒漠草原的相关报道。为明确降水格局改变和 N 沉降增加背景下土壤 C : N : P 平衡关系的改变是否会影响荒漠草原植被群落组成, 本研究设置了野外模拟试验, 从土壤元素平衡特征角度初步探讨了二者及其交互作用下宁夏荒漠草原植被群落组成的影响因素, 研究结果可为深入理解全球变化对区域退化生态系统植物群落结构的影响机制提供新思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验样地位于宁夏回族自治区盐池县柳杨堡乡杨寨子村围栏草地内。该区位于毛乌素沙地西南边缘, 是黄土高原向鄂尔多斯台地的过渡地带。地理位置为 37.80° N, 107.45° E, 海拔为 1367 m。具有典型的温带大陆性气候特征: 年均降水量为 289.4 mm; 年均蒸发量为 2131.8 mm; 年均气温为 7.7 °C, 1 月平均气温为 -8.9 °C, 7 月平均气温为 22.5 °C。主要的土壤类型为灰钙土, 土壤质地多为沙壤土。该试验样地植物群落结构简单, 植被组成以一年生和多年生草本为主, 如猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*)、针茅 (*Stipa capillata*)、白草 (*Pennisetum centasiaticum*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*) 和地梢瓜 (*Cynanchum thesiodes*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 2017 年 9 月, 在围栏草地内选择地势平坦、植被均匀有代表性的地段作为降水量和 N 添加处理的试验样地。降水增减量以近几十年来我国西北地区西部降水量增加而东部减少的趋势为主要依据, 同时参考了国内同类研究方法^[11]。N 肥施用量以 2011—2013 年设立的 N 添加原位试验的观察结果为主要依据^[20], 同时参考了区域大气 N 沉降水平^[4]。试验采用随机区组的裂区设计, 主区为降水量处理, 副区为 N 添加处理。降水量处理依次为: 降水量减少 50% (W_1)、降水量减少 30% (W_2)、自然降水量 (对照, W_3)、降水量增加 30% (W_4) 和降水量增加 50% (W_5)。降水量减少处理使用自制的减雨架实现 (全年遮雨)。减雨架上端离地约 1.8 m, 用 5 cm 宽的瓦面状透明聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC) 板搭建分别相当于 50% 和 30% 样方面积的遮雨面, 并均匀放置于减雨架上方。降水量增加处理利用流量控制的人工喷灌装置实现。试验期间采用雨量计收集降水量, 统计月降水量和年降水量。由于试验地超过 80% 的降水量集中在生长季 (5—10 月), 考虑到野外试验的可操作性, 因此将全年需要补给的降水量分 8 次于 5—8 月每月上旬和中旬喷于小区内。N 添加处理设置 2 个水平: $0 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ (N_0) 和 $5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ (N_5), 所施 N 肥为硝酸铵 (NH_4NO_3 , 含纯 N 34%)。施用时间, 将每个小区每次需要施加的 NH_4NO_3 溶解于少量水中, 于 2018 年 5—8 月每月初均匀喷施到小区内。对照小区喷洒相同量的水, 以避免因水分施用量不同造成的试验误差。试验共计 30 个小区, 每个处理 3 次重复。小区面积为 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$, 各小区之间设置 1.5 m 的缓冲带。

1.2.2 样品收集与测定 于 2018 年 8 月下旬, 在每小区内随机选取 3 个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方进行植被群落调查。调查指标包括物种名称、物种数、物种高度和物种个体数。调查结束后, 用剪刀齐平地剪下样方内所有植物地上部分, 按牛枝子、草木樨状黄芪、针茅、猪毛蒿、白草、糙隐子草、阿尔泰狗娃花以及其他物种归类, 并分开装入纸袋带回实验室, 将归类好的植物样品在 65 °C 恒温箱烘干 (48 h)、称重。群落生物量为所有物种地上生物量之和。植物群落多样性用以下几个指标表征:

$$\text{重要值}(P_i) = (\text{相对生物量} + \text{相对高度} + \text{相对密度}) / 3$$

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

$$\text{Simpson 优势度指数}(D) = - \sum_{i=1}^S D_i^2$$

$$\text{Patrick 丰富度指数}(R) = S$$

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

式中： P_i 为种 i 的重要值； D_i 为种 i 的相对密度； S 为群落中物种数。

同期，采用直径为 5 cm 的土钻收集 0~20 cm 土壤，每个小区取 3 钻，混匀过 2 mm 筛后分为 3 部分：一部分直接用于含水量和 pH 的测定；一部分 4 ℃ 保存，用于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和速效 P 的测定；最后一部分自然风干后用于有机 C、全 N 和全 P 的测定。其中，采用烘干称重法、酸度计法、重铬酸钾容量法—外加加热法、凯氏定 N 法、钼锑抗比色法和 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 法测定土壤含水量、pH、有机 C、全 N、全 P 和速效 P；采用连续流动分析仪 (Auto Analyzer 3, SEAL Analytical GmbH, Hanau, Germany) 测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ [21]。

1.3 数据分析

采用 SigmaPlot 12.5 绘图，数据均为平均值+标准误差 ($n=3$)。用 SPSS 24.0 进行方差分析：采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 中最小显著性差异法 (LSD)，进行不同处理间植物生物量、群落多样性以及土壤 C : N : P 生态化学计量特征等指标的多重比较；采用裂区设计方差分析和 Duncan 检验比较降水量处理、N 添加处理以及二者的交互作用对各指标的影响。采用 Canoco 5.0 进行植物指标与土壤指标对应关系的冗余分析 (redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 降水量和 N 添加对土壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响

裂区设计方差分析结果显示 (表 1)，降水量对全 N 及 N : P 具有显著影响，N 添加对全 N、全 P、C : P 以及 N : P 有显著影响，二者仅对土壤 C : N 以及 C : P 有显著的交互作用 ($P<0.05$)。

表 1 降水量、N 添加及其交互作用对土壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响
Table 1 Effects of precipitation, N addition, and their interaction on soil C : N : P ecological stoichiometry

变异来源 Source of variation	自由度 df	土壤有机 C Soil organic C	土壤全 N Soil total N	土壤全 P Soil total P	土壤 C : N Soil C : N	土壤 C : P Soil C : P	土壤 N : P Soil N : P
降水量处理 Precipitation treatment (α)	4	3.618	10.261**	1.142	0.297	2.970	4.694*
N 添加处理 N addition treatment (β)	1	1.586	13.772**	8.458*	0.138	9.219*	19.919**
降水量处理 \times N 添加处理 Interaction of α and β	4	2.617	3.115	2.535	3.818*	5.109*	2.769

注：表中数据为 F 值，* 和 ** 分别代表显著性水平小于 0.05 和 0.01。下同。
Note: The data in the Table are F values, * and ** represent that significance levels are less than 0.05 and 0.01, respectively. The same below.

降水量和 N 添加改变了土壤 C : N : P 生态化学计量特征 (图 1)：0 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的 N 添加下，降水量对全 P、C : N 和 C : P 无显著的影响，减少和增加降水量降低了有机 C、全 N 和 N : P；5 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的 N 添加下，降水量对 C : N 无显著的影响，增加降水量提高了全 P，一定程度上减少和增加降水量降低了有机 C、全 N、C : P 和 N : P；相同降水量处理间，N 添加对土壤 C : N : P 生态化学计量特征影响较小，仅在降水量减少 30% 处理下提高了有机 C、全 N、C : N、C : P 和 N : P，降低了全 P。

2.2 降水量和 N 添加对植物群落组成的影响

裂区设计方差分析结果表明 (表 2 和表 3)，降水量对牛枝子、草木樨状黄芪、猪毛蒿、白草以及群落生物量有显著影响，N 添加对猪毛蒿、白草、糙隐子草以及群落生物量有显著影响，二者交互作用仅对针茅、猪毛蒿和白草种群生物量有显著影响；降水量对 4 个多样性指数有显著影响，N 添加对 Pielou 均匀度指数有极显著影响。

降水量和 N 添加改变了植物生物量，且其影响程度具有明显的物种差异性 (图 2 和图 3)：0 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的 N 添加下，随降水量增加牛枝子和猪毛蒿种群生物量以及群落生物量呈增加趋势，草木樨状黄芪、糙隐子草、白草、阿尔泰狗娃花以及其他物种种群生物量呈先增加后降低的趋势，针茅种群生物量无明显变化规律；5 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的 N 添加下，草木樨状黄芪和猪毛蒿种群生物量以及群落生物量呈增加趋势，牛枝子、针茅、糙隐

子草、白草、阿尔泰狗娃花以及其他物种种群生物量呈先增加后降低的趋势；相同降水量处理间，N 添加对群落生物量无显著影响，但对种群生物量有所影响，如降水量减少 50% 处理下 N 添加显著提高了草木樨状黄芪种群生物量，降水量减少 30% 处理下 N 添加显著提高了白草种群生物量，降水量增加 50% 处理下 N 添加显著降低了牛枝子和针茅种群生物量，显著提高了猪毛蒿种群生物量。

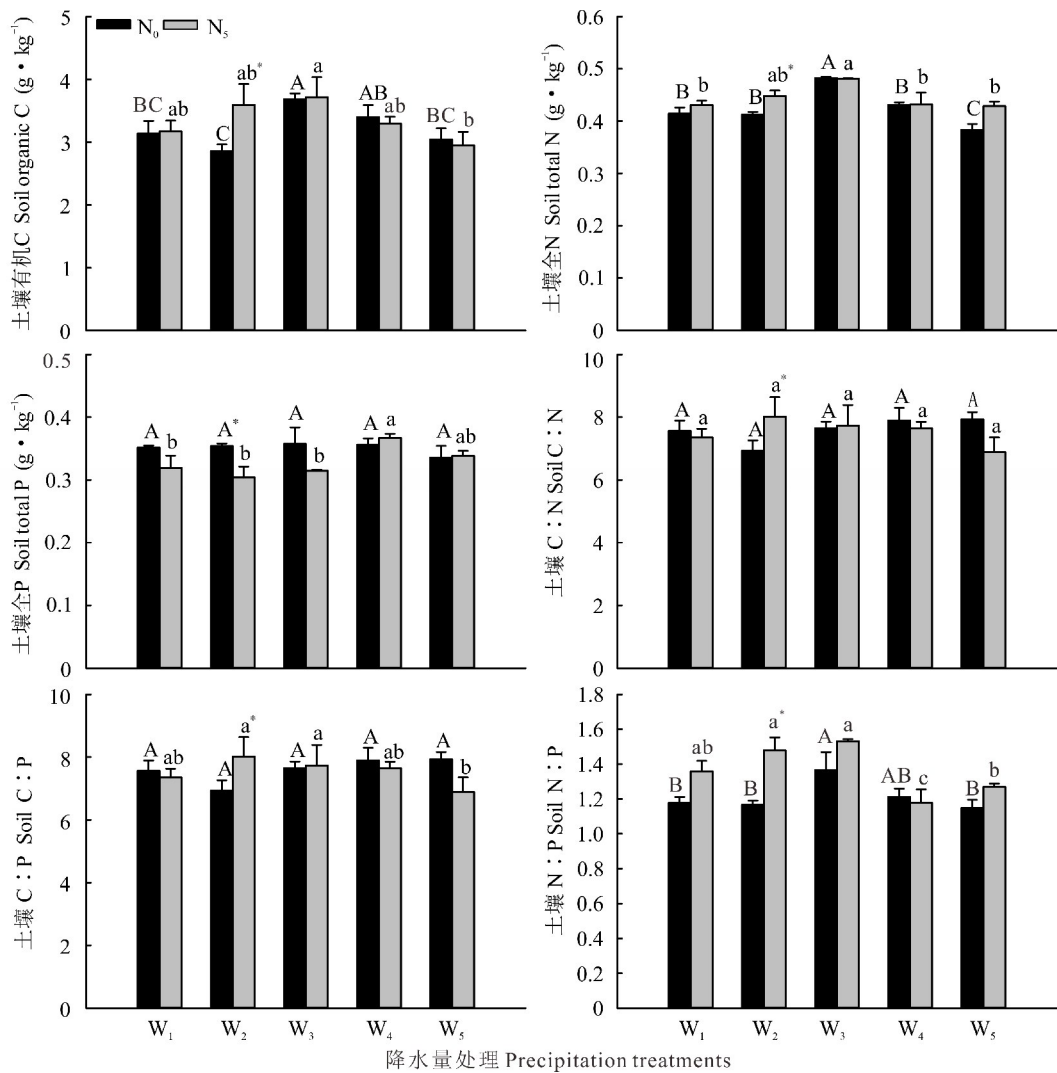


图 1 不同 N 添加处理下降水量对土壤 C : N : P 生态化学计量特征的影响

Fig. 1 Effects of precipitation on soil C : N : P ecological stoichiometry under different N addition

大写字母表示 0 g · m⁻² · yr⁻¹ 的 N 添加下，降水量处理间土壤各指标的差异显著性，字母不同表示差异显著 (P<0.05)。小写字母表示 5 g · m⁻² · yr⁻¹ 的 N 添加下，降水量处理间土壤各指标的差异显著性，字母不同表示差异显著 (P<0.05)。* 表示相同降水量处理间，N 添加对土壤各指标有显著影响 (P<0.05)。下同。The capital letters indicate significant differences between soil indices within precipitation treatments under 0 g · m⁻² · yr⁻¹ of N addition (P<0.05). The lowercase letters indicate significant differences between soil indices within precipitation treatments under 5 g · m⁻² · yr⁻¹ of N addition (P<0.05). * indicates that N addition has significant effects on soil indices under the same precipitation treatments (P<0.05). The same below.

降水量和 N 添加改变了植物群落多样性(图 4): 0 g · m⁻² · yr⁻¹ 的 N 添加下，随降水量增加 Patrick 丰富度指数和 Shannon—Wiener 多样性指数均呈先增加后降低的趋势，Pielou 均匀度指数呈逐渐降低的趋势，Simpson 优势度指数无显著的变化规律；5 g · m⁻² · yr⁻¹ 的 N 添加下，随降水量增加 Simpson 优势度指数逐渐升高，其他 3 个指数则呈先增加后降低的趋势；相同降水量处理间，N 添加对 4 个多样性指数的影响较小。

表 2 降水量、N 添加及其交互作用对植物种群生物量的影响

Table 2 Effects of precipitation, N addition, and their interaction on plant population biomass

变异来源	自由度	牛枝子	草木樨状黄芪	针茅	猪毛蒿	白草	糙隐子草	阿尔泰狗娃花
Source of variation	df	<i>L. potaninii</i>	<i>A. melilotoides</i>	<i>S. capillata</i>	<i>A. scoparia</i>	<i>P. centrasiatricum</i>	<i>C. squarrosa</i>	<i>H. altaicus</i>
降水量处理 Precipitation treatment (α)	4	6.649 *	6.238 *	3.636	34.717 **	7.113 **	1.882	0.730
N 添加处理 N addition treatment (β)	1	1.300	3.343	4.645	15.058 **	8.955 *	5.269 *	4.603
降水量处理×N 添加处理 Interaction of α and β	4	2.379	0.467	3.609 *	6.720 **	5.144 *	0.991	1.870

2.3 土壤 C : N : P 生态化学计量特征及其他因子与植物群落组成的关系

在土壤因子与植物种群生物量的 RDA 结果中(图 5),两个典范轴累计方差解释率为 75.07%。二者的对应关系存在物种差异性,如牛枝子种群生物量与含水量、有机 C、N : P、C : P 以及 C : N 正相关,与 pH、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 负相关;草木樨状黄芪种群生物量与含水量、全 N、有机 C、N : P、C : P、有效 P、全 P 以及 C : N 正相关,与 pH 负相关;猪毛蒿种群生物量与含水量、全 N、有机 C、N : P、C : P、有效 P 和 C : N 正相关,与 pH、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 负相关。

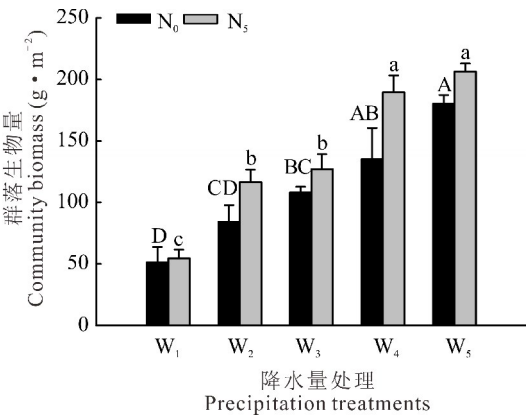


图 2 不同 N 添加处理下降水量对植物群落生物量的影响
Fig. 2 Effects of precipitation on plant community biomass under different N addition

表 3 降水量、N 添加及其交互作用对植物群落生物量以及多样性指数的影响

Table 3 Effects of precipitation, N addition, and their interaction on plant community biomass and diversity indices

变异来源 Source of variation	自由度 df	群落生物量 Community biomass	<i>R</i>	<i>H'</i>	<i>E</i>	<i>D</i>
降水量处理 Precipitation treatment (α)	4	33.331 **	31.286 **	5.126 *	6.138 *	5.950 *
N 添加处理 N addition treatment (β)	1	10.882 **	4.000	0.095	11.418 **	0.486
降水量处理×N 添加处理 Interaction of α and β	4	1.037	0.700	1.048	0.181	2.564

注: *R*、*H'*、*E* 和 *D* 分别代表 Patrick 丰富度指数、Shannon—Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 优势度指数。下同。
Note: *R*, *H'*, *E* and *D* represent Patrick richness index, Shannon—Wiener diversity index, Pielou evenness index, and Simpson dominance index, respectively. The same below.

土壤因子与植物群落多样性指数的 RDA 结果显示(图 6),两个典范轴累计方差解释率为 92.26%: Patrick 丰富度指数与含水量、有机 C、C : N、全 N、pH 和有效 P 正相关; Shannon—Wiener 多样性指数与含水量、有机 C、C : P、C : N、N : P、全 N、pH 和有效 P 正相关; Pielou 均匀度指数与 NO₃⁻-N、C : P、N : P 和 NH₄⁺-N 正相关,与含水量负相关; Simpson 优势度指数与含水量和全 P 正相关,与其他指标呈不同程度的负相关关系。

3 讨论

3.1 土壤 C : N : P 生态化学计量特征对降水量和 N 添加的响应

降水量和 N 沉降调控着土壤有机质分解和养分迁移转化等过程,从而会对土壤 C : N : P 生态化学计量关系产生影响,且其影响程度与降水量、N 沉降量、土壤水分以及 N 素饱和程度有关。本研究中,降水量减少 30% 条件下 N 添加提高了土壤有机 C 和全 N、降低了全 P,导致 C : P 和 N : P 升高,表明土壤 P 受限性增强,与以往研究结果相似^[22]。依据利比希最小因子定理, 5 g · m⁻² · yr⁻¹ N 添加有助于缓解中度水分胁迫引起的生长

限制,从而刺激了植物对 P 的摄取,导致土壤全 P 含量降低^[23];无 N 添加下,增加 30%和 50%降水量降低了土壤全 N 和 N:P,可能是水分增多引起植物和微生物 N 消耗增加^[24]以及土壤中 N 淋溶损失增强^[25]等方面综合作用的结果,且这种影响在过量增加降水量条件下尤为明显。5 g·m⁻²·yr⁻¹的 N 添加缓解了植物 N 消耗以及土壤 N 淋溶损失引起的 N 含量降低(图 1),同时提高了土壤全 P,从而降低了 C:P 和 N:P,与周纪东等^[26]对内蒙古温带典型草原研究结果相似。土壤中 P 的来源主要为成土母质、植物地上凋落物以及地下部分 P 输入。由于本研究仅为短期试验结果,因此还需要通过长期的观测深入揭示降水量及 N 添加交互作用对土壤 P 状况的影响机制。

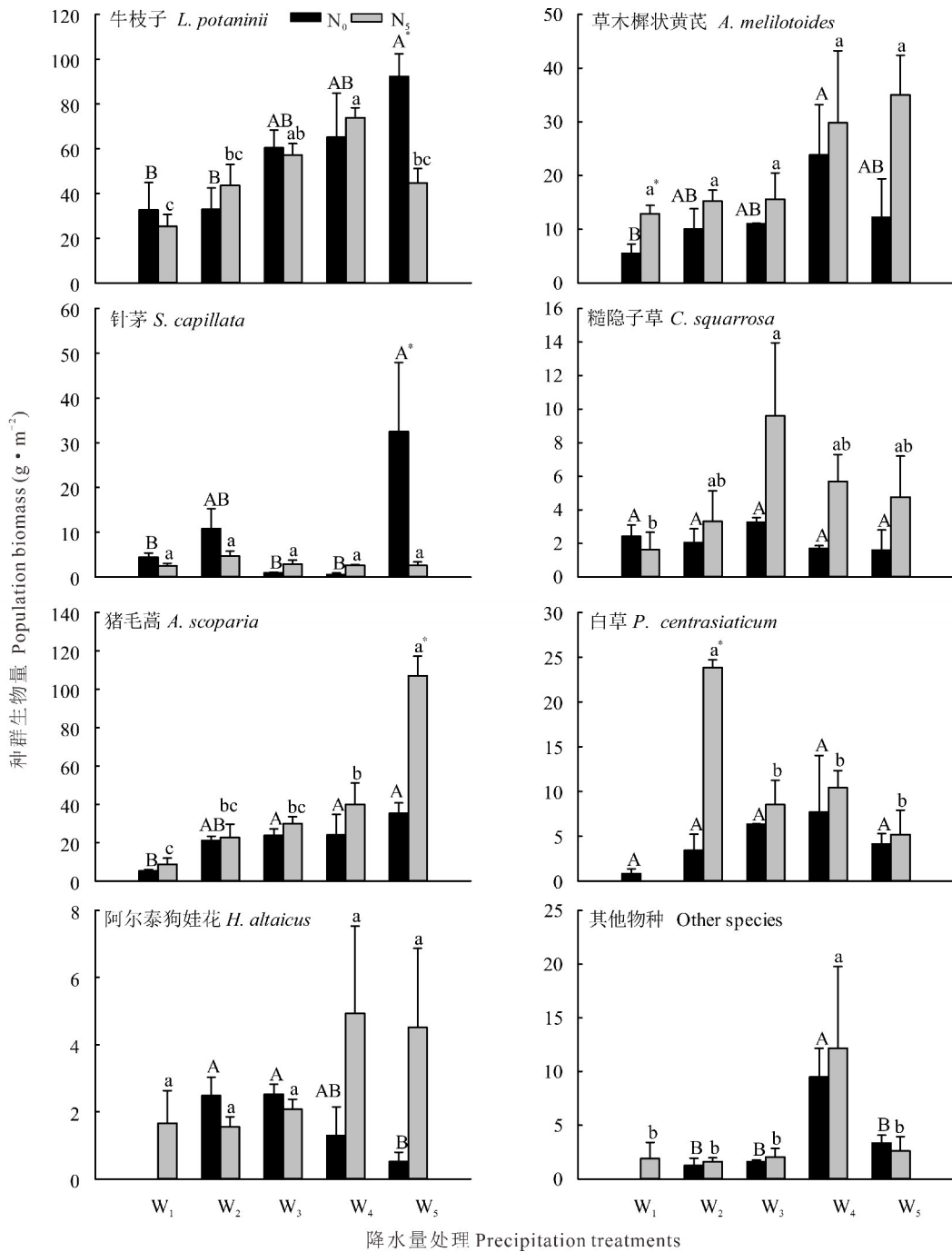


图 3 不同 N 添加处理下降水量对植物种群生物量的影响

Fig. 3 Effects of precipitation on plant population biomass under different N addition

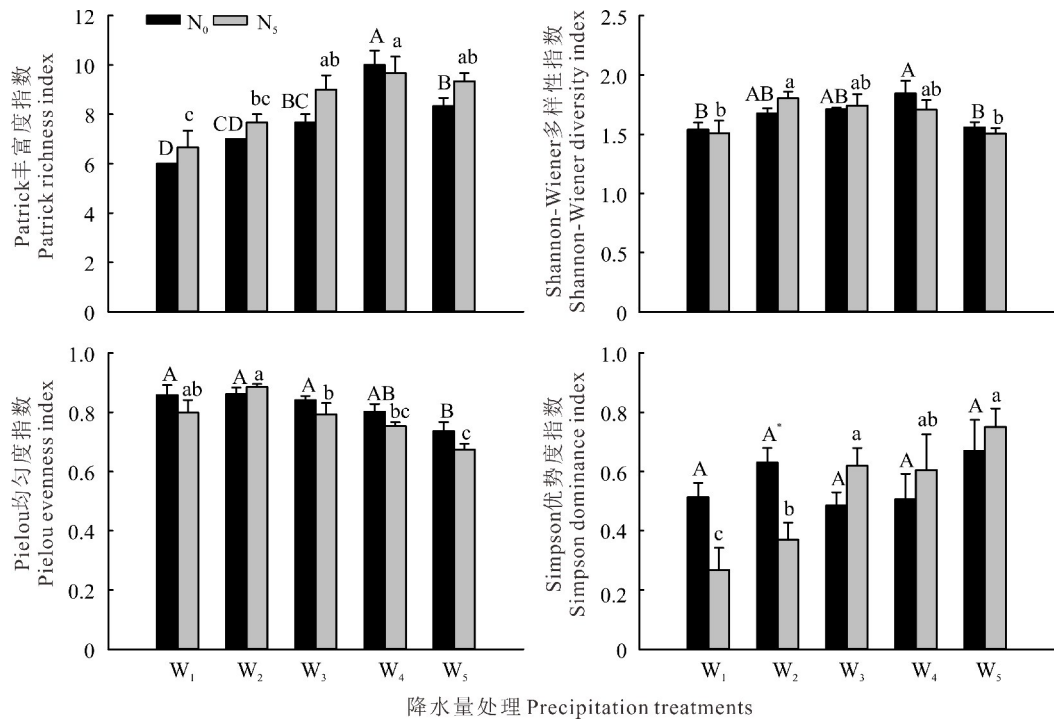


图 4 不同 N 添加处理下降水量对植物群落多样性的影响

Fig. 4 Effects of precipitation on plant community diversity under different N addition

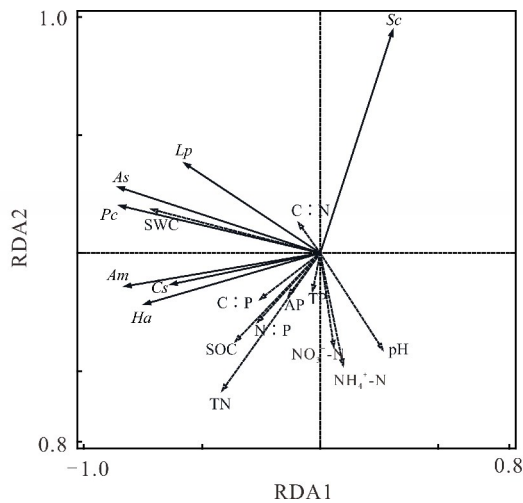


图 5 降水量和 N 添加下土壤因子与植物种群生物量的 RDA 分析

Fig. 5 RDA of soil factors and plant population biomass under precipitation and N addition

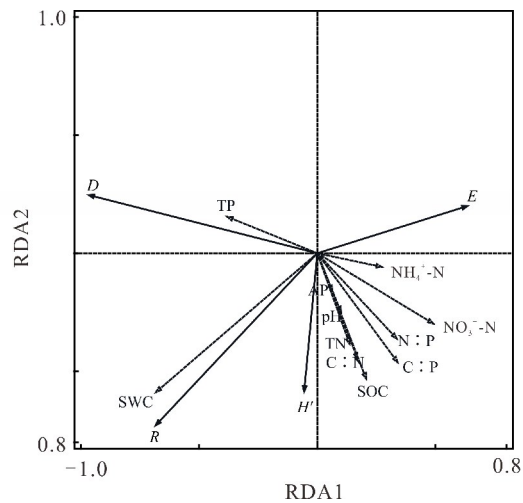


图 6 降水量和 N 添加下土壤因子与植物群落多样性的 RDA 分析

Fig. 6 RDA of soil factors and plant community diversity under precipitation and N addition

Lp, *Am*, *Sc*, *As*, *Pc*, *Cs* 和 *Ha* 分别代表牛枝子、草木樨状黄芪、针茅、猪毛蒿、白草、糙隐子草和阿尔泰狗娃花; *SWC*, *SOC*, *TN*, *TP*, *C : N*, *C : P*, *N : P*, *AP*, *pH*, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 分别代表土壤含水量、土壤有机 C、全 N、全 P、*C : N*, *C : P*, *N : P*、速效 P、pH 值、铵态氮和硝态氮。 *Lp*, *Am*, *Sc*, *As*, *Pc*, *Cs* and *Ha* represent *L. potaninill*, *A. melilotoides*, *S. capillata*, *A. scoparia*, *P. centrasiaticum*, *C. squarrosa* and *H. altaicus*, respectively. *SWC*, *SOC*, *TN*, *TP*, *C : N*, *C : P*, *N : P*, *AP*, *NH*₄⁺-N and *NO*₃⁻-N represent soil water content, soil organic C, total N, total P, *C : N*, *C : P*, *N : P*, available P, pH value, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen, respectively.

3.2 植物群落组成对降水量和 N 添加的响应

降水量和 N 有效性是荒漠草原植物生长的主要限制因子。适量增加降水量以及提高 N 有效性通过影响土壤水分和养分有效性，间接调节着植物生长和群落组成^[27-28]。由于不同植物对水分和 N 素的利用能力不同，使得植物群落发生相应的变化^[20,29]。本研究，自然生长状况下(N₀)，增加降水量提高了牛枝子、草木樨状黄

芪、针茅、猪毛蒿以及白草种群生物量,但过量增加降水量(降水量增加 50%)显著抑制了其他物种生长。这表明降水量增加缓解了水分限制,因此促进了多数植物生长、提高了群落多样性,与以往研究结果相似^[5,30];过量增加降水量时,牛枝子和猪毛蒿等凭借其较强的生存能力开始大量繁殖,与其他物种产生资源竞争关系^[31],导致这些物种地上生物量积累降低。相同降水量条件下,N 添加提高了草木樨状黄芪、糙隐子草、猪毛蒿和白草种群生物量,表明少量 N 添加缓解了土壤 N 限制,因此促进了多数植物生物量积累,与潘庆民等^[32]和 LeBaue 等^[33]针对荒漠草原的研究结果相似。以往研究发现 N 添加促进了植物群落优势种生长,导致优胜劣汰现象的出现,从而降低了植物群落多样性^[10,34-35]。本研究中,N 添加对群落多样性影响较小,意味着短期 N 添加较难改变荒漠草原植被群落组成。

研究表明,降水在调控 N 添加促进植物生长等方面发挥着重要的介导作用^[8,10]。因此在受降水和 N 有效性共同限制的荒漠草原,降水量和 N 添加交互作用可能对多数植物生长具有正效应。本研究中,与 $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ N 添加水平相比较, $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ N 添加下随降水量增加针茅、白草和猪毛蒿种群生物量均有不同程度的提高,且降水量和 N 添加具有显著的交互作用,表明增加降水量可以促进 N 肥效应的释放,从而刺激了 3 个植物种的生长。相比之下,二者对其他物种种群生物量以及 3 个群落多样性指数无显著的交互作用(表 2 和表 3),与针对青海高寒草原^[9]、内蒙古典型草原^[36]以及新疆荒漠草原^[37]的研究结果相似。其可能原因一方面在于,相同降水量条件下 N 添加对牛枝子、针茅和阿尔泰狗娃花等物种生长表现出负效应,降水量正效应与 N 添加负效应的相互抵消可能使得二者交互作用不明显。另一方面,有研究发现降水量与 N 添加的交互作用具有一定的时滞性^[38],因此短期降水量对 N 添加效应的促进作用未达到显著水平。

3.3 土壤 C:N:P 生态化学计量特征及其他因子与植物群落组成的关系

表层土壤 C:N:P 化学计量比反映了土壤有机 C 水平和养分供给状况^[13,16-17],因此,一定程度上可以指示植物生长养分受限程度。随后的研究进一步证实,土壤元素动态及其化学计量关系与植物群落组成密切相关。例如针对高寒草甸退化草地的研究发现,土壤有机 C、全 N 以及全 P 与植物群落生物量和多样性存在不同程度的正相关关系^[39-40]。针对科尔沁沙地不同退化程度沙化草地的研究亦发现,土壤全 N 和全 P 与植物群落多样性正相关,且 N:P 能很好地反映养分平衡对多样性的影响作用^[18]。此外,杨祥祥等^[19]发现沙地植物群落多样性随土壤 C:N 和 N:P 增加而增加。本研究中,土壤含水量、全 N、有机 C 和 N:P 与植物种群生物量存在较强的正相关关系,含水量、有机 C、C:P 和 C:N 则与 Patrick 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数关系较为密切(图 5 和图 6),证实土壤元素及其平衡关系影响着植被群落组成,但短期降水量和 N 添加下含水量是植物群落组成发生改变的主要驱动因子,与以往研究结果类似^[41]。此外,pH 与牛枝子、猪毛蒿等植物种群生物量负相关,与群落多样性指数关系较弱。这意味着 pH 在调控植物生长方面扮演中重要角色^[42-43],但由于试验处理时间较短,且研究区土壤呈弱碱性,因此总体上对群落多样性影响较小。

4 结论

本研究发现,增加降水量降低了土壤有机 C、全 N 和 N:P,N 添加及其与降水量的交互作用对土壤 C:N:P 生态化学计量特征的影响较弱;适量增加降水量刺激了多数植物生物量积累、提高了群落多样性。过量增加降水量导致猪毛蒿种群生物量急增,且 N 添加对降水量效应有促进作用,从而降低了群落多样性;土壤含水量、全 N、有机 C 和 N:P 与种群生物量存在较强的正相关关系,土壤含水量、有机 C、C:P 和 C:N 与群落多样性存在较强的正相关关系。综合而言,降水量提高了土壤水分有效性,促进了土壤 N 和 P 的迁移和转化,调节了土壤元素化学计量平衡关系,从而刺激了多数植物生长、提高了群落多样性。由于本试验处理时间较短,N 添加效应尚不明显。因此,有必要通过长期的原位观测,深入探讨 N 添加及其与降水量交互作用下土壤 C:N:P 平衡特征对荒漠草原植物群落组成的调控机制。

参考文献 References:

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers/climate change 2013: The physical science basis. In:

- Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 20–107.
- [2] Huang X Y, Li Y H, Feng J Y, *et al.* Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1359–1370.
黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征. *生态学报*, 2015, 35(5): 1359–1370.
- [3] Vet R, Artz R S, Carou S, *et al.* A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 2014, 93: 3–100.
- [4] Gu F X, Huang M, Zhang Y D, *et al.* Modeling the temporal-spatial patterns of atmospheric nitrogen deposition in China during 1961–2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3591–3600.
顾峰雪, 黄玫, 张远东, 等. 1961–2010 年中国区域氮沉降时空格局模拟研究. *生态学报*, 2016, 36(12): 3591–3600.
- [5] Niu S L, Wu M Y, Han Y, *et al.* Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 144–155.
- [6] Zhang J F, Xu Y Q. Responses of plant biomass and net primary production to nitrogen fertilization and increased precipitation in re-grassed croplands in Duolun County of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(2): 192–200.
张金凤, 徐雨晴. 水氮添加对内蒙古多伦县退耕还草地生物量、生产力及其分配的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2): 192–200.
- [7] Gibson D J. Grasses and grassland ecology. New York: Oxford University Press, 2009.
- [8] Lü X T, Kong D L, Pan Q M, *et al.* Nitrogen and water availability interact to affect leaf stoichiometry in a semiarid grassland. *Oecologia*, 2012, 168(2): 301–310.
- [9] Li C B, Peng Y F, Zhao D Z, *et al.* Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an Alpine Steppe on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 185–191.
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. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 185–191.
- [10] Li W J, Liu H M, Zhao J N, *et al.* Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the *Stipa baicalensis* Steppe, Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19): 6460–6469.
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. *生态学报*, 2015, 35(19): 6460–6469.
- [11] Xu Z W, Li M H, Zimmermann N E, *et al.* Plant functional diversity modulates global environmental change effects on grassland productivity. *Journal of Ecology*, 2018, 5: 1941–1951.
- [12] Duan L, Hao J M, Xie S D, *et al.* Estimating critical loads of sulfur and nitrogen for Chinese soils by steady state method. *Journal of Environmental Science*, 2002, 23(2): 7–12.
段雷, 郝吉明, 谢绍东, 等. 用稳态法确定中国土壤的硫沉降和氮沉降临界负荷. *环境科学*, 2002, 23(2): 7–12.
- [13] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.
王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [14] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardol A, *et al.* Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature*, 2013, 502: 672–676.
- [15] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, *et al.* Stoichiometric shifts in surface soils over broad geographical scales: Evidence from China's grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(8): 947–955.
- [16] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139–151.
- [17] Peñuelas J, Sardans J, Rivas-Ubach A, *et al.* The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 3–6.
- [18] Ning Z Y, Li Y L, Yang H L, *et al.* Stoichiometry and effects of carbon, nitrogen, phosphorus in soil of desertified grasslands on community productivity and species diversity. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10). doi: 10.5846/stxb201711242094.
宁志英, 李玉霖, 杨红玲, 等. 沙化草地土壤碳氮磷化学计量特征及其对植被生产力与多样性的影响. *生态学报*, 2019, 39(10). doi: 10.5846/stxb201711242094.
- [19] Yang X X, Li M Q, He X D, *et al.* Effects of soil C : N : P ratio on species diversity of preliminary plant communities on sandy land. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 242–249.
杨祥祥, 李梦琦, 何兴东, 等. 沙地土壤 C : N : P 比对早期植物群落物种多样性的影响. *土壤学报*, 2019, 56(1): 242–

249.

- [20] Huang J Y, Yu H L. Responses of growth of four desert species to different N addition levels. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(2): 165—176.
黄菊莹, 余海龙. 四种荒漠草原植物的生长对不同氮添加水平的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(2): 165—176.
- [21] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2002.
鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [22] Zhang C H, Li S G, Zhang L M, *et al.* Effects of species and low dose nitrogen addition on litter decomposition of three dominant grasses in Hulun Buir Meadow Steppe. *Journal of Resources and Ecology*, 2013, 4(1): 20—26.
- [23] Cheng S L, Fang H J, Yu G R. Threshold responses of soil organic carbon concentration and composition to multi-level nitrogen addition in a temperate needle-broadleaved forest. *Biogeochemistry*, 2018, 137(1/2): 219—233.
- [24] Ren H Y, Xu Z W, Huang J H, *et al.* Nitrogen and water addition reduce leaf longevity of steppe species. *Annals of Botany*, 2011, 107(1): 145—155.
- [25] Huang J Y, Yu H L, Li L H, *et al.* Water supply changes N and P conservation in a perennial grass *Leymus chinensis*. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(11): 1050—1056.
- [26] Zhou J D, Shi R J, Zhao F, *et al.* Effects of the frequency and intensity of nitrogen addition on soil pH, the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in temperate steppe in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(8): 2467—2476.
周纪东, 史荣久, 赵峰, 等. 施氮频率和强度对内蒙古温带草原土壤 pH 及碳、氮、磷含量的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(8): 2467—2476.
- [27] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008, 451: 712—715.
- [28] Niu S L, Wu M Y, Han Y, *et al.* Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *New Phytologist*, 2008, 177(1): 209—219.
- [29] Johansson O, Palmqvist K, Olofsson J. Nitrogen deposition drives lichen community changes through differential species responses. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2626—2635.
- [30] Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, *et al.* Precipitation manipulation experiments-challenges and recommendations for the future. *Ecology Letters*, 2012, 15(8): 899—911.
- [31] Du F, Shan L, Chen X Y, *et al.* Studies on the vegetation succession of abandoned farmland in the loess hilly region of northern Shaanxi-succession series after being abandoned. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(4): 328—333.
杜峰, 山仑, 陈小燕, 等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究—撂荒演替序列. *草地学报*, 2005, 13(4): 328—333.
- [32] Pan Q M, Bai Y F, Han X G, *et al.* Effects of nitrogen additions on a *Leymus chinensis* population typical steppe of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(2): 311—317.
潘庆民, 白永飞, 韩兴国, 等. 氮素对内蒙古典型草原羊草种群的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(2): 311—317.
- [33] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371—379.
- [34] Tang Z S, Deng L, An H, *et al.* The effect of nitrogen addition on community structure and productivity in grasslands: A meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 31—38.
- [35] Yang Q, Wang W, Zeng H. Effects of nitrogen addition on plant community diversity and biomass of degraded grassland in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(4): 430—441.
杨倩, 王妮, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 430—441.
- [36] Xu Z W, Wan S Q, Ren H Y, *et al.* Effects of water and nitrogen addition on species turnover in temperate grasslands in Northern China. *PLoS One*, 2012, 7(6): e39762.
- [37] Zhao X F, Xu H L, Zhang P, *et al.* Effects of nutrient and water additions on plant community structure and species diversity in desert grasslands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 167—177.
赵新风, 徐海量, 张鹏, 等. 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.
- [38] Bai C L, Alata, Chen H J, *et al.* Effects of addition of nitrogen and water on plant community characteristics of *Stipa breviflora* desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(2): 69—75.
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. *中国草地学报*, 2013, 35(2): 69—75.
- [39] Zhao J X, Qu G P, Duo Ji D Z, *et al.* Relationship between species diversity and soil factors of alpine grasslands in north Tibet. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(6): 105—108.

- 赵景学, 曲广鹏, 多吉顿珠, 等. 藏北高寒植被群落物种多样性与土壤环境因子的关系. 干旱区资源与环境, 2011, 25(6): 105—108.
- [40] Luo Y Y, Meng Q T, Zhang J H, *et al.* Species diversity and biomass in relation to soil properties of alpine meadows in the eastern Tibetan Plateau in different degradation stages. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1298—1305.
- 罗亚勇, 孟庆涛, 张静辉, 等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落多样性、生产力与土壤特性的关系. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1298—1305.
- [41] Wang Z T, Yang L, Li G, *et al.* Effects of alfalfa (*Medicago sativa* L.) degradation on herbage distribution and diversity in the semi-arid Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10). doi: 10.5846/stxb201805181099.
- 王子婷, 杨磊, 李广, 等. 半干旱黄土区苜蓿退化对坡面草本植物分布及多样性的影响. 生态学报, 2019, 39(10). doi: 10.5846/stxb201805181099.
- [42] Zhao M, Zhao R F, Zhang L H, *et al.* Plant diversity and its relationship with soil factors in the middle reaches of the Heihe River based on the soil salinity gradient. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11). doi: 10.5846/stxb201806231386.
- 赵敏, 赵锐锋, 张丽华, 等. 基于盐分梯度的黑河中游湿地植物多样性及其与土壤因子关系. 生态学报, 2019, 39(11). doi: 10.5846/stxb201806231386.
- [43] Zhang X Y, Yu S Y, Li T T, *et al.* Relationship between species diversity, flora and soil environmental factors of the herb community in different habitats in Wenjiang River of Jinma River. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2019. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.10017.
- 张潇月, 鱼舜尧, 李婷婷, 等. 金马河温江段河岸带不同生境下草本植物多样性和植物区系与土壤环境因子的关系. 应用与环境生物学报, 2019. doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.10017.