

模拟增雨对白刺和油蒿幼苗化学计量特征的影响

李新乐^{1,2}, 李永华², 董雪¹, 段瑞兵^{1,2}, 张冉昊¹, 张景波^{1*}

(1 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心/内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古磴口 015200; 2 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: 降雨是荒漠生态系统过程和功能的最重要限制因子, 荒漠植物幼苗对生长季降雨的变化极端敏感。为探讨荒漠植物对未来降雨格局变化的响应, 该研究选取乌兰布和沙漠 2 种典型荒漠植物幼苗(白刺和油蒿)为研究对象, 根据生长季内(6~9 月)每次降雨量, 进行不同梯度的人工模拟增雨试验(CK. 自然降雨; A. 增雨 25%; B. 增雨 50%; C. 增雨 75%; D. 增雨 100%), 分析白刺和油蒿幼苗 C、N、P 含量及化学计量特征对降雨量变化的响应。结果表明: (1) 从 C、N、P 含量在幼苗不同器官分布来看, 与 CK 相比, 增雨显著降低了白刺幼苗茎的 C 含量和根的 C、P 含量($P < 0.05$), 在一定程度上提高了叶的 C、P 含量和根的 N 含量; 而增雨处理显著增加了油蒿幼苗茎和叶的 C 含量($P < 0.05$), 降低了叶、根的 N 含量和茎、叶、根的 P 含量。(2) 从化学计量比来看, 增雨对白刺幼苗茎、叶、根的 N:P 影响无显著差异, 比值均大于 16, 且在增雨的环境下白刺幼苗相对生长率较低, 主要受 P 元素限制; 油蒿幼苗根 N:P 与增雨量呈极显著负相关关系, 随增雨量的增加其相对生长率增大。研究认为, 模拟增雨对白刺幼苗和油蒿幼苗化学计量特征均有显著影响, 但二者幼苗 C、N、P 元素在各器官的分配格局有所不同, 增雨不利于白刺幼苗的生长, 而有利于油蒿幼苗的快速生长。

关键词: 白刺幼苗; 油蒿幼苗; 模拟增雨; 碳氮磷含量; 化学计量

中图分类号: Q948.12 文献标志码: A

Effect of Simulated Precipitation Addition on Stoichiometric Characteristics of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* Seedling

LI Xinle^{1,2}, LI Yonghua², DONG Xue¹, DUAN Ruibing^{1,2}, ZHANG Ranhao¹, ZHANG Jingbo^{1*}

(1 Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry/Dengkou Desert Ecosystem Research Station of Inner Mongolia, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 2 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Precipitation is the most important limiting factor for the processes and functions of desert ecosystems, and desert plant seedlings are extremely sensitive to precipitation changes during the growing season. In order to explore the response of desert plant seedlings to future precipitation patterns changes, we selected two typical desert plant seedlings (*Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica*) in UlanBuh desert as research objects. The stoichiometric characteristics of two plant seedlings were studied with artificial simulated precipitation addition experiment, including different gradients (CK. natural precipitation, A. +25% precipitation, B. +50% precipitation, C. +75% precipitation, D. +100% precipitation) according to the precipitation of growing season (June to September). The result showed that: (1) for the

收稿日期: 2019-10-23; 修改稿收到日期: 2020-02-24

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资助(CAFYBB2020MB007); 国家重点研发计划(2017YFC0503804)

作者简介: 李新乐(1989-), 男, 工程师, 研究方向为荒漠生态学。E-mail: nxylxl@126.com

* 通信作者: 张景波, 高级工程师, 博士, 研究方向为荒漠植物生态学。E-mail: 83850341@qq.com

distribution of C, N and P contents in different organs of seedlings, increase precipitation significantly reduced the C content of stems and C and P contents of roots of *N. tangutorum* seedlings, and increased C and P contents of leaves and the N content of roots ($P < 0.05$), while it significantly increased C content in stems and leaves of *A. ordosica* seedlings, and decreased N content in leaves and roots and the P content in stems, leaves and roots ($P < 0.05$). (2) For the stoichiometric ratio, the N : P of stems, leaves and roots of *N. tangutorum* seedlings is relatively constant, and the ratio is greater than 16, indicating that the relative growth rate of *N. tangutorum* seedlings is lower under the environment of precipitation addition, and is obviously restricted by P element. However, the N : P of *A. ordosica* seedlings showed a significant negative correlation with the increase of precipitation. The relative growth rate increased with the increase of precipitation. Therefore, simulated precipitation addition had a significant effect on the stoichiometric characteristics of the desert plant. Increasing precipitation is not conducive to the growth of *N. tangutorum* seedlings, but is more conducive to the rapid growth of *A. ordosica* seedlings.

Key words: *Nitraria tangutorum* seedlings; *Artemisia ordosica* seedlings; simulated precipitation addition; carbon, nitrogen and phosphorus content; stoichiometric characteristics

生态化学计量学是研究生态过程中 C、N、P 等元素耦合关系的一种方法^[1],能够反映植物的生存适应策略^[2]。近年来,国内外学者在生态化学计量学领域做了大量研究,涉及农作物^[3-4]、森林树种^[5]、草地优势种^[6-7],并对温度^[8]、降水^[9]、经纬度^[10]、光照^[11]、海拔^[12]等环境因子与化学计量的关联性进行了研究。

在全球变暖影响下,全球及区域降雨格局正在发生改变。气象数据分析显示,亚洲中部干旱地区降雨格局变化明显,主要表现为:降雨量增加 6%~30%、降雨时间分配改变、降雨强度增强^[13]。目前,国内外学者对降雨增加对植物生态化学计量特征的影响研究相对较少,研究报道多集中在近几年。赵珊宇等^[14]对樟子松叶片在自然降雨梯度下研究表明,叶片 C 含量随着降雨量增加呈下降趋势,叶片 N 含量和 N : P 呈增加趋势,植物叶 P 含量变化无一致性规律。马任甜等^[15]认为刺槐叶片 C、P 含量随着年降雨的升高而升高。对草本群落研究也证实,C 含量随降雨量的增加而增加^[16]。黄菊莹等^[17]对宁夏荒漠草原进行控雨实验,结果为不同植物化学计量特征对控雨响应不同,增雨提高了猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*) 和苦豆子 (*Sophora alopecuroides*) 叶片的 C 含量和 C : N,但降低了猪毛蒿叶片的 N 含量和 N : P,也降低了白草 (*Pennisetum centrasianicum*) 叶片的 N : P。也有研究认为,荒漠植物叶片化学计量学特征并不会因降雨增加而改变^[18]。可见,不同学者研究结果差异较大,对降雨增加条件下白刺和油蒿幼苗化学计量特征的影响研究报道较少,亟需进一步研究。

降雨是干旱区荒漠生态系统过程和功能的最重

要限制因子^[19],而幼苗生长被认为是植物生长过程中最重要和敏感的一个阶段,降雨格局变化必将改变其存活状况,进而对种群更新、群落组成和结构、物种多样性、生产力产生影响^[20]。因此,通过模拟降雨格局变化,研究其对荒漠植物幼苗碳氮磷含量和化学计量特征的影响,对于揭示植物对环境变化的响应和适应规律至关重要,也为预测未来降雨格局变化下,中国干旱区荒漠植被的演化方向与速率提供理论支撑和数据支持^[21]。白刺 (*Nitraria tangutorum*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 是乌兰布和荒漠重要的优势种、建群种,也是对降雨变化较为敏感的荒漠植物^[22-23]。在研究区,稀少、多变的降雨量对其生活史、生理特征影响很大,由于荒漠植物幼苗的早期阶段最脆弱,对水土条件变化最敏感,因此荒漠植物幼苗生长对环境的响应直接影响其幼苗存活及种群的更新动态^[24]。目前,前人通过人工控水实验对白刺和油蒿幼苗生长、根系形态、生物量分配和生理生态等方面进行了大量研究,但是按照自然降雨间隔模拟增雨的研究报道较少,本研究按照自然降雨间隔进行模拟增雨试验,旨在探讨白刺和油蒿幼苗碳氮磷含量和化学计量特征对模拟降雨格局变化的响应和差异,进而为科学地预测荒漠生态系统变化趋势、群落演替规律以及加快荒漠区植被恢复提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县,中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第二实验场,地理位置为 106°43' E, 40°24' N,海拔 1 050 m。

该区位于乌兰布和沙漠东北部,属于温带大陆性干旱气候,年平均气温 7.8 ℃,多年平均降雨量约 145 mm,降雨主要集中在 6~9 月份,约占全年降雨的 70%~80%,年蒸发量约 2 327 mm,无霜期 136 d,土壤类型为沙壤土。植被类型属于温带灌木荒漠,唐古特白刺是研究地点的优势植物,能够阻挡风沙并形成白刺灌丛沙包,沙包高约 1~3 m,直径约 6~10 m,植被盖度约为 45%~75%,伴生种有油蒿、沙鞭 (*Psammochloa villosa*) 和沙米 (*Agriophyllum squarrosum*) 等。群落盖度为 20%~30%。

1.2 实验设计

实验共设置 5 个降雨处理:即自然降雨 CK,在当年自然降雨量的基础上人工模拟增雨,分别增加 25%(A)、50%(B)、75%(C)和 100%(D),具体增雨量见表 1。采用随机区组设计,每个处理 8 个重复。

供试苗木为白刺和油蒿的 2 年生容器苗,供试土壤采用沙壤土,中等肥力,田间持水量为 25.7%,土壤取回后过筛,去除杂质后备用。试验采用室外盆栽种植,花盆中装入供试土壤,花盆外径为 20 cm,内径为 19.6 cm,高度为 22.5 cm。5 月初每盆植入 1 株,定植后充分灌水以保证成活率,苗木成活后选择长势一致的植株进行控水试验。试验于 2018 年 6 月至 10 月进行,根据每次自然降雨量的

不同,以每个自然降雨事件的降雨量、降雨间隔时间为基准,利用 10 个 50 L 圆柱形水桶收集降雨,并将每次截留下的雨水按实验设计用量筒装入喷壶,均匀洒入增雨处理的花盆中。实验期间定期进行除草和病虫害防治。

1.3 取样与测定

在 2018 年 10 月 14 日采集白刺和油蒿幼苗茎、叶、根样品,先用剪刀将植株从基部剪断,用信封袋分装其地上部分(茎和叶);然后用手轻轻拍打花盆外侧使花盆中的土体与花盆分离,用自来水慢慢冲洗土体,逐渐将完整根系从土体中分离,放在吸水纸上用吹风机将根系吹干,将完整的根系装入信封袋。将地上部分样品和根系样品带回实验室,并在烘箱中以 60 ℃ 恒温烘干,烘干后用植物粉碎机粉碎成 0.15 mm 粉末,测定粉碎样品中的有机碳、全氮和全磷含量。有机碳含量用重铬酸钾外加热法测定;全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用钼锑抗比色法测定。

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据整理分析,通过 SPSS 17.0 软件采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同增雨处理或不同植物幼苗对各参数的影响,显著性检验采用 LSD 法,检验的显著

表 1 模拟增雨量设置

Table 1 Simulated precipitation addition setting in experiment

时间 Time/(month/day)	自然降雨量 Precipitation/mm	人工模拟增雨量 Precipitation addition/mm			
		A	B	C	D
6/21	1.6	0.4	0.8	1.2	1.6
6/24	8.4	2.1	4.2	6.3	8.4
6/26	2.4	0.6	1.2	1.8	2.4
7/2	3.3	0.83	1.65	2.49	3.3
7/6	2.3	0.58	1.16	1.74	2.3
7/20	30.2	7.55	15.1	22.65	30.2
7/23	1.6	0.4	0.8	1.2	1.6
8/6	2.3	0.58	1.16	1.74	2.3
8/12	5.5	1.38	2.76	4.14	5.5
8/17	6.6	1.8	3.6	5.4	7.2
8/30	8.8	2.2	4.4	6.6	8.8
9/1	22.6	5.65	11.3	16.95	22.6
9/11	1.7	0.43	0.86	1.29	1.7
9/27	2.3	0.58	1.16	1.74	2.3
合计 Total	99.6	25.1	50.1	75.2	100.2

性水平定为 0.05。用 SigmaPlot 10.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 白刺幼苗不同器官 C、N、P 含量的变化特征

从不同增雨处理白刺幼苗茎、叶、根的 C、N、P 含量(表 2)来看,自然降雨(CK)的茎和根 C 含量较高,为 533.34 mg/g 和 486.25 mg/g,与增雨处理相比差异显著,叶的 C 含量较低,为 433.03 mg/g。说明增雨能够显著降低茎、根的 C 含量,显著提高叶的 C 含量。在 N 含量中,茎的 N 含量在各增雨处理之间无显著差异,叶 N 含量,除 A 处理偏低外,其他处理间差异不显著;根的 N 含量 D 处理最高,为 33.64 mg/g,倾向于随着增雨增加而增加的趋势。在 P 含量中,表现为茎在 CK 和 D 处理较高、叶为 D 处理最高、根为 CK 最高。总体来看,在不同增雨处理下,白刺幼苗茎、叶、根的 C、N、P 含量波动明显,与 CK 相比,增雨显著降低了茎的 C 含量和根的 C、P 含量,同时,也在一定程度上提高了叶的 C、P 含量和根的 N 含量。

2.2 白刺幼苗不同器官化学计量比的变化特征

从不同增雨处理下白刺幼苗 C、N、P 化学计量

比(表 3)来看,茎的 C:N、N:P 在各处理间无显著差异,说明茎的 C:N、N:P 较为恒定,受增雨影响较小。茎 C:P 在 A 处理下较高,为 416.72,CK、B、C 处理间无显著差异,D 处理 C:P 最低,为 381.04。叶的 C:N 除 A 处理最高(18.84)外,其他增雨处理差异不显著;N:P 在各处理间差异显著,由大到小排序为 B 处理>CK 对照>C 处理>A 处理>D 处理,比值分别为 30.17、29.29、27.24、21.65 和 19.80;N:P 以 CK 和 B 处理最高,A 和 D 处理最低。在根的 C:N 中 D 处理显著偏低,仅为 13.67,其他增雨处理间差异不显著;根 C:P 中 A、B 处理较高,分别为 271.21 和 275.07,CK 显著降低,仅为 179.72;N:P 在 CK 下为 11.32,显著低于增雨处理,且各增雨处理间无显著性差异。整体上看,白刺幼苗茎、叶、根的 C:N、N:P 较为恒定,但 C:P 变化趋势较为复杂,说明增雨对白刺幼苗的 C:P 影响较大。

2.3 油蒿幼苗不同器官 C、N、P 含量的变化特征

从增雨对油蒿幼苗 C、N、P 含量(表 4)的影响来看,茎 C 含量在 D 处理下最高,达 520.41 mg/g,CK 处理下最低,为 489.63 mg/g,随增雨量的增加呈显著增加趋势;N 含量在各增雨处理间无明显差

表 2 不同增雨处理下白刺 C、N、P 含量

Table 2 C, N and P content of *N. tangutorum* under different precipitation addition treatments

项目 Item	处理 Treatment	碳含量 C content		氮含量 N content		磷含量 P content	
		均值 Mean /(mg/g)	标准差 Standard deviation	均值 Mean /(mg/g)	标准差 Standard deviation	均值 Mean /(mg/g)	标准差 Standard deviation
茎 Stem	CK	533.34a	4.16	23.49a	0.67	1.33a	0.03
	A	505.79d	2.50	22.14a	0.20	1.21c	0.03
	B	524.76b	7.22	24.25a	0.22	1.28b	0.03
	C	513.73c	8.83	24.46a	0.46	1.27b	0.01
	D	521.26b	4.45	24.49a	0.95	1.37a	0.03
叶 Leaf	CK	386.34c	4.21	25.70a	0.21	0.88c	0.01
	A	433.03a	9.99	22.98b	0.15	1.06b	0.01
	B	381.19c	5.76	24.59a	0.15	0.82c	0.00
	C	397.68b	8.68	25.92a	0.28	0.95c	0.01
	D	375.90c	7.62	25.15a	0.10	1.27a	0.01
根 Root	CK	486.25a	7.25	30.62b	1.01	2.71a	0.04
	A	463.49b	3.92	28.01c	0.65	1.71c	0.00
	B	487.83a	12.75	31.75a	0.67	1.77c	0.02
	C	454.80c	7.33	30.77b	0.21	1.74c	0.01
	D	459.73b	6.11	33.64a	0.10	2.03b	0.03

注:不同字母表示在不同的增雨处理下,各参数差异显著($P < 0.05$),下同

Note: Different letters indicate significant difference in the plant different rainfall treatments ($P < 0.05$), the same as below

表 3 不同增雨处理下白刺 C、N、P 化学计量比

Table 3 C, N and P stoichiometry of *N. tangutorum* under different precipitation addition treatments

项目 Item	处理 Treatment	C : N		C : P		N : P	
		均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation
茎 Stem	CK	22.71a	0.75	402.56b	11.51	17.73a	0.36
	A	22.85a	0.31	416.72a	10.68	18.24a	0.29
	B	21.64a	0.49	409.07b	7.12	18.91a	0.45
	C	21.01a	0.63	405.70b	7.76	19.32a	0.55
	D	21.31a	1.01	381.04c	9.99	17.90a	0.70
叶 Leaf	CK	15.04b	0.08	440.43b	9.63	29.29a	0.59
	A	18.84a	0.31	407.92d	8.11	21.65c	0.10
	B	15.51b	0.23	467.71a	8.57	30.17a	0.36
	C	15.35b	0.29	417.92c	10.96	27.24b	0.68
	D	14.95b	0.36	295.94e	8.62	19.80c	0.16
根 Root	CK	15.88a	0.28	179.72d	0.27	11.32b	0.20
	A	16.55a	0.32	271.21a	1.57	16.39a	0.35
	B	15.37a	0.63	275.07a	9.69	17.90a	0.51
	C	14.78a	0.33	261.22b	3.52	17.67a	0.16
	D	13.67b	0.14	226.55c	4.29	16.58a	0.27

表 4 不同增雨处理下油蒿 C、N、P 含量

Table 4 C, N and P contents of *A. ordosica* under different precipitation addition treatments

项目 Item	处理 Treatment	碳含量 C content		氮含量 N content		磷含量 P content	
		均值 Mean /(mg/g)	标准差 Standard deviation	均值 Mean /(mg/g)	标准差 Standard deviation	均值 Mean /(mg/g)	标准差 Standard deviation
茎 Stem	CK	489.63d	4.47	10.30b	0.12	0.88a	0.00
	A	511.04b	4.70	10.32b	0.15	0.86a	0.02
	B	505.21c	9.69	10.51b	0.34	0.91a	0.02
	C	512.55b	6.22	11.43a	0.44	1.00a	0.01
	D	520.41a	8.93	8.80c	0.27	0.77b	0.01
叶 Leaf	CK	407.43e	13.80	23.17a	0.23	1.90a	0.02
	A	506.02a	11.97	18.58b	0.06	1.20b	0.01
	B	436.89d	2.55	16.83b	0.16	1.07b	0.01
	C	456.43c	11.03	19.63b	0.12	1.22b	0.02
	D	482.51b	7.01	17.42b	0.13	1.26b	0.01
根 Root	CK	477.04b	12.05	21.45a	0.13	1.55a	0.01
	A	484.08b	6.23	13.32b	0.21	1.31b	0.01
	B	501.96a	5.59	14.23b	0.14	1.38b	0.02
	C	463.28c	0.60	14.58b	0.05	1.42b	0.03
	D	409.94d	13.58	13.80b	0.05	1.48b	0.11

异;P含量在CK、A、B、C处理下无显著差异,D处理最低。叶C含量在CK下最低,为407.43 mg/g,

各增雨处理较CK显著增高;N含量和P含量在叶中的变化趋势一致,CK的N和P含量显著高于各

增雨处理,且各增雨处理间无显著差异。从根中的 C、N、P 含量变化可以看出,C 含量在 B 处理下最高,为 501.96 mg/g,D 处理最低,为 409.94 mg/g; N、P 含量 CK 最高,分别为 21.45 mg/g 和 1.55 mg/g,较各增雨处理显著增高。由此可知,增雨处理显著增加了油蒿幼苗茎和叶的 C 含量,而降低了叶、根的 N 含量和茎、叶和根的 P 含量。

2.4 油蒿幼苗不同器官化学计量比的变化特征

由表 5 可知,增雨对油蒿幼苗不同器官的 C : N、C : P、N : P 影响有所不同。与 CK 相比,A、B、C、D 增雨处理显著提高了茎的 C : P,叶的 C : N、C : P、N : P,根的 C : N、C : P,同时,A、B、C、D 增雨处理显著降低了根的 N : P。各增雨处理间茎的 N : P 差异不显著。

油蒿幼苗不同器官的化学计量比存在显著差异。茎的 C : N 最高,分布范围为 47.53~59.19; 根的 C : N 其次,为 22.24~36.34; 叶的 C : N 为各器官中最低,分布范围为 17.59~27.70。在 C : P 中,油蒿幼苗不同器官分布范围从大到小排序为茎 > 叶 > 根,分别为 553.24~677.56,214.95~421.64,276.95~368.74。而油蒿各器官 N : P 中,以叶最高,为 12.22~15.98; 茎其次,为 11.45~

12.02; 根最低,为 9.32~13.87。

3 讨论

生态化学计量学是研究生态系统生态过程中不同元素之间的平衡关系、植物与环境相互作用与 C、N、P 循环的新思路^[1]。本研究表明,白刺幼苗根的 N、P 含量高于茎和叶,而油蒿幼苗叶的 N、P 含量高于茎和根,说明白刺幼苗和油蒿幼苗 C、N、P 元素在各器官的分配格局有所不同。白刺幼苗和油蒿幼苗茎的 C 含量均高于叶和根,这与霸王枝条的 C 含量高于叶片,毛白杨树干和枝 C 含量显著高于根^[25] 研究结果一致,这是由于在各器官中茎的木质化程度较高,可能需要大量的 C 维持茎的正常生长。在不同增雨处理的影响下,油蒿幼苗茎、叶、根的 N 含量波动明显,与 CK 相比,增雨显著降低了油蒿幼苗叶片和根的 N 含量。干旱的条件下,植物通过增加叶片内部非光合器官或组织 N 的投入,提高细胞内部的渗透压,增强对体内水分的保护作用,提高自身对水分的利用效率,从而适应干旱少雨的环境^[26]。在本研究区内,随着降雨量增加,水分胁迫作用逐渐减缓,因此植物不再需要分配大量的 N 到叶片内部非光合器官或组织中,因此油蒿幼苗叶片和根的 N 含

表 5 不同增雨处理下油蒿 C、N、P 化学计量比

Table 5 C, N and P stoichiometry of *A. ordosica* under different precipitation addition treatments

项目 Item	处理 Treatment	C : N		C : P		N : P	
		均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	均值 Mean	标准差 Standard deviation
茎 Stem	CK	47.53b	0.98	557.03c	6.69	11.72a	0.11
	A	49.53b	0.99	595.06b	14.29	12.02a	0.46
	B	48.08b	0.74	553.24c	16.10	11.51a	0.36
	C	44.88c	1.32	513.48d	7.43	11.45a	0.50
	D	59.19a	2.76	677.56a	14.27	11.46a	0.39
叶 Leaf	CK	17.59c	0.73	214.95d	7.91	12.22c	0.11
	A	27.24a	0.73	421.64a	11.93	15.48a	0.13
	B	25.95a	0.40	409.68b	6.13	15.79a	0.26
	C	23.25b	0.70	375.58c	5.64	15.98a	0.35
	D	27.70a	0.20	382.82c	5.41	14.02b	0.13
根 Root	CK	22.24c	0.69	308.50c	9.93	13.87a	0.02
	A	36.34a	0.87	368.74a	3.34	10.15b	0.16
	B	35.28a	0.72	364.63a	8.50	10.33b	0.05
	C	31.78b	0.15	325.44b	7.88	10.24b	0.23
	D	29.70b	0.92	276.95d	1.38	9.32c	0.07

量下降。

在干旱荒漠区,水分是植物生长的主要驱动因子之一,也可能是造成生态学化学计量特征变化的主要原因^[2]。丁小慧等^[16]研究发现植物群落 C 含量随着降雨量的增加显著上升,而 N 和 P 含量随着降雨量的增加而降低。本研究表明,增雨量与白刺和油蒿幼苗的化学计量特征关系显著。对于白刺幼苗而言,C 含量和 C : N 与增雨量均存在极显著的负相关,而 N、P 含量与增雨量均存在显著或极显著的正相关,C : P 与增雨处理呈单峰曲线式相关,当增雨量小于 50%(B 处理)时,C : P 与增雨量呈极显著正相关;当增雨量大于 50%(B 处理)时,C : P 与增雨量呈极显著负相关。对于油蒿幼苗而言,C 含量和 C : P 与增雨量均存在显著或极显著的相关关系,在增雨量小于 50%时,C、C : P 与增雨量呈正相关;大于 50%时,C、C : P 与增雨量呈负相关。N 含量、N : P 与增雨都存在极显著负相关,P 含量和 C : N 与增雨量存在显著或极显著正相关。从降水变化对植物生态化学计量特征影响的内在机理而言,降水增加会导致土壤中元素的流动性加快,提高植物根系吸收和向叶片运输元素的能力^[27],还会加强植物与土壤间阳离子的交换能力,提高植物的利用率,从而产生植物组织中元素分配的不对称。有研究表明,水分增加后,植物光合速率、蔗糖合成酶和硝酸还原酶活性等都比正常水分条件下高,导致植物蔗糖与还原糖的含量以及总 N 含量升高,最终必然影响到植物 C、N 及 P 生态化学计量学特征^[28]。

C、N、P 元素是植物生长和元素循环中所必需的大量元素,与植物生长的关系极为密切,而 N、P 元素是植物生长的限制元素,其养分动态影响生态系统 C 平衡和凋落物分解速率^[29]。N : P 是决定群落结构和功能的关键性指标^[30],其变化趋势能良好地反映不同演替阶段的群落变化特征^[31],当 N : P 比大于 16 时,植物受 P 限制,当 N : P 小于 14 时,植物会受 N 限制,在 N : P 为 14~16 范围时,可以认为是受 2 种元素共同限制或 2 种元素都不缺少^[32]。并且可以作为植物演替阶段起限制性作用的营养元素指示剂^[33]。此外,N : P 可直接反映生物相对生长率,比值越低,植物的相对生长率越大^[34],本研究表明,白刺幼苗 N : P 与增雨量相关性不显著,各增雨处理的茎、叶、根 N : P 均大于 16,说明增雨对白刺幼苗的相对生长率影响不大,且受 P 元素限制明显。而油蒿幼苗 N : P 与增雨量呈极显著性负相关关系,说明随着降雨量的增加,油蒿幼苗相对生长率增大。因此,在增雨环境下,油蒿较白刺更加具有生长优势。

本研究表明,与 CK 相比,增雨显著降低了白刺幼苗茎的 C 含量和根的 C、P 含量,在一定程度上提高了叶的 C、P 含量和根的 N 含量;而增雨处理显著增加了油蒿幼苗茎和叶的 C 含量,降低了叶、根的 N 含量和茎、叶和根的 P 含量。在增雨环境下白刺幼苗相对生长率较低。而油蒿幼苗随雨量增加其相对生长率增大。因此,在降水增加的环境下,不利于白刺幼苗生长,而有利于油蒿幼苗的快速生长。

参考文献:

- [1] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(1): 2-6.
HE J S, HAN X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 2-6.
- [2] 智颖颀, 刘 珮, 马 慧, 等. 中国荒漠植物生态化学计量学特征与驱动因素[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2017, **48**(1): 97-105.
ZHI Y B, LIU P, MA H, et al. The eco-stoichiometric Characteristics and Driving Factors of Desert Plants in China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol*, 2017, **48**(1): 97-105.
- [3] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, **101**(30): 11 001-11 006.
- [4] ELSE T. Steuergestaltung und abhängige Grenzpreisquantifizierung bei Beendigung der Zielgesellschaft// Steuergestaltung und Grenzpreisbildung beim Kapitalgesellschaftskauf [M]. Deutscher Universitätsverlag, 2000.
- [5] MCGRODDY M E, SILVER W L, OLIVEIRA R C D. The effect of phosphorus availability on decomposition dynamics in a seasonal lowland amazonian forest[J]. *Ecosystems*, 2004, **7**(2): 172-179.
- [6] YANG K, HUANG J H, DONG D, et al. Canopy leaf N and P stoichiometry in grassland communities of Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 17-22.
- [7] 徐 沙, 龚吉蕊, 张梓榆. 不同利用方式下草地优势植物的生

- 态化学计量特征[J]. 草业学报, 2014, **23**(6): 45-53.
- XU S, GONG J R, ZHANG Z Y. The ecological stoichiometry of dominant species in different land uses type of grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, **23**(6): 45-53.
- [8] 刘旻霞, 朱柯嘉. 青藏高原东缘高寒草甸不同功能群植物氮磷化学计量特征研究[J]. 中国草地学报, 2013, **35**(2): 52-58.
- LIU M X, ZHU K J. Characteristics of nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in different functional groups on alpine meadow in the eastern edge of Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, **35**(2): 52-58.
- [9] 李玉霖, 毛伟, 赵学勇, 等. 北方典型荒漠及荒漠化地区植物叶片氮磷化学计量特征研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1 716-1 725.
- LI Y L, MAO W, ZHAO X Y, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in typical desert and desertified regions, North China[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1 716-1 725.
- [10] WENXUAN H, JINGYUN F, DALI G, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [11] 马志良, 杨万勤, 吴福忠, 等. 遮荫对紫花苜蓿地上生物量和化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(11): 3 139-3 144.
- MA Z L, YANG W Q, WU F Z, *et al.* Effects of shading on the aboveground biomass and stiochiometry characteristics of *Medicago sativa*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(11): 3 139-3 144.
- [12] 卢同平, 王艳飞, 王黎明, 等. 西双版纳热带雨林土壤与叶片生态化学计量特征的干湿度效应[J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2 333-2 343.
- LU T P, WANG Y F, WANG L M, *et al.* Effect of the humidity/aridity gradient on the ecological stoichiometry of soil and leaves in Xishuangbanna tropical rainforest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(7): 2 333-2 343.
- [13] 安文芝, 祝玲敏, 周文强, 等. 西北地区降水特征及变化规律分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, **24**(4): 194-199.
- AN W Z, ZHU L M, ZHOU W Q, *et al.* Analysis on characteristics and change patterns of precipitation in northwest China[J]. *Agricultural Research in The Arid Areas*, 2006, **24**(4): 194-199.
- [14] 赵娜宇, 黎锦涛, 孙学凯, 等. 樟子松人工林原产地与不同自然降水梯度引种地土壤和植物叶片生态化学计量特征[J]. 生态学报. 2018,**38**(20): 7 189-7 197.
- ZHAO S Y, LI J T, SUN X K, *et al.* Responses of soil and plant stoichiometric characteristics along rainfall gradients in Mongolian pine plantations in native and introduced regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,**38**(20): 7 189-7 197.
- [15] 马任甜, 安韶山, 黄懿梅. 黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J]. 应用生态学报, 2017, **28**(9): 2 787-2 793.
- MA R T, AN S S, HUANG Y M, C, N and P stoichiometry characteristics of different-aged *Robinia pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(9): 2 787-2 793.
- [16] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. 生态学报, 2012, **32**(11): 3 467-3 476.
- DING X H, LUO S Z, LIU J W, *et al.* Longitude gradient changes on plant community and soil stoichiometry characteristics of grassland in Hulunbeir[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(11): 3 467-3 476.
- [17] 黄菊莹, 余海龙, 刘吉利, 等. 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[J]. 生态学报, 2018, **38**(15): 96-107.
- HUANG J Y, YU H L, LIU J L, *et al.* Effects of precipitation levels on the C : N : P stoichiometry in plants, microbes, and soils in a desert steppe in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(15): 96-107.
- [18] 崔晓庆. 降雨、温度和氮沉降增加对新疆温带荒漠生态系统氮素去向和植物化学计量特征的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [19] ME W J L, SCHWINNING S, WILLIAMS D G, *et al.* Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation [J]. *Bioscience*, 2003, **53**(10): 941-952.
- [20] 张浩, 王新平, 张亚峰, 等. 干旱荒漠区不同生活型植物生长对降雨量变化的响应[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(7): 1 847-1 853.
- ZHANG H, WANG X P, ZHANG Y F, *et al.* Responses of plant growth of different life forms to rainfall amount changes in an arid desert area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(7): 1 847-1 853.
- [21] 张荣, 单立山, 李毅, 等. 人工模拟降雨格局变化对白刺幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2016, **25**(1): 117-125.
- ZHANG R, SHAN L S, LI Y, *et al.* Effect of change to simulated precipitation patterns on seedling growth of *Nitraria tangutorum*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, **25**(1): 117-125.
- [22] 何季, 吴波, 鲍芳, 等. 人工模拟增雨对乌兰布和沙漠白刺生物量分配的影响[J]. 林业科学, 2016, **52**(5): 81-91.
- HE J, WU B, BAO F, *et al.* Effects of simulated rain addition on biomass allocation of *Nitraria tangutorum* in Ulanbuh Desert [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(5): 81-91.
- [23] 辛智鸣, 黄雅茹, 章尧想, 等. 乌兰布和沙漠白刺与沙蒿群落多样性及其对降水的响应[J]. 河南农业科学, 2015, **44**

- (1): 117-120.
- XIN Z M, HUANG Y R, ZHANG Y X, *et al.* Community diversity of *Nitraria tangutorum* Bobr and *Artemisia sphaerocephala* in Ulanbuh Desert and its response to precipitation[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, **44** (1): 117-120.
- [24] 鲁为华, 朱进忠, 王东江, 等. 天山北坡围栏封育条件下伊犁绢蒿幼苗分布格局及数量动态变化规律研究[J]. *草业学报*, 2009, **18**(4): 17-26.
- LU W H, ZHU J Z, WANG D J, *et al.* Distribution pattern and dynamic population changes of *Seriphidium transiliense* seedlings in fenced enclosures in the northern Tianshan Mountains[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, **18**(4): 17-26.
- [25] 石莎, 陈春, 韩航. 蒙古沙冬青和霸王两种种子遗植物化学计量特征与生态适应性[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2018, **40**(5): 1 042-1 052.
- SHI S, CHEN C, HAN H. The stoichiometry and ecological adaptability of two relict plants *Ammopiptanthus mongolicus* and *Zygophyllum xanthoxylon*[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2018, **40** (5): 1 042-1 052.
- [26] SELIGMAN N G, SINCLAIR T R. Global environment change and simulated forage quality of wheat II. Water and nitrogen stress[J]. *Field Crops Research*, 1995, **40** (1): 29-37.
- [27] GONZALEZ-DUGO V, DURAND J L, GASTAL F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, **30**(3): 529-544.
- [28] SARDANS J, PENUELAS J, OGAYA R. Drought's impact on Ca, Fe, Mg, Mo and S concentration and accumulation patterns in the plants and soil of a Mediterranean evergreen *Quercus ilex* forest [J]. *Biogeochemistry*, 2008, **87** (1): 49-69.
- [29] 葛晓改, 曾立雄, 肖文发, 等. 三峡库区森林凋落叶化学计量学性状变化及与分解速率的关系[J]. *生态学报*, 2015, **35** (3): 779-787.
- GE X G, ZENG L X, XIAO W F, *et al.* Dynamic of leaf litter stoichiometric traits dynamic and its relations with decomposition rates under three forest types in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35** (3): 779-787.
- [30] 李明雨, 黄文广, 杨君珑, 等. 宁夏草原植物叶片氮磷化学计量特征及其驱动因素[J]. *草业学报*, 2019, **28**(2): 26-35.
- LI M Y, HUANG W G, YANG J L, *et al.* Factors influencing leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in plant species of Ningxia grasslands[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, **28**(2): 26-35.
- [31] 高三平, 李俊祥, 徐明策, 等. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2007, **27**(3): 947-952.
- GAO S P, LI J X, XU M C, *et al.* Leaf N and P Stoichiometry of common species in successional stages of the evergreen broad-leaved forest in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27** (3): 947-952.
- [32] 安钰, 安慧, 李生兵. 放牧对荒漠草原土壤和优势植物生态化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2018, **27**(12): 97-105.
- AN Y, AN H, LI S B. Effects of grazing on ecological stoichiometry of soil and dominant plants in desert grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(12): 97-105.
- [33] 刘红梅, 李洁, 王丽丽, 等. 氮添加对贝加尔针茅草原植物和土壤化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2018, **27**(7): 25-35.
- LIU H M, LI J, WANG L L, *et al.* Effects of nitrogen addition on the stoichiometric characteristics of plants and soil in the *Stipa baicalensis* grassland of Inner Mongolia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, **27**(7): 25-35.
- [34] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, **34**(1): 48-57.
- YAN E R, WANG X H, GUO M, *et al.* C : N : P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(1): 48-57.

(编辑:潘新社)