文章编号:1001-1498(2012)05-0626-06

# 模拟增雨对荒漠灌木白刺枝叶生长的促进作用

朱雅娟, 贾子毅, 吴 波, 卢 琦\*, 姚

(中国林业科学研究院荒漠化研究所,北京 100091)

摘要:根据年均降水量,分别在乌兰布和沙漠东北缘(内蒙古磴口,年均降水 145 mm)和巴丹吉林沙漠东南缘(甘肃 民勤, 年均降水 115 mm) 对天然白刺灌丛进行不同梯度的增雨实验(年均降水量的 0%、25%、50%、75%、100%)。 结果表明:增雨的比例越大,白刺形态特征的变化越明显;100%增雨对磴口和民勤白刺形态特征的影响最明显,能 够显著增加白刺标记枝的长度、直径和干质量,但是对成熟叶片和新叶片数的影响不显著;增雨还显著增加了9月 磴口和民勤白刺枝叶的干质量和鲜质量;在较干旱的民勤地区,较大的增雨量才能促进白刺枝条生长;50%增雨即 可促进夏末磴口白刺枝条生物量增加,75%增雨才能促进夏末民勤白刺枝条生物量增加。

关键词: 白刺: 降雨变化: 形态特征: 地上生物量

中图分类号: Q948.1, S793

文献标识码:A

# The Role of Increased Precipitation in Promoting Branch and Leaf Growth of Nitraria tangutorum

ZHU Ya-juan, JIA Zi-yi, WU Bo, LU Qi, YAO Bin

(Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract**: A rain-increasing test with different ratios of precipitation (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) were conducted on natural Nitraria tangutorum shrubland based on the mean annual precipitations at the northeast margin of Ulan Buh Desert (Dengkou of Inner Mongolia, 145 mm) and southeast margin of Badan Jaran Desert (Minqin of Gansu Province, 115 mm). The results showed that the more the precipitation increased, the more the change of morphological traits of N. tangutorum. The effect of 100% precipitation-increasing on morphological traits of N. tangutorum was significant both at Dengkou and Minqin; including length, diameter and dry biomass of marked branch, but not including the amount of mature leaf or new leaf. Fresh biomass and dry biomass of branch and leaf of N. tangutorum were also enhanced by increased precipitation in September both at Dengkou and Minqin. More increased precipitation could promote branch growth of N. tangutorum in more arid area. The biomass of N. tangutorum was enhanced by 50% increased precipitation in late summer in Dengkou. However, it was enhanced by 75% increased precipitation in late summer in Mingin.

Key words: Nitraria tangutorum; precipitation change; morphological trait; above ground biomass

水分是干旱区植物生长的主要限制因子之一。 水在夏季[1]。近年来,由于全球变化导致我国西北 干旱区的降雨量低(年均降水量低于200 mm),而且 降雨的季节分布不均匀,我国西北干旱区60%的降

干旱区的降水量逐渐增加[2],特别是春夏季降雨增 加[3]:那么,干旱区优势植物的生长对增加的降雨会

收稿日期: 2011-01-12

基金项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项"荒漠生态系统对全球变化的响应与适应对策"(201104077);中国林业科学研究院中 央公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目"西北干旱荒漠生态系统对脉冲式降雨的响应"(CAFYBB2007008)

作者简介: 朱雅娟(1980-),女,陕西眉县人,副研究员,主要研究方向是荒漠植物生态学.

<sup>\*</sup>通讯作者:卢琦,研究员,博士生导师,主要研究方向是荒漠化防治.

如何响应?灌木是干旱区植物的主要生活型之一,例如白刺属(Nitraria spp.)植物。前人仅在一个地区研究了增雨对一些灌木生长的影响,例如古尔班通古特沙漠南缘的梭棱<sup>[4-5]</sup>,毛乌素沙地的羊柴<sup>[6]</sup>以及一些灌木的幼苗<sup>[7-8]</sup>。这些研究的地域局限使得其研究结果仅在部分地区可以应用。目前,在干旱区的多个降雨量不同的地点,同时对一种植物进行增雨试验,来推测它对降雨变化的响应,还未见到相关研究报道。本文通过模拟增雨实验,在内蒙古磴口和甘肃民勤2个不同地区研究白刺的各项形态特征对增雨的响应,据此推测未来气候变化导致干旱区降雨增加对灌木生长的影响。

### 1 材料和方法

本研究选择乌兰布和沙漠东北缘和巴丹吉林沙漠东南缘的优势灌木白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)为材料<sup>[9]</sup>。实验分别在内蒙古磴口和甘肃民勤进行。磴口属中温带典型的半干旱大陆性气候,年均气温 7.6%;年均降水量 145 mm,且集中在 7-9 月份;年均潜在蒸发量 2 380.6 mm;年均风速 4.1 m·s<sup>-1</sup>,风沙危害为主要自然灾害。民勤属于温带大陆性干旱气候,年均气温为 7.68%;年均降水量为 115 mm,日降水量大于 0.1 mm 的平均天数为 36 d,降雨主要集中在 7-9 月;年均潜在蒸发量为 2 649.8 mm;年平均风速 2.3 m·s<sup>-1</sup>,全年盛行西北、西北偏西风,夏秋季节盛行东风。

模拟增雨实验分别在内蒙古磴口中国林科院沙漠林业实验中心二场和甘肃民勤荒漠生态系统定位研究站附近的天然白刺群落中进行。白刺枝条近似平卧,枝顶端形成硬刺。叶片肉质化,簇生在短枝上。枝条被沙埋后形成不定根进行营养繁殖。磴口白刺群落的植被盖度为 20%~30%,伴生植物有油蒿,沙鞭,沙米和虫实。白刺的枝叶覆盖整个沙丘。民勤白刺群落的植被盖度为 10%~15%,仅在雨量较大时伴生少量沙米和虫实。沙丘的迎风坡生长白刺灌丛,占沙丘面积的 15%~20%;背风坡是细沙土。

分别根据磴口和民勤的年均降水量进行不同比例的模拟增加降雨实验。增雨的比例分别为年均降水量的 0% (对照)、25%、50%、75%和 100%,共 5个处理。每个处理设置 4 个重复,共 20 个样方,随机区组排列。样方均为直径 12 m 的圆形,面积为213.04 m²。每个样方内包含 1~2 个白刺灌丛沙

丘。将全光照喷雾灌溉系统(中国林业科学研究院 林业研究所许传森等人发明)的底座放在样方的中 心,喷水时半径为2个6m长的臂被水力带动旋转, 可保证水分比较均匀的喷洒在样方中。模拟增雨实 验从 2008 年和 2009 年的 5 月初开始, 到 9 月末结 束。按照样方面积、年均降水量和增雨的比例分别 计算各地的总灌溉量。2008年,每个月增雨2次, 共10次,每次灌溉的水量是每个处理总灌溉量的 1/10, 磴口的单次增雨量分别为 0、3.63、7.25、 10.88、14.5 mm; 民勤的单次增雨量分别为0、2.88、 5.75、7.63、11.5 mm。2009年,每个月增雨1次,共 5次,每次灌溉的水量是每个处理总灌溉量的1/5; 磴口的单次增雨量分别为 0、7.25、14.5、21.75、29. 00 mm; 民勤单次增雨量分别为 0、5.75、11.50、 17.25 和23.00 mm。增雨的水源分别是样地附近的 井水。

2009 年实验期间记录磴口沙林中心二场和民 勤站的自然降雨量。6月增雨后第7天在每个样方 内的1个白刺灌丛沙丘上标记5个白刺枝条,测量 枝条的长度;从7—9月,每次增雨后第7天分别测 量标记枝条的长度(cm)、基部直径(mm)、成熟叶片 数量和新叶片数量;在样地附近采集20个与标记枝 类似的枝条,测量其长度、直径、成熟叶片和新叶片 数,然后装入纸袋带回实验室并在105 ℃下杀青 1 h,在80 ℃下烘24 h,测量干质量(g),建立干质量 与4个形态指标的多元回归方程,再根据标记枝的4 个形态指标推算其干质量。9月实验结束后分别在 各样方中设置1个小样方测量白刺地上部分生物 量。磴口的样方面积为25 cm × 25 cm, 民勤的样方 面积为50 cm×50 cm;剪下其中的白刺枝叶,用纸袋 带回实验室,测量枝叶鲜质量(g);在105 ℃下杀青 1 h,在80 ℃下烘24 h,测量枝叶干质量(g)。白刺 地上部分生物量换算为单位面积的生物量(g·  $m^{-2}$ )

利用 SPSS16. 0 软件,通过单因素方差分析 (one-way ANOVA)分析增雨的比例对 2 个地区白刺的标记枝长度、分枝总长度、直径、叶片数量、干质量和地上生物量的影响是否显著(p < 0.05)。如果显著,再通过 Duncan test 检验确定不同处理之间的差异性。

## 2 结果与分析

实验期间,磴口中国林科院沙林中心二场的自

然降雨总量是94.8 mm,其中,最大日降雨量(23.7 mm)出现在9月5日,8月18日降雨量为20.7 mm (图1A);5月和6月的月总降雨量均低于10 mm。民勤站的自然降雨总量是80.6 mm,其中,最大日降雨量(25.8 mm)出现在8月18日;5月到7月的月总降雨量均低于10 mm (图1B)。2009年6、7、8、9月,调查白刺枝条形态指标时,0%、25%、50%、75%和100%各增雨处理下磴口和民勤的天然和人工总降雨量见表1。

#### 2.1 模拟增雨对白刺标记枝形态特征的影响

2009 年 6—8 月,不同增雨比例下磴口白刺标记枝的长度差异达到极显著水平(p<0.01),75%和100%增雨后白刺标记枝长度显著高于其他处理。9 月不同增雨比例下白刺标记枝长度之间的差异也显著(p<0.05),100%增雨后白刺标记枝长度显著大于其他处理(p<0.05)(图 2)。

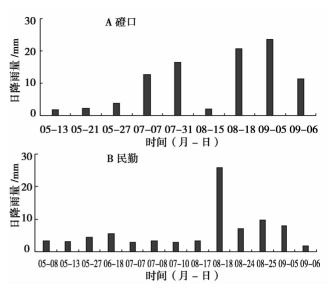


图 1 2009 年 5 月 1 日—9 月 30 日磴口沙林中心二场(A)和 民勤站(B)的日降雨量

表 1 2009 年 6—9 月磴口与民勤各处理的天然和人工总降雨量

增雨比例/%	磴口总降雨量/mm				民勤总降雨量/mm					
	05-10	06-13	07-12	08-13	09-14	05-10	06-09	07-12	08-17	09-09
0	0.00	7.70	20.50	37	94.80	3.20	10.7	25.10	28.3	80.60
25	3.63	22.20	42.25	76	131.05	8.95	22.2	42.35	51.3	109.35
50	7.25	36.70	64.00	95	167.30	14.70	33.7	59.60	74.3	138.10
75	10.88	51.20	85.75	124	203.55	20.45	45.2	76.85	97.3	166.85
100	14.50	76.70	107.50	153	239.80	26.20	56.7	94.10	120.3	195.60

2009年7—9月,不同增雨比例对磴口白刺标记枝基部直径之间的影响极显著(p<0.01);100%增雨的白刺标记枝的直径显著大于0%~50%(图2)。2009年7月,不同增雨比例对磴口白刺标记枝干质量的影响显著(p<0.05),100%增雨的干质量显著大于其他处理。8月,不同增雨比例对磴口白刺标记枝的影响极显著(p=0.001),75%和100%增雨的干质量显著大于其他处理。9月,不同比例的增雨对白刺标记枝的干质量的影响极显著(p<

0.001),100%增雨的干质量显著大于其他处理(图2)。

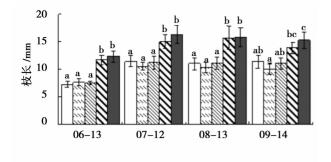
2009 年 7、8、9 月,磴口白刺标记枝的成熟叶片数量随着增雨比例的增加而增加,但是它们之间的差异不显著 (p > 0.05) (表 2);从 0% 到 75%,新叶片数量随着增雨比例的增加而增加,但是 100% 新叶片数量又减少,而且它们之间的差异不显著 (p > 0.05) (表 2)。

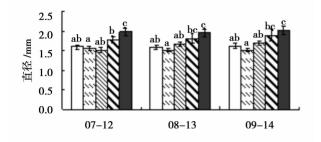
表 2 模拟增雨对 2009 年不同月份乌兰布和沙漠东南缘(磴口)白刺标记枝叶片数量的影响

增雨比例		成熟叶片数量/个		新叶片数量/个			
1%	7月	8月	9月	7月	8月	9月	
0	15.10 ± 1.50	18.50 ± 2.27	17.32 ± 2.67	19.00 ± 2.37	12.40 ± 1.48	10.74 ± 1.32	
25	$15.70 \pm 1.06$	$17.60 \pm 1.51$	$15.10 \pm 1.68$	$20.10 \pm 2.37$	$13.65 \pm 1.62$	$12.78 \pm 1.82$	
50	$15.50 \pm 1.32$	$20.50 \pm 2.33$	$18.05 \pm 2.43$	$20.20 \pm 3.18$	$16.47 \pm 2.90$	$18.47 \pm 3.62$	
75	$19.47 \pm 2.18$	$28.58 \pm 8.14$	$27.95 \pm 9.04$	$25.53 \pm 4.72$	$21.84 \pm 6.42$	$21.56 \pm 8.62$	
100	$25.20 \pm 2.86$	$30.25 \pm 4.03$	$28.90 \pm 3.81$	$23.80 \pm 3.91$	$19.90 \pm 3.47$	14.65 ± 3.37	

2009年6月,不同增雨比例下民勤白刺标记枝的长度差异达到极显著水平(p<0.001),75%和100%增雨后白刺标记枝长度显著高于对照。7月

和 8 月,不同增雨比例下白刺标记枝长度之间的差异不显著(p > 0.05)。9 月,100%增雨后白刺标记枝长度显著大于对照和 25% (p < 0.05)(图 3)。





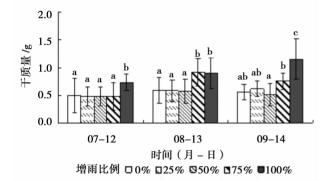
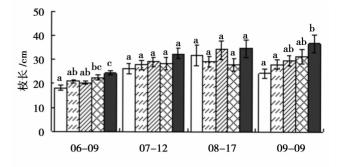


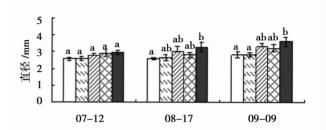
图 2 模拟增雨对乌兰布和沙漠东北缘(磴口)白刺标记枝形态 指标的影响(每个月以不同小写字母标记表示不同增雨比例之间 的差异显著(p<0.05))

2009年7月,不同增雨比例下民勤白刺标记枝基部直径之间的差异不显著 (p>0.05)。8月,100%增雨后白刺标记枝的直径略大于对照 (p=0.061)。9月,100%增雨后白刺标记枝的直径显著大于对照和25%增雨 (p<0.05)(图3)。

2009年7月,不同增雨比例下民勤白刺标记枝干质量之间的差异不显著(p>0.05)。8月,100%增雨后白刺标记枝的干质量略大于对照(p=0.122)。9月,100%增雨后白刺标记枝的干质量显著大于对照和25%增雨(p<0.05)(图3)。

2009年7、8、9月,民勤白刺标记枝的成熟叶片数量随着增雨比例的增加而增加,但是它们之间的差异不显著(p>0.05)(表3);新叶片数量随着增雨比例的增加先增加后减少,但是它们之间的差异没有达到显著水平(p>0.05)(表3)。





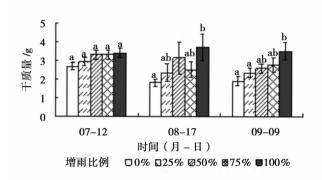


图 3 模拟增雨对巴丹吉林沙漠东南缘(民勤)白刺形态指标 的影响(注释同图 2)

#### 2.2 模拟增雨对白刺地上生物量的影响

2009年9月,磴口白刺地上部分枝叶的鲜质量随着增雨比例的增加而增加,50%~100%增雨后的鲜质量显著高于对照(p < 0.01)。白刺地上部分枝叶的干质量也随着增雨比例的增加而增加,50%和100%增雨后的干质量显著高于对照和25%(p < 0.05)(图 4A)。

2009年9月,民勤白刺地上部分枝叶的鲜质量随着增雨比例的增加而增加,75%和100%增雨后的鲜质量显著高于对照(p < 0.05)。白刺地上部分枝叶的干质量也随着增雨比例的增加而增加,75%和100%增雨后的干质量显著高于对照和25%(p < 0.01)(图 4B)。

# 3 结论与讨论

增雨对白刺形态特征的影响与雨量有关。100%

悪る	模拟地雨对 2009	在巴丹吉林沙漠在南缘!	(民勤)白刺标记枝叶片数量的影响

增雨比例/% -		成熟叶片数量/个			新叶片数量/个	
	7月	8月	9月	7月	8月	9月
0	41.77 ± 7.37	52.11 ±6.11	69.44 ± 9.17	75.46 ± 9.08	55.44 ±9.75	31.11 ±11.58
25	$41.18 \pm 3.98$	$55.38 \pm 5.51$	$76.00 \pm 8.73$	$91.12 \pm 9.23$	$77.56 \pm 9.52$	$53.88 \pm 12.18$
50	$45.09 \pm 6.01$	$62.70 \pm 6.72$	$82.80 \pm 9.64$	$105.36 \pm 10.66$	$78.40 \pm 10.54$	$50.70 \pm 12.96$
75	$40.57 \pm 6.02$	$58.89 \pm 7.36$	$70.00 \pm 12.36$	$94.29 \pm 11.21$	$74.71 \pm 9.30$	$80.00 \pm 14.79$
100	$55.45 \pm 5.98$	$67.00 \pm 4.56$	93.71 ±11.57	96.27 ± 15.49	$74.00 \pm 17.32$	$65.29 \pm 20.62$

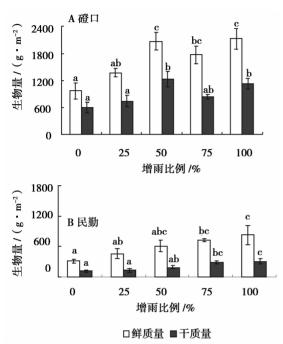


图 4 模拟增雨对 2009 年 9 月乌兰布和沙漠东北缘(A 磴口)和 巴丹吉林沙漠东南缘(B 民勤)白刺地上生物量的影响(注释同图 2)

增雨对两地白刺形态特征的影响最明显,能够显著增加磴口6—9月白刺标记枝的长度和7—9月白刺标记枝的直径、干质量;显著增加民勤6月和9月白刺标记枝的长度,以及8月和9月的直径和干质量;但是对两地白刺的叶片数量的影响不显著。75%增雨仅显著增加了磴口6—9月白刺标记枝的长度。75%增雨仅显著增加了6月民勤白刺标记枝的长度。

增雨对磴口7—9月白刺标记枝形态特征的影响都显著。这3个月磴口的自然降雨量都超过10mm,白刺生长没有受到干旱的影响;不同增雨处理的水分对白刺生长的作用产生差异。从时间来看,增雨对民勤白刺地上部分形态特征的效果在9月最明显。这可能是由于民勤5—8月前期的自然降雨量比较低,夏季气温高蒸发强烈,增雨的效果仅在样方内局部持续短时间有效,没有达到显著改变白刺标记枝各项形态指标的水平。8月底的自然降雨量

比较大,加上9月气温降低蒸发量减少,增加的水分 在白刺灌从土壤中保留的时间更长,对白刺的生长 起到了明显促进作用,因此土壤水分的有效性是影 响灌木生长的重要因素。例如,毛乌素沙地5月的 降雨量比较大,土壤含水量比较高,此时油蒿(Artemisia ordosica Krasch.)群落的枝条生长量最大[10]。 另外,白刺枝条生长对增雨的最低响应阈值在2个 地区不同。50%的增雨显著增加磴口9月白刺枝叶 的鲜质量和干质量;75%增雨才能显著增加民勤白 刺的枝叶的鲜质量和干质量。这可能与两地的自然 降雨量和增雨的雨量大小有关。磴口的年均降水量 (145 mm) 高于民勤(115 mm), 实验期间的自然降 雨量(94.8 mm)也高于民勤(80.6 mm),水分条件 较好,因此较小的增雨量(增雨50%,单次增雨量为 14.50 mm)能促进夏末白刺枝条显著生长;而民勤 的水分条件相对较差,较大的增雨量(增雨75%,单 次增雨量为17.25 mm)可促进夏末白刺枝条显著生 长;因此,在较干旱的地区,较大的增雨量才能促进 白刺枝条生长。

增雨也促进了其他荒漠灌木的生长,如生长季 降雨加倍后,古尔班通古特沙漠南缘梭梭(Haloxylon ammodendron Bunge)的小枝叶面积和生长速率增 加,地上部分干质量增加[4]。梭梭的枝条和同化枝 的含水量在增雨后显著增加,植株的碳同化增加,更 多光合产物向枝叶分配;而且在土壤上层发育出更 多根系[5]。降雨后梭梭和红砂(Reaumuria soongorica Maxim.)的叶片水势增加,呼吸速率增强[11]。随 着雨量的增加,毛乌素沙地的沙柳(Salix psammophila C. Wang et Chang Y. Yang)、蒙古岩黄芪(Hedysarum mongolicum Turcz.)和油蒿幼苗的高度增加,枝 条数量和长度增加,叶片数量和叶面积增加,枝、叶、 根以及总生物量增加[7]。随着降水量增加,红砂幼 苗的高度及其增长率减小;泡泡刺(Nitraria spaerocarpa Maxim.)幼苗的高度、增长率、生物量先增加后 降低;花棒(Hedysarum scoparium Fisch. et Mey.)的 高度增长率增加,生物量先增加后降低;白刺的高

度、增长率和生物量降低[8];然而,增雨也可能不改 变灌木的总生物量,而改变生物量的分配,如毛乌素 沙地羊柴(Hedysarum laeve Maxim)的总生物量变化 不显著,花和果实生物量在增雨后降低,而分枝的生 物量增加[6]。增雨也可能不影响荒漠灌木的生长, 如降雨后古尔班通古特沙漠南缘的地下水湿生植物 多枝柽柳(Tamarix ramosissima Ledeb)的叶片水势和 呼吸速率不变[11]。在美国大盆地的莫诺湖边的冷 荒漠和莫哈维沙漠北部欧文湖边的暖荒漠中,夏季 灌溉后只有沙牛胶兔木(Chrysothamnus nauseosus (Pall.) Britt.)的冠层生长的减少比自然降雨条件 下的少:其他3种植物普遍没有生长,可能是由于当 地的植物主要在春季生长,而生境中夏季的地下水 位比较高,缺乏养分或者受到物候期的限制[12]。在 犹他州南部连续2年分别在春季或夏季对灌木进行 25 mm 的增雨,2 种灌木(金雀花拳参(Gutierrezia sarothrae (Pursh) Shinners)和密叶滨藜 (Atriplex confertifolia (Torr. & Frem.) S. Wats.))的小枝生长都 没有受到显著影响[13]。在巴塔戈尼亚草原上,30 mm 灌溉后深根系灌木 Mulinum spinosum Phil. ( 伞 形科)的枝条生长速率不受影响,其原因可能是水分 没有到达深层土壤,植物处于生理休眠状态,或者土 壤深层的水势很高[14]。灌溉后西班牙东南部7种灌 木的相对生长速率和叶片特征变化不明显,可能是长 期干旱抑制它们的生长[15]。虽然奇瓦瓦沙漠中的石 碳酸灌从(Larrea tridentate (DC.) Cov.)的地上净第 1 性生产力与年均降水量呈正相关,但是它是冷季型 灌木,对夏季脉冲式降雨的响应很少,其生长主要受 冬季累积的土壤水分影响[16]。增雨对灌木形态特征 影响的差异可能与增雨量、增雨频率、气候和土壤差 异以及灌木的生态学特性等因素有关。

增雨显著增加了民勤和磴口白刺的枝条长度、直径和生物量(干质量),但是没有对其叶片数量产生显著影响。增雨还显著增加了两地白刺地上部分枝叶的生物量(鲜质量和干质量)。增加的雨量越大,增雨对白刺各项生长特征的效果越明显,100%增雨的效果最明显,75%次之。在较干旱的地区,较大的增雨量才能促进白刺枝条生长,50%增雨即可促进夏末磴口白刺的生物量增加,75%增雨才能促进夏末民勤白刺的生物量增加。因此,未来气候变化导致我国西北干旱区降雨增加后,将会促进白刺的生长,这将有利于它在沙漠地区的生存和扩展。考虑到人工局部增雨实验的效果远远小于较大范围自然降雨的效果,未

来实际降雨增加对白刺生长产生显著促进作用的幅度可能低于100%。除了降雨量之外,今后需要进一步研究降雨变化的其他方面,如降雨频率和季节分配等对灌木生长的作用,才能深入了解降雨变化可能对沙漠地区灌木生长的影响。

#### 参考文献:

- [1] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research of the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. New York: Oxford University Press, 1987: 60-92
- [2] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164
- [3] 徐利岗,周宏飞,梁 川,等.中国北方荒漠区降水多时间尺度 变异性研究[J].水利学报,2009,40(8):1002-1011
- [4] Xu H, Li Y, Xu G, et al. Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation [J]. Plant, Cell and Environment, 2007, 30: 399 409
- [5] 许 皓,李 彦,邹 婷,等. 梭梭(Haloxylon ammodendron) 生理 与个体用水策略对降水改变的响应[J]. 生态学报, 2007, 27 (12); 5019-5028
- [6] 朱雅娟,阿拉腾宝,董鸣,等.增加水分与养分对克隆植物羊柴自然种群繁殖权衡的影响[J].植物生态学报,2007,31(4):658-664
- [7] 肖春旺,周广胜,马风云.施水量变化对毛乌素沙地优势植物 形态与生长的影响[J].植物生态学报,2002,26(1):69-76
- [8] 李秋艳, 赵文智. 5 种荒漠植物幼苗对模拟降水量变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2006, 28 (3): 414-420
- [9] 吴征镒. 中国植物志[EB/OL]. http://www.cvh.ac.cn/gallery/wz\_list.asp,2009
- [10] 吴国玺, 张国盛, 王林和, 等. 毛乌素沙地臭柏、油蒿细根动态 及影响因子[J]. 于旱区资源与环境, 2007, 21(6): 156-162
- [11] Xu H, Li Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their response to rain pulse events [J]. Plant and Soil, 2006, 285: 5-17
- [12] Snyder K A, Donovan L A, James J J, et al. Extensive summer water pulses do not necessarily lead to canopy growth of Great Basin and northern Mojave Desert shrubs [J]. Oecologia, 2004, 141: 325 – 334
- [13] Gebauer R L E, Schwinning S, Ehleringer J R. Interspecific competition and resource pulse utilization in a cold desert community
  [J]. Ecology, 2002, 83 (9): 2602 2616
- [14] Golluscio R A, Sala O E, Lauenroth W K. Differential use of large summer rainfall events by shrubs and grasses: a manipulative experiment in the Patagonian steppe [J]. Oecoglogia, 1998, 115: 17-25
- [15] Padilla F M, Miranda J D, Jorquera M J, et al. Variability in a-mount and frequency of water supply affects roots but not growth of arid shrubs [J]. Plant Ecology, 2009, 204 (2): 261 270
- [16] Muldavin E H, Moore D I, Collins S L, et al. Aboveground net primary production dynamics in a northern Chinuahuan Desert ecosystem [J]. Oecoglogia, 2008, 155: 123 – 132