

中国沙棘克隆生长对土壤含水率的需求动态

邹旭¹, 郭峰², 唐翠平³, 高海银⁴, 刘春红⁴, 李根前^{1*}

(1. 西南林业大学, 云南 昆明 650224; 2. 黔西南布依族苗族自治州林业局, 贵州 兴义 562400;
3. 万源林业科技推广中心, 四川 达州 635000; 4. 定边县林业工作站, 陕西 定边 718600)

摘要:中国沙棘定居后依靠克隆生长维持种群稳定性,而水分状况是决定克隆生长能力的主导因素,但两者关系的研究目前均以特定年龄种群为对象。本研究基于连续4 a的观测结果,探讨中国沙棘克隆生长对土壤含水率需求随种群年龄增长的动态过程。结果表明:1)特定种群年龄下,分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力随土壤含水率的增大呈下开口抛物线变化,方程拐点(顶点)即为利于克隆生长的最佳土壤含水率。2)随着种群年龄的增大,分株个体越来越大、克隆子株数量越来越多、生物量越来越高,利于分株树高生长、克隆繁殖、生物量积累的最佳土壤含水率分别从15.67%、15.80%、15.77%升至16.80%、16.32%、16.37%。3)分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力之间呈极显著或显著正相关,即具有协同作用。由此可见,特定种群年龄下,克隆生长能力随土壤含水率的增大先升后降;随着种群年龄的增大,利于克隆生长的最佳土壤含水率不断提高。但在不同土壤含水率下,中国沙棘均可通过分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力的协同调节,形成与土壤含水率相适应的克隆生长格局,从而以更高的概率维持克隆持久性。

关键词:克隆生长;土壤含水率;中国沙棘;毛乌素沙地

中图分类号:S793.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)03-0021-06

Dynamic Demand of the Clonal Growth of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* to Soil Moisture

ZOU Xu¹, GUO Feng², TANG Cui-ping³, GAO Hai-yin⁴, LIU Chun-hong⁴, LI Gen-qian^{1*}

(1. Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Qianxinan Bouyei and Miao Nationality Autonomous Prefectures Bureau of Forestry, Xingyi, Guizhou 562400, China; 3. Wanyuan Forestry Science and Technology Extension Center, Dazhou, Sichuan 635000, China; 4. Dingbian Country Forestry Station, Dingbian, Shaanxi 718600, China)

Abstract: *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* relies on clonal growth to maintain population stability. Water status is the dominant factor in determining its clonal growth capacity. At present, researches on the relationship between the clonal growth and water status are mainly focused on the specific age populations. Based on the observed results for four consecutive years, this paper discussed the dynamic process of the clonal growth of *H. rhamnoides* ssp. *sinensis* on soil moisture with the increase of population age. It showed that 1) under the specific population age, ramet growth, clonal propagation (number of filial ramet) and biomass accumulation capacity showed downward opening parabola changes with the increase of soil moisture, and the inflection point (vertex) of the equation was the optimum soil moisture. 2) With the increase of population age, ramet individuals, number of filial ramet, and biomass increased. The favorable moisture contents which was beneficial to the ramet height growth, clonal propagation, and biomass accumulation increased from 15.67%, 15.8%, 15.77% to 16.8%, 16.32%, 16.37%, respectively. 3) There were significant positive correlations between ramet growth, clonal propagation, and biomass accumulation, indicating synergistic effects. Therefore, under specific population age, the clonal growth capacity of *H. rhamnoides* ssp. *sinensis* first increased and then decreased with the increase of soil moisture; with the increase of population age, the clonal growth capacity of *H. rhamnoides* ssp. *sinensis* increased, and the optimum soil moisture for clonal growth also increased. However, under different soil moisture conditions, *H. rhamnoides* ssp. *sinensis* can maintain its clonal growth through the synergistic regulation of ramet growth, clonal propagation, and biomass accumulation capacity, thus maintaining the sustainability of clonal growth with a higher probability.

收稿日期:2017-07-24 修回日期:2017-09-13

基金项目:国家自然科学基金(31570609, 31070551, 30371193); 云南省林学一流学科建设项目(51600625)。

作者简介:邹旭,男,硕士,研究方向:森林培育。E-mail:zxswfu@163.com

* 通信作者:李根前,男,教授,博士生导师,研究方向:森林培育学与森林生态学。E-mail:15825290016@163.com

cant or highly significant positive correlations among the heath growth,clonal propagation,and biomass accumulation,indicating the existence of synergistic effect. It could be seen that the growth capacity of clonal growth increased first and then decreased with the increase of soil moisture at specific population age. With the increase of population age,the optimum soil moisture for clonal growth increased. However,under different soil moistures,*H. rhamnoides* ssp. *sinensis* could form a clonal growth pattern corresponding to soil moisture by the synergistic regulation of ramet growth,clonal propagation (number of filial ramet) and biomass accumulation ability,so as to maintain clone persistence with higher probability.

Key words:clonal growth; soil moisture; *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*; Mu Us sandy land

克隆生长(clonal growth)是指自然状态下植物在其体型、年龄增长的同时,通过无性繁殖产生具有潜在存活能力的植株并实施种群扩散的过程^[1-3]。克隆生长包括分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累等过程。中国沙棘(*Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*)是我国“三北”地区优良的多用途树种,除了固氮培土、保持水土、防风固沙外^[4-6],叶片、果实可广泛用于医药、食品、饮料、化妆品及保健品制造^[6-7]。作为典型的根出条型克隆植物,其侧根的水平延伸、分枝和萌蘖能力极强,具有“独木成林”和“永生”的潜力,用于人工造林可获得“栽一株成一片”和“一劳永逸”的效果^[3,8-11]。然而,现实中既有50 a以上生长茂密、更新良好的林分,也有10 a左右衰退的林分^[4,9-10]。究其原因,中国沙棘定居后依靠克隆生长维持种群稳定性,克隆生长能力强则种群稳定性高,反之种群稳定性差^[10,13-15]。水分状况是决定克隆生长能力的主导因子,只有水分状况适宜时才能使克隆生长能力得到充分发挥,过高或过低均可抑制克隆生长^[16-17]。因此,围绕克隆生长能力与水分状况的关系已开展了大量研究工作,但这些研究都局限于特定年龄的种群^[15-20]。随着种群年龄的增大,克隆生长对土壤水分的需求如何变化?本研究基于4 a的连续观测结果,探讨随种群年龄增大,分株生长、克隆繁殖、生物量积累等克隆生长能力指标与土壤含水率的动态关系,寻求人工林早衰的原因,并丰富植物克隆生长研究的案例。

1 研究区概况

研究区位于毛乌素沙地南缘的陕西省定边县,107°15′—108°22′E,36°49′—37°53′N;属温带半干旱大陆性季风气候,干旱少雨、蒸发强烈、日照充足;年均降水量316.9 mm、蒸发量2 490 mm、无霜期141 d,年均气温7.9℃,≥10℃积温2 989.6℃。自然地貌为黄土高原与内蒙古鄂尔多斯高原的过渡地带,沙丘连绵、起伏不平,海拔1 303~1 907 m;土壤以黄绵土、风沙土、盐碱土为主,质地均匀、疏松多孔、耕性良好,但有机质含量低、养分贫瘠、保水保肥

能力差。地带性植被类型为半荒漠草原,人工种植的树种主要有中国沙棘、河北杨(*Populus hopeiensis*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等。

2 研究方法

2.1 试验设计与田间布设

试验采用单因素回归设计^[21-22],在流量一定的前提下通过调控灌水时间调节灌水强度,灌水方式为全面灌溉。根据预备试验结果^[16]将灌水强度划分为3个梯度,分别相当于试区年均降水量的3、6、9倍,以不灌水作为对照(表1)。灌水于5—8月份进行,灌水日期为每月5、10、15、20、25、30日(表1)。小区之间以垄分开,垄宽0.5 m、高0.3 m,在垄中央埋入1 m的油毛毡和厚塑料膜进行隔离以防止渗水。田间排列采用随机区组法,重复3次,每个重复由4个小区(处理)组成;小区面积为15 m×2 m,每个小区栽植沙棘实生苗30株,株行距为1 m×1.5 m。

2.2 结果调查与测定

2.2.1 分株生长及克隆繁殖调查 分株生长量采用“每木检尺法”,即逐株测定每个分株的树高、地径和冠幅生长量;子株数量(克隆繁殖)采用“格子样方计数法”,即逐个小区统计克隆子株数量。跟踪调查过程中,根据萌蘖的形态、距离、基部弯曲走向等将其分为合轴型分株和单轴型分株,分别测定、统计^[23]。试验调查结束时,采用“跟踪挖掘法”,即沿萌蘖根逐级、逐条挖出每个分株,对跟踪调查的结果进行订正^[16]。

表1 灌水试验设计
Table 1 Experimental design of irrigation

处理号	灌水强度 /倍	相当于 降雨量/mm	灌水量 /(kg·次 ⁻¹)	灌水时间
1	0	300	0	0
2	3	900	1 687	4 min 40 s
3	6	1 800	3 374	9 min 20 s
4	9	2 700	5 061	14 min 00 s

2.2.2 种群生物量测定 种群生物量采用“平均标

准木法”，即根据每木检尺结果选择平均标准木，并分别将地上部分(叶、枝、干)和地下部分(全部挖出后)称量鲜重，按一定比例取样带回实验室采用“烘干法”称取干重，据此推算种群生物量并建立相对生长方程，用于估算不同年龄的种群生物量^[16]。

2.2.3 土壤含水率测定 土壤含水率测定采用“烘干法”，于土层 30~50 cm(中国沙棘土壤水分强吸收层)^[24]用铝盒采集土壤样品，每块样地采集 3 个点，重复 3 次，称取鲜重并密封后将其带回实验室烘干计算土壤含水率^[17]。

2.3 数据分析

所有数据采用 SPSS 17.0 统计软件进行分布型检验、差异显著性检验、回归分析及相关性分析，绘图采用 Excel 2010。分析之前，对土壤含水率进行平方根反正弦转换^[22]。

3 结果与分析

3.1 分株生长对土壤含水率的需求动态

由表 2 和图 1 可见：随着土壤含水率的增大，1~4 a 种群分株树高生长量均呈下开口抛物线变化，方程拐点即为树高生长量最大时的土壤含水率，

即最佳土壤含水率。通过求导，1、2、3、4 a 种群分株树高生长的最佳土壤含水率分别为 15.67%、15.83%、16.54%、16.80%。而且，分株地径、冠幅生长量与土壤含水率之间的关系与此趋势相同。由此表明：特定种群年龄下，分株生长量随土壤含水率的增大先升后降。当土壤含水率<最佳土壤含水率，分株生长量随着土壤含水率的增大而上升；当土壤含水率=最佳土壤含水率，分株生长量达到最大值；当土壤含水率>最佳土壤含水率，分株生长量随着土壤含水率的增大而下降。同时，随着种群年龄的增大，分株体型随之增大，利于分株生长的最佳土壤含水率持续升高。

3.2 子株数量对土壤含水率的需求动态

由表 3 和图 2 可见：随着土壤含水率的增大，1~4 a 种群的克隆子株数量均呈下开口抛物线变化。通过求导，1、2、3、4 a 种群子株数量最大时的土壤含水率分别为 15.80%、15.96%、16.17%、16.32%。由此表明：特定种群年龄下，子株数量随着土壤含水率的增大先升后降；随着种群年龄的增大，子株数量增多，利于克隆繁殖(子株数量)的最佳土壤含水率持续升高。

表 2 分株生长与土壤含水率的回归关系

Table 2 Regression relationship between ramet growth and soil moisture

回归变量	回归方程	相关系数	显著性	最佳土壤含水率/%
1 a 种群分株树高与土壤含水率	$y = -0.009x^2 + 0.282x - 1.518$	0.883	$P < 0.01$	15.67
2 a 种群分株树高与土壤含水率	$y = -0.024x^2 + 0.760x - 4.236$	0.922	$P < 0.01$	15.83
3 a 种群分株树高与土壤含水率	$y = -0.026x^2 + 0.860x - 4.574$	0.893	$P < 0.01$	16.54
4 a 种群分株树高与土壤含水率	$y = -0.027x^2 + 0.907x - 4.757$	0.922	$P < 0.01$	16.80
1 a 种群分株地径与土壤含水率	$y = -0.189x^2 + 6.034x - 32.825$	0.939	$P < 0.01$	15.96
2 a 种群分株地径与土壤含水率	$y = -0.362x^2 + 11.691x - 63.418$	0.942	$P < 0.01$	16.14
3 a 种群分株地径与土壤含水率	$y = -0.530x^2 + 17.139x - 94.539$	0.936	$P < 0.01$	16.16
4 a 种群分株地径与土壤含水率	$y = -0.436x^2 + 14.812x - 76.040$	0.926	$P < 0.01$	16.99
1 a 种群分株冠幅与土壤含水率	$y = -0.006x^2 + 0.190x - 0.781$	0.889	$P < 0.01$	15.83
2 a 种群分株冠幅与土壤含水率	$y = -0.015x^2 + 0.479x - 2.278$	0.909	$P < 0.01$	15.97
3 a 种群分株冠幅与土壤含水率	$y = -0.012x^2 + 0.393x - 1.501$	0.888	$P < 0.01$	16.38
4 a 种群分株冠幅与土壤含水率	$y = -0.014x^2 + 0.465x - 1.919$	0.837	$P < 0.01$	16.61

表 3 子株数量与土壤含水率的回归关系

Table 3 Regression relationships between ramet number and soil moisture

回归变量	回归方程	相关系数	显著性	最佳土壤含水率/%
1 a 种群子株数量与土壤含水率	$y = -4.546x^2 + 143.678x - 950.864$	0.909	$P < 0.01$	15.80%
2 a 种群子株数量与土壤含水率	$y = -8.554x^2 + 272.983x - 1795.47$	0.889	$P < 0.01$	15.96%
3 a 种群子株数量与土壤含水率	$y = -10.429x^2 + 337.194x - 2214.287$	0.914	$P < 0.01$	16.17%
4 a 种群子株数量与土壤含水率	$y = -11.525x^2 + 376.171x - 2468.765$	0.939	$P < 0.01$	16.32%

3.3 生物量积累对土壤含水率的需求动态

由表 4 可见：4 a 种群生物量、地上生物量、地下生物量与地径(D)存在极显著的回归关系，因此采用这些方程可以估计 1、2、3 a 种群生物量、地上生

物量和地下生物量(表 5)。

由表 5 和图 3 可见：随着土壤含水率的增大，1~4 a 的种群生物量、地上生物量、地下生物量均呈下开口抛物线变化。通过求导，1、2、3、4 a 种群生物

量最大时的土壤含水率分别为 15.77%、15.97%、16.15%、16.37%。而且,1~4 a 种群地上生物量、地下生物量的最佳土壤含水率的变化与此趋势相同。由此表明:特定种群年龄下,种群生物量、地上

生物量、地下生物量随着土壤含水率的增大先升后降;随着种群年龄的增大,种群生物量增加,利于种群生物量、地上生物量、地下生物量积累的最佳土壤含水率持续升高。

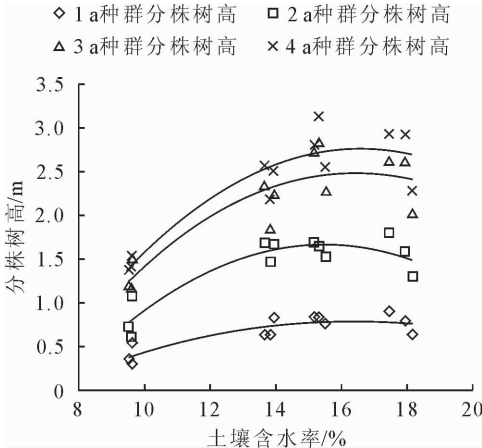


图 1 分株树高生长量与土壤含水率的关系

Fig. 1 The relationship of ramet height growth and soil moisture

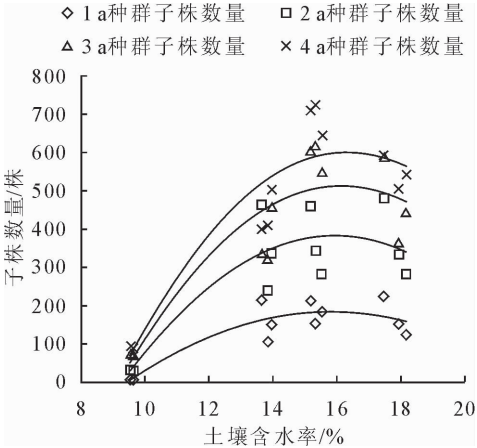


图 2 子株数量与土壤含水率的关系

Fig. 2 The relationship of ramet number and soil moisture

表 4 生物量与分株生长量回归关系

Table 4 Regression relationships between biomass and ramet growth

4 a 生物量	回归方程	相关系数	显著性	F
种群生物量	$W=9.8E^{-6}D^{4.703\ 3}$	0.951	$P<0.01$	94.471
种群地上生物量	$W=3.5E^{-6}D^{4.835\ 2}$	0.953	$P<0.01$	97.870
种群地下生物量	$W=9.4E^{-6}D^{4.477\ 8}$	0.935	$P<0.01$	69.064

表 5 生物量与土壤含水率的关系

Table 5 The relationship of biomass and soil moisture

生物量	生物量 估计值/kg	回归方程	相关系数	显著性	最佳土壤 含水率/%
1a 种群生物量	2.539	$y=-0.088x^2+2.775x-18.307$	0.812	$P<0.01$	15.77
2a 种群生物量	67.026	$y=-2.158x^2+68.976x-457.389$	0.822	$P<0.01$	15.97
3a 种群生物量	362.460	$y=-12.023x^2+388.376x-2\ 617.56$	0.797	$P<0.05$	16.15
4a 种群生物量	634.265	$y=-19.387x^2+634.821x-4\ 292.209$	0.934	$P<0.01$	16.37
1a 种群地上生物量	1.296	$y=-0.045x^2+1.428x-9.426$	0.806	$P<0.01$	15.87
2a 种群地上生物量	37.506	$y=-1.217x^2+38.882x-257.984$	0.816	$P<0.01$	15.97
3a 种群地上生物量	212.990	$y=-7.116x^2+229.804x-1\ 549.955$	0.791	$P<0.05$	16.15
4a 种群地上生物量	383.060	$y=-11.721x^2+386.256x-2\ 630.261$	0.839	$P<0.01$	16.48
1a 种群地下生物量	1.322	$y=-0.045x^2+1.424x-9.389$	0.823	$P<0.01$	15.82
2a 种群地下生物量	29.848	$y=-0.947x^2+30.296x-200.721$	0.833	$P<0.01$	16.00
3a 种群地下生物量	148.482	$y=-4.861x^2+157.072x-1\ 057.098$	0.806	$P<0.01$	16.16
4a 种群地下生物量	251.206	$y=-7.667x^2+248.565x-1\ 661.948$	0.984	$P<0.01$	16.21

3.4 克隆生长参数之间的相关性

由表 6 可见,特定年龄种群的分株树高、子株数量、种群生物量两两之间均存在极显著正相关关系,不同年龄种群的分株树高、子株数量、种群生物量两两之间也存在显著或极显著正相关关系。由此表明,特定种群年龄的分株树高、子株数量(克隆繁殖)、种群生物量之间具有协同效应,即彼增此增;随着种群年龄的增长,分株树高越大、子株数量越多则种群生物量越高。

4 结论与讨论

特定种群年龄下,中国沙棘分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力随着土壤含水率的增大呈下开口抛物线变化即先升后降,方程拐点即为利于克隆生长的最佳土壤含水率。随着种群年龄的增大,分株体型增大、子株数量增多、生物量提高,利于分株生长、克隆繁殖(子株数量)和生物量积累的最佳土壤含水率持续上升,且分株生长、克隆繁殖

表6分株生长、子株数量和种群生物量之间的关系

Table 6 The relationships between ramet growth, ramets number and population biomass

生长参数	1 a 种群 分株树高	2 a 种群 分株树高	3 a 种群 分株树高	4 a 种群 分株树高	1 a 种群 子株数量	2 a 种群 子株数量	3 a 种群 子株数量	4 a 种群 子株数量	1 a 种群 生物量	2 a 种群 生物量	3 a 种群 生物量	4 a 种群 生物量
1 a 种群分株树高	1.000											
2 a 种群分株树高	0.949 **	1.000										
3 a 种群分株树高	0.936 **	0.927 **	1.000									
4 a 种群分株树高	0.929 **	0.926 **	0.989 **	1.000								
1 a 种群子株数量	0.858 **	0.922 **	0.902 **	0.902 **	1.000							
2 a 种群子株数量	0.854 **	0.926 **	0.908 **	0.906 **	0.979 **	1.000						
3 a 种群子株数量	0.906 **	0.854 **	0.910 **	0.913 **	0.881 **	0.851 **	1.000					
4 a 种群子株数量	0.895 **	0.850 **	0.922 **	0.925 **	0.868 **	0.837 **	0.987 **	1.000				
1 a 种群生物量	0.763 **	0.888 **	0.861 **	0.870 **	0.926 **	0.944 **	0.722 **	0.715 **	1.000			
2 a 种群生物量	0.759 **	0.883 **	0.859 **	0.868 **	0.926 **	0.946 **	0.729 **	0.724 **	0.998 **	1.000		
3 a 种群生物量	0.784 **	0.785 **	0.922 **	0.917 **	0.826 **	0.783 **	0.828 **	0.858 **	0.788 **	0.781 **	1.000	
4 a 种群生物量	0.865 **	0.823 **	0.907 **	0.913 **	0.835 **	0.795 **	0.964 **	0.993 **	0.684 *	0.695 *	0.874 **	1.000

注: ** 代表极显著 $P<0.01$, * 代表显著 $P<0.05$ 。

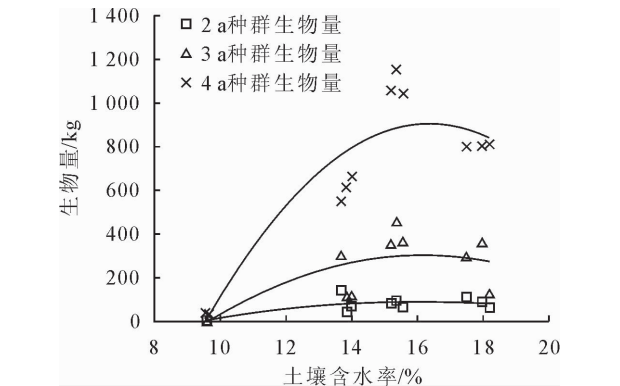


图3生物量与土壤含水率的关系

Fig. 3 The relationship of biomass and soil moisture

(子株数量)和生物量积累能力具有协同效应。由此可见,特定种群年龄下,中国沙棘克隆生长能力在最佳土壤含水率时最强,大于或小于最佳土壤含水率,克隆生长能力降低;随着种群年龄的增大,利于中国沙棘种克隆生长的最佳土壤含水率持续上升。另一方面,中国沙棘通过分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力的协同调节,形成与土壤含水率相适应的克隆生长格局。

究其原因,中国沙棘主栽于北方干旱、半干旱地区,水分是决定分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力的限制性因子^[16-17,19-20]。在不同的水分状况下,中国沙棘通过克隆生长调节形成与之相适应的克隆生长格局,从而以更高的概率维持种群稳定性和克隆持久性^[14-17,19-20,25]。李甜江^[16]等、李孙玲^[17]等的研究表明,适当灌水可以促进中国沙棘克隆生长,但土壤含水率过高反而使克隆生长受到抑制。本试验中,当土壤含水率过低(或过高)时,中国沙棘以降低分株生长和克隆繁殖能力为代价适应干旱缺水的环境,种群以分株小、子株少(分布稀疏)

为特征,克隆生长格局倾向于“游击型”,生物量积累能力随之降低;当土壤含水率适宜时,分株生长、克隆繁殖潜力得以充分发挥,种群以分株大、子株多(分布密集)为特征,克隆生长格局倾向于“聚集型”,生物量积累能力随之提高。因此,随着土壤含水率“过低-适宜-过高”的连续变化,克隆生长格局呈现与之相适应的“游击型-聚集型-游击型”生态对策连续体,分株生长量、子株数量、种群生物量也呈“低-高-低”的连续变化过程。另一方面,在克隆生长调节过程中,分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力具有协同作用。因此,随着种群年龄的增大,分株体型越来越大,子株数量越来越多,生物量越来越高,克隆生长所需的适宜土壤含水率也随之提高。

综上所述,特定种群年龄下,分株生长、克隆繁殖(子株数量)、生物量积累能力随着土壤含水率的增大先升后降,克隆生长能力只有在适宜土壤含水率时才能得到充分发挥;随着种群年龄的增大,克隆生长所需适宜土壤含水率越来越高。因此,在旱区特定土壤含水率下,种群发育到一定年龄必然会因水分不足而早衰甚至死亡,及时调节种群特征与土壤水分状况的关系是中国沙棘人工林稳定性长期维持的必由之路。

参考文献:

[1] SILVERTOWN J W. Introduction to plant population ecology [M]. New York: Longman, 1982: 108-120.

[2] DE KROON H, VAN GROENENDAEL J. The ecology and evolution of clonal plants[M]. The Netherlands: Backhuys Publisher, 1997: 1-20.

[3] TAKAHASHI M K, HORNER L M, KUBOTA T, et al. Extensive clonal spread and extreme longevity in saw palmetto, a

foundation clonal plant[J]. *Molecular Ecology*, 2011, 20(18): 3730-3742.

[4] 李根前,唐德瑞,赵一庆.沙棘的生物学与生态学特性[J].西北植物学报,2000,20(5):892-897.

LI G Q,TANG D R,ZHAO Y Q. The biological property and ecological habit of *Hippophae*[J]. *Acta Botanica Boreal-occidentalia Sinica*, 2000, 20(5): 892-897. (in Chinese)

[5] 胡建忠.“三北”地区沙棘属植物的区域化种植开发探讨[J].水土保持研究,2006,13(1):4-7.

HU J Z. Strategic thought on regionalization of plantation and development of *Hippophae* in Three North areas of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 4-7. (in Chinese)

[6] 李根前,唐德瑞,赵一庆.沙棘属植物资源与开发利用[J].沙棘,2000,13(2):22-26.

[7] 丁小林,秦利平.沙棘中的营养成分与生物活性物质研究进展[J].中国食物与营养,2008(9):57-59.

[8] WANG J C,SHI X,YIN L K,*et al.* Role of clonal integration in life strategy of sandy dune plant, *Eremospartion songori* (Litv) Vass (Fabaceae): experiment approach[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2011, 59(3): 455-461.

[9] 郭峰,唐翠平,徐德兵,等.木本克隆植物中国沙棘种群林缘扩散规律研究[J].云南大学学报:自然科学版,2015,37(2):310-316.

GUO F,TANG C P,XU D B,*et al.* The edge dispersal regulation of the population of clonal tree species *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis*[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2015, 37(2): 310-316. (in Chinese)

[10] 贺斌,李根前,徐德兵,等.沙棘克隆生长及其生态学意义[J].西北林学院学报,2006,21(3):54-59.

HE B,LI G Q,XU D B,*et al.* The clonal growth and its ecological significance of *Hippophae*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(3): 54-59. (in Chinese)

[11] SILVERTOWN J,FRANCO M,PISANTY I,*et al.* Comparative plant demography-relative importance of life-cycle components to the finite rate of increase in woody and herbaceous perennials[J]. *Journal of Ecology*, 1993, 81(3): 465-476.

[12] 曾诚,陈贝贝,肖智勇,等.毛乌素沙地土壤水分对中国沙棘人工林稳定性及生产力的影响[J].林业资源管理,2016(1):99-104.

ZENG C,CHEN B B,XIAO Z Y,*et al.* Influence of soil physico-chemical properties in Maowusu sandland on the stability and productivity of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* plantation[J]. *Forest Resources Management*, 2016(1): 99-104. (in Chinese)

[13] 徐德兵,赵粉侠,李根前,等.中国沙棘种群稳定性维持机制的探讨[J].福建林业科技,2008,35(2):148-152.

[14] 代光辉,李根前,李甜江,等.水分条件对中国沙棘生长及种群稳定性的影响[J].西北林学院学报,2011,26(2):1-8.

DAI G H,LI G Q,LI T J,*et al.* Effects of water conditions on the growth and population stability of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(2): 1-8. (in Chinese)

[15] 陈贝贝,曾诚,高海银,等.中国沙棘人工林持久性对土壤水分状况的响应[J].中南林业科技大学学报,2016,36(7):67-71.

CHEN B B,ZENG C,GAO H Y,*et al.* Response of the persistence of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* plantation to soil moisture conditions[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, 36(7): 67-71. (in Chinese)

[16] 李甜江,李根前,徐德兵,等.中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应[J].生态学报,2010,30(24):6952-6960.

LI T J,LI G Q,XU D B,*et al.* The clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. ssp. *sinensis* in response to irrigation intensity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(24): 6952-6960. (in Chinese)

[17] 李孙玲,李甜江,李根前,等.毛乌素沙地中国沙棘存活及生长对灌水和密度的响应[J].西北林学院学报,2011,26(3):107-111.

LI S L,LI T J,LI G Q,*et al.* The growth and survival of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in response to irrigation intensity and initial density in MuUs sand-land[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(3): 107-111. (in Chinese)

[18] 袁思安,刘丹一,高辉,等.土壤水分对中国沙棘人工林结构多样性的影响[J].西部林业科学,2014,43(1):69-74.

[19] 贺斌,赵粉侠,李根前,等.毛乌素沙地中国沙棘克隆生长对土壤水分含量的响应[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(4):46-50.

HE B,ZHAO F X,LI G Q,*et al.* The response of clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* to the availability of soil moisture in MuUs sand-land[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2012, 36(4): 46-50. (in Chinese)

[20] CAO Z L,LI T J,LI G Q. Modular growth and clonal propagation of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* in response to irrigation intensity[J]. *Journal of Forestry Research*, 2016, 27(2): 1-10.

[21] 陈伦寿,毛达如,张承东.关于推荐(配方)施肥中几个技术性问题[J].土壤,1990(4):169-172.

[22] 袁志发,周静萍.试验设计与分析[M].北京:高等教育出版社,2001.

[23] 李根前,黄宝龙,唐德瑞,等.毛乌素沙地中国沙棘无性系种群年龄结构动态与遗传后果研究[J].应用生态学报,2001,12(3):347-350.

[24] 阮成江,李代琼.半干旱黄土丘陵区沙棘林地土壤水分及其对沙棘生长影响研究[J].水土保持通报,1999,19(5):27-30.

RUAN C J,LI D Q. Soil moisture and its influence on seabuckthorn growth in semi-arid loess hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(5): 27-30. (in Chinese)

[25] 李根前,黄宝龙,唐德瑞,等.毛乌素沙地中国沙棘无性系生长调节[J].应用生态学报,2001,12(5):682-686.

LI G Q,HUANG B L,TANG D R,*et al.* Regulation of clonal growth of *Hippophae rhamnoides* L. subsp. *sinensis* population in MuUs sandland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 682-686. (in Chinese)