黄土丘陵半干旱区柠条林生长过程研究

赵 龙[1]，郭忠升[2,3]，郭满才[1]，袁志发[1]，王振凤[1]

（1. 西北农林科技大学 理学院，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100）

摘 要：以经典的 Logistic 方程为基础，添加了一个生长阻力因素，建立了林木生长的改进模型，并采用该模型对宁夏自治区固原市黄土丘陵半干旱区柠条林生长状况进行了拟合。结果表明，成林密度对新模型具有显著影响，改进模型的密度适用值在 51～71 丛/100 m^2。

关键词：黄土丘陵半干旱区；柠条；生长模型

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)06-0192-04 **中图分类号**：S758.5^{+2}，Q242

Growing Process of *Caragana Microphylla* Shrubland in Semi-arid Hilly Region of Loess Plateau

ZHAO Long[1], GUO Zhong-sheng[2,3], GUO Man-cai[1], YUAN Zhi-fa[1], WANG Zhen-feng[1]

(1. *College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: An improved growth model was established by adding a stressing factor to classical Logistic model. The growth data of *Caragana microphylla* shrubland was collected in semi-arid loess hilly region, Guyuan City of Ningxia Hui Autonomous Region, to which the new model was fitted. The result showed that the improved model is highly sensitive to the planting density. The optimal density of caragana in the study area should be limited in the range from 51 to 71 clusters per one hundred square meters.

Keywords: **semi-arid loess hilly region**; ***Caragana microphylla***; **growth model**

柠条(*Caragana microphylla*)是锦鸡儿属的一种，是我国西北、东北、华北地区营造水土保持和防风固沙林的主要灌木树种[1]。柠条林生长状况关系到半干旱地区的植被恢复和生态环境建设。通过建立数学模型来描述植物生长过程是一种常用方法。最普遍使用的是 1838 年由比利时 Verhulst[2-9] 提出的 Logistic 方程，该方程单调增加，可以反映短时间内柠条株高生长的动态变化，但是对多年生柠条林生长过程的模拟研究报道较少。

本研究通过对半干旱区柠条生长过程进行分析，试图建立一个描述多年生柠条林生长的改进模型，为多年生植物生长过程的模拟、植被恢复和生态环境建设提供参考。

1 研究区概况

研究区位于在黄土高原西部的宁夏回族自治区固原市原州区河川乡的中国科学院固原生态试验站。该区地势起伏，沟壑纵横，水土流失严重，地理位置为东经 106°26′—106°30′，北纬 35°59′—36°02′，区内沟沿线以上坡度较缓，沟沿线以下坡度大于 25°。海拔高度约 1 534～1 824 m。年均气温 7.0 ℃，1983—2001 年的平均年降雨量为 415.6 mm，无霜期 152 d，土壤为黄土母质发育的黄绵土。林下草本植物主要有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。

收稿日期：2012-04-20 修回日期：2012-06-16

资助项目：国家自然科学基金项目“黄土丘陵半干旱区人工林草地土壤水资源利用限度”(41071193)；中央高校基本科研业务经费专项资金(QN2010101)

作者简介：赵龙(1986—)，男(汉族)，河北省辛集市人，硕士研究生，研究方向为数量生态学。E-mail：tssyzl123@163.com。

通信作者：郭忠升(1963—)，男(汉族)，陕西省富平县人，博士，研究方向为土壤水分与植物生长、森林生态、森林水文与水土保持等。Email：zhongshenguo@sohu.com。

2　试验设计

柠条成林选在黑刺峁东坡中部，坡度较缓，海拔约 1 650 m，1986 年在黑刺峁建有大面积柠条林，2002 年 4 月对 16 年生柠条成林进行面上调查，选择立地条件相对均一的缓坡地段建立试验样地，并对试验样地柠条成林进行疏伐处理作业，处理后密度定为 87，71，51，31，16 丛/100 m^2。柠条成林 2002 年和 2003 年的生长测定是从 4 月中旬到 10 月，每个密度处理选取具有平均冠幅的样丛 10 个，在每个样丛内选择平均基径、平均高、最大基径、最大高度的 4 个枝条作为样枝，每个小区的样本共 40 株。对样枝和基径观测部位进行标定。每年在生长季节每隔 15 d 测定一次单枝基径、株高。基径用游标卡尺测定，株高用卷尺测定。将观测数据分为两部分，一部分用于建立模型，一部分用于检验。

3　模型建立

Logistic 模型的机理为：生长速率与生长空间（$k-y$）成正比，与当前生长量 y 成反比；相对生长速率仅与 $k-y$ 成正比。经典的 Logistic 模型仅以当前生长量为限制因子，与时间没有关系，称为自治的[2]。多数研究者将 $k-y$ 看作是密度对于生命体生长的线性制约，认为该模型是一个经验模型，并非解释性的模型。欲将 Logistic 模型做适当的改动，使其变为机理性模型[8]。由密度试验知，试验的密度梯度较大，密度越大对生长指标变化的制约就越大，因此将对 Logistic 模型进行改动。

首先，Logistic 模型的微分形式为：

$$\frac{dy}{dt}=by\left(\frac{k-y}{k}\right) \tag{1}$$

$k>0$ 表示一定时期内的生长上限，$b>0$ 表示内禀生长率，积分可求得 y，并得到相对生长速率与时间的关系为：

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt}=\frac{b\exp(a-bt)}{1+\exp(a-bt)} \tag{2}$$

假设密度制约到达一定程度后，对生长产生了抑制作用，导致植物生长随时间小幅度地减小，将 Logistic 模型的相对生长速率的表达式改为：

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt}=\frac{b\exp(a-bt)}{1+\exp(a-bt)}-c \tag{3}$$

其中 $c>0$ 表示生长阻力常数。对公式(3)积分得到：

$$y=\frac{K\exp(-ct)}{1+\exp(a-bt)} \tag{4}$$

式中：K——常数；a——表示与曲线有关的位置参数；$b>0$——内禀生长率；$c>0$——生长阻力因子，这样得到了 Logistic 模型的改进模型。由于改进模型的微分表达式使用的是相对生长速率与时间的关系式，故新模型中 K 与 Logistic 模型的参数 k 不同，新模型中 K 与初值有关，而 Logistic 模型仅参数 k 表示上渐进值，而新模型中 4 参数共同决定了生长顶点。

上黄地区柠条的萌发时间为 4 月中旬，以 2002 年 4 月 15 日作为生长起始时间，并按照以后每隔一天增加 0.1 进行累计。用改进模型(4)对 2002 和 2003 年柠条成林的 5 个密度处理的株高生长进行拟合分析，所用拟合方法为 Levenberg—Marquardt 法[5-7]，所得结果详见表 1—2。

表 1　研究区 2002 年柠条成林拟合值

密度/(10^{-2}丛·m^{-2})	K	a	b	c	R^2
87	126.861 420	−0.874 831	0.178 279	0.008 167	0.968 066
71	108.149 999	−0.658 444	0.387 081	0.002 786	0.967 765
51	115.269 243	−0.794 559	0.278 609	0.001 546	0.970 099
32	182.097 931	−0.057 591	0.113 660	0.019 017	0.970 380
16	156.533 697	−0.155 549	0.147 202	0.013 152	0.973 418

表 2　研究区 2003 年柠条成林拟合值

密度/(10^{-2}丛·m^{-2})	K	a	b	c	R^2
87	277.874 407	2.843 486	0.092 655	0.014 796	0.967 016
71	145.990 897	4.125 223	0.147 921	0.005 129	0.967 511
51	77.745 929	−20.147 422	−0.325 043	−0.007 896	0.975 289
32	90.445 599	−14.888 348	−0.217 724	−0.005 690	0.975 245
16	82.540 119	−42.112 393	−0.729 112	−0.008 722	0.975 876

4 拟合结果分析

在建立半干旱地区柠条林生长模型时，从 Logistic 模型的相对生长速率与时间的关系入手，引入新参数 c，c 表示一种生长阻力。在密度制约很强的情况下，生长动力小于生长阻力，阻碍生长，参数 c 在一定程度上决定着模型的单调区间。

应用改进模型于各个密度处理小区结果表明，2002 年柠条成林 5 个小区内的拟合参数 b，c 的值均与建立模型时对 b，c 所确定的取值范围是一致的。而考察 2003 年柠条成林 5 个小区内所得出拟合参数 b，c 的值中，只有密度为 87 丛/100 m^2 样丛和 71 丛/100 m^2 样丛的参数符合建立模型时对 b，c 所确定的取值范围；而拟合密度为 51，32 和 16 丛/100 m^2 的样丛时发现 $b<0$，$c<0$，与生物学意义不符，这说明密度梯度对改进模型具有显著性影响。

采用检验数据对改进模型的模拟结果进行检验，求得相关系数详见表 3。

表 3 改进模型的模拟值与观测值的相关系数

年份	密度/(10^{-2}丛·m^{-2})				
	87	71	51	32	16
2002 年	0.942 188	0.940 570	0.959 773	0.898 458	0.808 229
2003 年	0.801 042	0.912 029			

从表 3 可以看出，相关系数均在 0.8 以上，相关度较高。但对 2002 和 2003 年柠条成林的生长观测结果发现，在 8 月中旬成林出现了部分落叶的现象，具体表现为 8 月 15 日前后密度为 87 丛/100 m^2 的样丛落叶最为严重，密度为 71 丛/100 m^2 的样丛次之，而密度小于 51 丛/100 m^2 的样丛落叶较轻，有很多枝条未落叶；而且密度为 87 丛/100 m^2 的样丛由于密度较高，生长受到了影响，枝条与叶片的含水率与生长初期相比均下降，导致叶片变色；虽然高密度下的生长落叶严重，但未发现有样株死亡[1]。

在 2002 和 2003 年，高密度小区（密度为 87 和 71 丛/100 m^2 的样丛）地上部分的植株对光照、空间等和地下部分的根系对土壤水分均存在着严重竞争，导致枝条于 8 月中旬开始落叶并很少长出新叶，影响了光合作用，光合速率低于呼吸速率，生长阻力开始起到显著作用，生长指标（株高）随着时间小幅度减小。

而低密度小区（密度小于等于 51 丛/100 m^2 的样丛）在 2002 年地上部分的竞争并不剧烈，但是地下部分的根系对土壤水分存在着竞争，也影响了光合作用的进行，光合强度小于呼吸强度，生长阻力起到了显著作用，生长指标（如株高）也开始变小；但到 2003 年因密度梯度的控制发挥作用，低密度的样丛对地上、地下生存资源的竞争明显减弱，很少落叶或未落叶，光合作用受到的影响有限，光合速率仍然会高于呼吸速率，生长很少受到影响，生长阻力未起到显著作用，改进模型不适用于对低密度柠条成林的生长拟合。

分析结果说明使用改进模型对柠条成林生长进行拟合时，该模型对高密度的植株之间竞争激烈的柠条成林生长过程的模拟是适合的；对于低密度的植株之间竞争较弱的柠条成林生长过程的模拟并不适合，在模拟低密度柠条成林生长时仍使用原 Logistic 模型。所以改进模型存在一个密度的适用值，高于此适用值改进模型可用，低于此值改进模型不可用。从密度试验的结果来看该适用值应处于 51～71 丛/100 m^2 之间，这个范围也处于上黄地区柠条林土壤水分植被承载力（81 丛/100 m^2）之内（图 1）[10-12]。

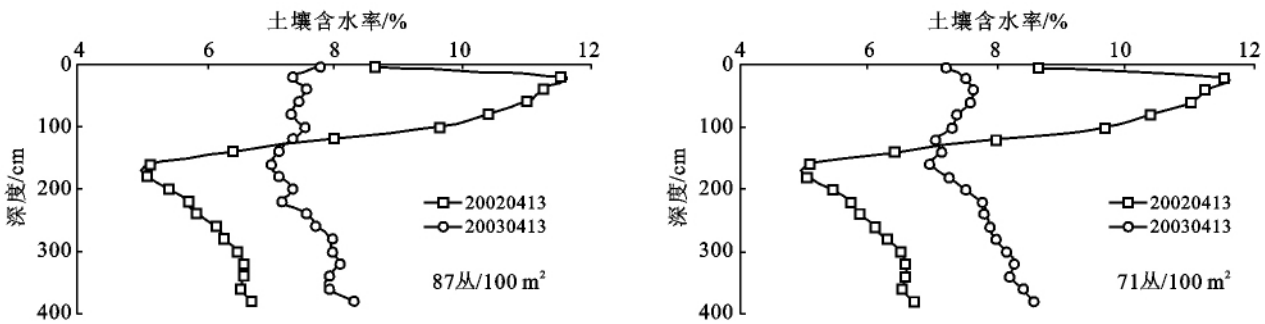


图 1 研究区不同密度处理的柠条林地土壤含水率

以高密度样丛的生长为例，2002 和 2003 年的生长情况差异较大。这是由于试验地处于半干旱区，降水量对柠条生长影响显著。由于 2002 年降雨量小于 2003 年，但 2003 年降水量分布不均衡。这两个生长年中 2002 年 6 月的降水量为全年最大，2003 年 8 月的降水量为全年最大。2002 年 6 月的降水充足，这个时间内柠条全部展叶，降水促进了柠条的生长。而在 2003 年 6 月的降水明显不足，在大量需要水分的

速生期,该地区柠条林未能得到有效降水,柠条生长受到影响。

2003 年虽为丰水年,但是生长初期土壤含水量较低,高密度小区内的样丛在生长初期土壤含水量很低,如图 1 所示,试验地 2003 年生长初期表层土壤含水率小于 2002 年的初期含水率,柠条在萌发时期供水不足,柠条生长受到了影响。直至 8 月降水达到全年最大,该地区柠条林在 8 月时才得到有效降水[9]。因此 2003 年 8 月密度为 87 丛/100 m^2 的样丛持续生长,使得极值点出现的时间较 2002 年滞后。柠条在整个生长年中 8 月的长势小于 6 月的长势,因此从生长方程上看 2002 年的生长量大于 2003 年的生长量。

5　结 论

经典生长方程有 Logistic, Gompertz, Bertalanffy, Mitscherlich, Richard, Weibull 等模型[3-4]。建立方程时均以严格的单调增加为基础,新模型与以上几个生长方程的主要区别在于密度制约机制的不同。研究人员在对 Logistic 模型进行各种变形时也主要在密度制约因子上增加参数,使得新模型可以包含 Logistic 模型或者其他模型,但在总体上密度制约因子的作用小于生长因子的作用,但积分后模型函数在生长期间的单调性保持不变。本研究从相对生长速率的角度,对 Logistic 模型进行变形,将相对生长速率随时间变化的关系式上减去一个常数,令相对生长速率出现负值。这是由于造林时的初植密度过大,柠条在生长期间形成了严重的竞争。随着密度的减小,相对生长速率出现负值的可能性逐渐消失。通过密度试验估计了改进模型的密度适用值在 51～71 丛/100 m^2。本研究将生长阻力考虑到模型内,假定生长过程中阻力的作用是一个常数,令相对生长速率出现负值,并积分得到了新的生长模型,受降雨量、温度和初期土壤水分的影响 2002 年的总生长量明显高于 2003 年的总生长量。改进模型也可用来描述柠条幼林的生长过程,如幼林中生长拐点、极值坐标和速生区间的界定等。该模型能较好地拟合半干旱地区柠条的生长过程;但是否适合于柠条生活史或半干旱地区其他多年生植物的生长过程,有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水分植被承载力研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2004.

[2] 卢恩双,郭满才,宋世德,等. 一类非自治的 Logistic 生长曲线及其应用[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2002,30(4):127-129.

[3] 邢黎峰,孙明高,王元军. 生物生长的 Richard 模型[J]. 生物数学学报,1998,13(3):348-353.

[4] 段爱国,张建国,童书振. 6 种生长方程在杉木人工林林分直径结构上的应用[J]. 林业科学研究,2003,169(4):423-429.

[5] 周静芋,宋世德,袁志发,等. 用麦夸法进行室分析曲线拟合[J]. 西北农业大学学报,1996,24(1):75-78.

[6] 王莽莽,李典谟. 用麦夸方法最优拟合逻辑斯蒂曲线[J]. 生态学报,1986,6(2):142-147.

[7] 袁志发,周静芋. 多元统计分析[M]. 北京:科学出版社,2003:142-147.

[8] 余爱华. Logistic 模型的研究[M]. 江苏 南京:南京林业大学,2003.

[9] 李秧秧,石辉,张安邦,等. 黄土丘陵区几种林木茎干径向生长的日变化及其对环境因素的响应[J]. 水土保持学报,2007,21(6):170-173.

[10] 郭忠升,邵明安. 土壤水分植被承载力研究成果在实践中的应用[J]. 自然资源学报,2009,24(12):2187-2193.

[11] 郭忠升,邵明安. 土壤水分植被承载力数学模型的初步研究[J]. 水利学报,2004(10):95-99.

[12] 郭忠升. 半干旱区柠条林利用土壤水分深度和耗水量[J]. 水土保持通报,2009,29(5):69-72.