

# 黄土高原半干旱区水土保持植被恢复限度 ——以人工柠条林为例

郭忠升

(西北农林科技大学 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 71210, 陕西杨凌)

**摘要** 为了确定水资源不足地区植被恢复潜力和水土保持林建设目标,在黄土丘陵半干旱区宁夏固原上黄试区,对相同立地条件的16年生人工柠条林进行疏伐,建立不同密度林地,进行林分密度、森林植被水土保持效益和土壤水分关系的定位实验。结果表明:平均基径随密度的增加而减少,二者为线性关系;盖度随密度的增加而增大,盖度与密度为对数关系;林冠截留随密度的增加而增大,二者为指数关系;地表径流随密度的增加而减少,二者为对数关系;泥沙含量随密度的减少而增加,二者关系可用倒S形曲线描述。虽然密度增加,盖度增加,森林植被水土保持效益增强,但是受土壤水资源的限制,柠条林有一个最大恢复限度。当超过限度时,势必会引发或加剧土壤旱化。

**关键词** 柠条林;林分密度;盖度;林冠截留;地表径流;土壤水分;泥沙含量;植被恢复限度

## Limit of vegetation rehabilitation for soil and water conservation in semi-arid region of Loess Plateau :

A case study of artificial *Caragana korshinskii* Kom stand

Guo Zhongsheng

(Northwestern A & F University, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China)

**Abstract** In order to determine the potential for vegetation rehabilitation and set the goal of soil and water conservation forest in water-shortage region of Loess Plateau, 16-year-old artificial *Caragana korshinskii* Kom stand grown in a reasonably uniform site was selected and thinned to establish different densities of experimental plots, and the experiments of the relationships between density of a stand, forest benefit to conserve soil and water and soil water was conducted in the *Caragana korshinskii* Kom stand in Shanghuang Eco-experimental Station of the semi-arid region, Guyuan County, Ningxia Hui Autonomous Region of China. The results showed that the mean basal diameter of *Caragana korshinskii* Kom stand decreases with increasing density and there is a linear relationship between basal diameter and stand density, the stand coverage increases with increasing density and there is a logarithm relationship between coverage and density; the canopy interception increases with density and both of them is a power relationship; the surface runoff decreases with increasing density and the relationship between them is a logarithm functional relationship, the sediment charge in the runoff increases with reducing density and the relationship between them can be expressed by an "inverse-S shape" curve. Although the canopy closure increase with increasing density, and the effect of *Caragana korshinskii* Kom stand on soil and water conservation strengthens, but there is a limit in

收稿日期: 2008-10-31 修回日期: 2009-04-06

项目名称: 国家科技支撑计划“宽谷丘陵区农牧综合开发模式与示范”(2006BAD09B08);国家自然科学基金重点项目“干旱半干旱地区森林与水资源相互影响及合理调控机理”(30230290);国家重点基础研究发展规划项目“退化生态系统重建模型与模式”(C2000018605);中国科学院水土保持研究所知识创新领域前沿项目(SW05111)

作者简介: 郭忠升(1963—),男,博士。主要研究方向:森林生态、森林水文与水土保持等。E-mail: zhongshenguo@sohu.com

the course of vegetation rehabilitation because of the limit of soil water resources. When the cover degree is more than the limit, soil drying appears or was aggravated in the *Caragana korshinskii* Kom stand.

**Key words** *Caragana korshinskii* Kom stand; stand density; coverage; canopy interception; surface runoff; sediment charge; soil water; the limit of vegetation rehabilitation

在干旱半干旱地区限制森林植被恢复的关键性因素是水。在这些地区进行森林植被恢复时,要充分考虑森林植被的耗水量与可供给水量的平衡问题。在黄土高原地区,随着人口增加、土地开垦、森林过分采伐和草场过牧,战争等人为活动频繁,引起植物种群密度的下降<sup>[1]</sup>,原生植被丧失,森林面积锐减,森林植被维持生态平衡能力下降,从而引发严重的水土流失等生态问题。为了改善生态环境,促进区域经济健康发展,1950年以来,在黄土高原开展了大面积植树种草工作,取得了较大成绩;但是,在植被恢复过程中,人们追求高生产力和高效益,大量选用深根性、速生树种,过分开发利用深层土壤储水,而土壤水分补给程度有限,结果在植被建设中不仅出现了造林成活率低,保存率低,生产力低和生态经济效益低的问题<sup>[2-6]</sup>,而且在多年生人工林草地出现了土壤旱化,实为超载的土壤退化现象,并形成土壤干层<sup>[4-9]</sup>。土壤退化威胁到植物群落的稳定性和生态效益的持续稳定发挥。

自然资源承载森林植被的能力是有限的,因此森林植被恢复应该有一个限度。超过这个限度,就会引发或加强土壤旱化和土壤退化,最终可能出现严重生态问题。近年来,有关不同密度柠条林水土保持效益和水土保持植被最大恢复限的研究报道较少,因此,笔者研究人工柠条林盖度和水土保持效益随密度变化,探讨人工柠条林最大恢复限,为水土保持植被恢复和可持续经营提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于黄土高原西部、宁夏南部黄土丘陵区的固原市原州区河川乡上黄村的中国科学院水利部水土保持研究所上黄试区,地理位置为 E 106° 30', N 36° 02'。区内地形起伏,沟壑纵横,水土流失严重,属黄土丘陵半干旱区,坡度为 10°~25°,海拔 1 534~1 824 m。年总辐射 5 342 MJ/m<sup>2</sup>,年均气温 7.0℃。1983—2001 年,最大降雨量 634.7 mm(1984 年),最小降雨量 259.9 mm(1991 年),平均 415.6 mm,降水年际变率 23.48%。年内降水的季节分配不均,6—9 月降水量占全年降水量的 64.7%。无霜期 152 d,土壤为黄土母质发育的淡黑垆土、黄绵土。

经过多年的耕种和雨水冲刷,淡黑垆土已被冲刷殆尽,目前剩下的是水土保持能力较差的黄绵土。地带性植被为森林草原向干草原过渡的灌丛草原类型。

柠条(*Caragana korshinskii* Kom)是黄土高原半干旱地区的主要造林树种。实验柠条林平均冠幅长 102.9 cm,宽 87.2 cm,平均高 103.3 cm,平均地径 11.2 mm,分枝数 34 个/丛,平均鲜质量 1.0 kg/丛。林下草本植物有长芒草(*Stipa bungeana* Trin)、阿尔太狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Eilld.) Novpr.)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* (Laxm.) Schindl)等。

## 2 研究方法

对上黄试区柠条林进行全面考察,选定林分生长良好、立地条件比较均一的地段作为实验林,在林内建立 20 m × 5 m 的不同密度标准径流观测场,见表 1。

表 1 不同密度处理径流小区柠条林密度、坡度和投影面积

Tab. 1 Stand density, slope and projected area in the experimental plots under different treatments

项目	密度/(丛 hm <sup>-2</sup> )	坡度/(°)	投影面积/m <sup>2</sup>
原状(对照)	8 700	7.9	99.23
处理 1	7 100	7.8	99.07
处理 2	5 100	8.5	99.11
处理 3	3 200	7.7	99.27
处理 4	1 600	7.0	99.40

### 2.1 根系调查

在实验林地,选 1 个代表样株,挖 1 个 1 m × 1 m,深 5 m 的壕沟,对植物根系分布深度、根量进行分层调查。

### 2.2 生长调查

在每个密度处理小区选具代表性的样丛 10 个,每丛选 4 个样枝。从 4 月中旬开始到 10 月底的生长季,每隔 15 d 测定 1 次。测定时采用游标卡尺定期测量样枝的基径(用红漆标定测定位置),用卷尺测定样枝高,同时测量 2 个相交成直角断面冠长。柠条林盖度为

$$C = 3.14159 abn / S_t$$

式中:  $C$  为盖度;  $a$  和  $b$  分别为椭圆的长半径和短半径,  $m$ ;  $n$  为小区柠条的丛数;  $S_i$  为径流小区的投影面积,  $m^2$ 。在每个处理内选择  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  样方, 重复 9 次, 采用刈割法测定林下杂草的生物量, 并测定含水量。

### 2.3 林冠截留

分别在林内外布设雨量器, 由于柠条林矮小, 枝条纤细, 林内雨量器为自制的与标准雨量器同口径的  $20\text{ cm}$  高的自制微型雨量器, 而干流量较小且难以测量, 所以根据林内降雨(穿透降雨)和林外降雨计算林冠截留, 林冠截留率 = (林外降雨量 - 穿透降雨量) / 林外降雨量  $\times 100\%$ 。

### 2.4 地表径流和泥沙

地表径流和泥沙采用标准径流场进行测定。每次降雨后, 对径流桶内的雨水高度进行测量, 计算地表径流量

$$R_i = \frac{r^2 h - P_2 s_i + 9 R^2 H}{S_i}$$

式中:  $R_i$  为地表径流量,  $mm$ ;  $P_2$  为林外降雨量,  $mm$ ;  $r$  和  $R$  分别为小径流桶 ( $r = 60\text{ cm}$ ) 和大径流桶半径 ( $R = 80\text{ cm}$ ),  $cm$ ;  $h$  和  $H$  分别为小径流桶 ( $h = 50\text{ cm}$ ) 和大径流桶的高度 ( $H = 110\text{ cm}$ ),  $cm$ ;  $s_i$  和  $S_i$  分别为引水槽 ( $5.0\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ ) 和径流场的水平投影面积,  $m^2$ 。

每次降雨后, 观测径流桶水位高度, 然后将径流桶内的雨水搅匀, 重复采  $1\ 000\text{ mL}$  混水样, 静置  $48 \sim 72\text{ h}$  沉淀, 倒出上层清水, 将下部沉淀的泥土取出, 在  $105^\circ\text{C}$  高温下烘  $24\text{ h}$ , 称量, 测定径流中的含沙量, 计算土壤流失量。

### 2.4 土壤水分

中子仪测定土壤含水量是可靠的<sup>[10]</sup>, 且便于连续测定, 故采用中子水分仪重复、连续测量土壤水分容积含水量。在径流场中心地带安置 2 个相距  $1\text{ m}$  的  $4\text{ m}$  长的中子仪铝合金套管。安置前取土样, 采用烘干法称量, 计算土壤水分。采用北京核能仪器公司生产的 CNC503A (DR) 型智能中子水分仪测定剖面土壤水分。测定前对中子仪进行了标定。

土壤水分测定与生长调查同步, 从 4 月中旬开始到 10 月底的生长季, 每隔  $15\text{ d}$  测定 1 次。同时, 根据天气预报, 测定雨前和雨后的土壤水分。测定土壤水分时, 每  $20\text{ cm}$  记录 1 次, 中子计数时间为  $16\text{ s}$ , 测定深度为  $0 \sim 390\text{ cm}$ 。计算土壤储水量的动态变化。采用人工模拟入渗实验和降雨前后土壤剖面水分动态变化确定降雨入渗深度。根据根系分布深

度, 土壤水分入渗深度确定林木主要利用土壤水分深度, 确定土壤水分补给量和消耗量的计算深度, 然后对观测结果进行统计分析。根据根层土壤水分补给和消耗与密度、植物生长的关系, 确定柠条林地土壤水分承载力及其冠层盖度。

## 3 结果与分析

### 3.1 盖度与密度的关系

盖度是衡量植物群落水土保持功能重要指标。由于每丛林冠垂直投影面积近乎椭圆形, 所以, 林冠盖度采用椭圆面积公式计算单个林冠面积、径流小区林冠面积和盖度。根据观测, 不同密度人工柠条林几乎表现出相同的规律性, 即从 4 月中旬左右, 柠条开始萌芽, 4 月中、下旬展叶, 到 6 月底完全展叶, 盖度逐渐增加, 林冠逐渐形成。7—10 月落叶, 林冠基本保持稳定, 此时的盖度称稳定盖度 (stable cover degree,  $C_s$ )。2002 年 4 月开始实验时, 柠条林林龄、立地条件基本一致, 高度相差较小。由于密度不同, 盖度增加的程度不同。平均基径和密度的关系见图 1, 可以看出, 随着密度增加, 平均基径逐渐减少。密度与基径关系密切, 为线形负相关,  $R^2 = 0.958$ , 用公式表示为

$$B_d = 9.5841 - 0.013D$$

式中:  $B_d$  为基径,  $mm$ ;  $D$  为密度, 丛/ $hm^2$ 。

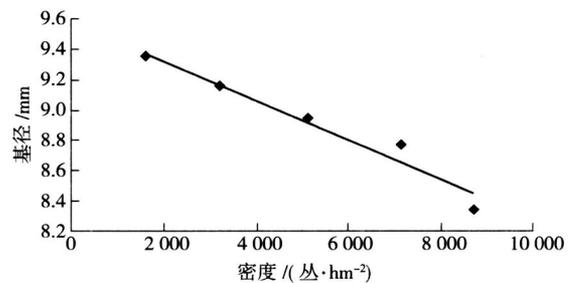


图1 密度与基径的关系

Fig. 1 Relationship between basal diameter and density

盖度与密度的关系见图 2, 可以看出, 随密度的增加, 盖度增加。盖度与密度的关系为对数关系,  $R^2 = 0.8929$ , 用公式表示为

$$C = 0.3051 \ln D - 2.0311$$

由于在相同的自然条件下, 密度较小的冠丛, 基径和冠幅较大, 单丛柠条营养面积较大, 得到的光照、水分和养分较多, 因此小密度林冠发育较快。2002 年密度为  $1\ 600$  丛/ $hm^2$  的柠条林盖度增加了  $8.4\%$ , 而密度为  $8\ 700$  丛/ $hm^2$  小区的林冠面积增加幅度较小, 盖度仅增加了  $4.5\%$ 。随着密度的增加,

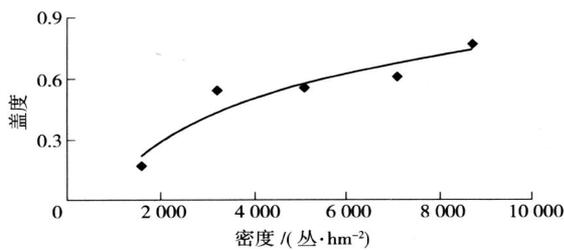


图2 盖度与密度的关系

Fig. 2 Relationship between coverage and density

盖度呈非线性增加。通过分析,7月下旬的稳定盖度与密度为对数关系( $R^2 = 0.8755$ ),用公式表示为

$$C_s = 0.2895 \ln D - 1.8197$$

### 3.2 林冠截留与密度的关系

林冠截留实质上是指雨水被树叶、枝、干表面附和拦截。就一次降水过程而言,降雨量大,林冠截留量大,但他们之间不是直线关系。当降雨量较小时,林冠截留量随降水的增加而增加。由于林冠对雨水的拦截有一个饱和值,当林冠截留量达到此值后,若降水量继续增加,截留量不再增加。在试验区,深秋—冬季—早春期间,植物落叶,处于休眠期,林冠拦截的降雨(雪)量很小,可以忽略不计,因此林冠截留主要发生在5—10月份。2002年高密度(8700丛/hm<sup>2</sup>,下同)柠条林次降雨林冠截留量和林冠截留率较高。通过对每次降水量与林冠截留量的定量分析,林冠截留量呈现出随降水的增加而增加,林冠截留率逐渐降低的趋势,但二者的相关系数较低( $R^2 = 0.3612$ )。在树种组成、立地条件、坡度、坡向和坡位相同的条件下,随着密度的增加,单位面积林冠的枝叶量增加,林冠截留量增加,用公式<sup>[11]</sup>表示为

$$I = 0.0158 D^{0.6601}$$

式中  $I$  为林冠截留量,mm。

### 3.3 地表径流与密度的关系

地表径流(坡地产流)与降雨的入渗过程密切相关。由于降雨时气温低,空气湿度大,水汽压梯度较小,土壤水分蒸发量较小;因此,穿过林冠到达林内的降雨(包括干流),除很少一部分蒸发外,绝大部分不是沿坡面流失,就是渗入土壤。从2002年4月中旬到2003年10月,观测期间虽然发生了多次降雨量较大的降雨,但由于实验地比较平缓,降雨历时长,降雨强度小,人工柠条林密度大,盖度高,能形成地表径流的降雨仅有5次,地表径流量为0.25~1.56mm,地表径流量占降雨量的比值为1.1%(2003-07-23)~6.8%(2002-07-26),地表径流量与林外降

雨量的关系近似于( $R^2 = 0.8345$ )直线关系

$$R_1 = 0.01 P_2 + 0.1765$$

黄土高原地表径流一般为超渗产流,当降雨强度大于入渗速率时形成地表径流。植被的存在增加了地表粗糙度,冠层对降雨的拦截降低了到达地表雨滴动能,活立木的机械栅栏作用增加了地表径流阻力,从而延缓了地表径流的流速,增加了雨水的入渗量。地表径流量与密度的关系见表2,可以看出,随着密度增加,地表径流量减少,这与张建军等<sup>[12]</sup>的结果相同。2002—2003年合计,密度为8700丛/hm<sup>2</sup>的柠条林小区地表径流(4.4mm)仅为密度1600丛/hm<sup>2</sup>小区地表径流量的14.6%。地表径流量和密度关系( $R^2 = 0.9398$ )为对数关系

$$R_1 = 78.454 - 16.899 \ln D$$

表2 地表径流量与密度的关系

Tab. 2 Relationship between surface runoff and density

密度/(丛·hm <sup>-2</sup> )	地表径流量/mm		
	2002年	2003年	合计
8700	1.81	2.58	4.39
7100	1.88	2.16	4.04
5100	4.32	6.55	10.87
3200	6.36	17.12	23.48
1600	6.89	23.23	30.12

### 3.4 泥沙与密度的关系

实验区侵蚀主要为水力侵蚀。植物群落密度变化对地表径流的影响必然会反映到地表径流的泥沙含量上(表3),可以看出,随着密度减少,地表径流中含沙量逐渐增加。根据测定低密度林地地表径流中泥沙含量较高,随着密度增加,径流中的泥沙含量逐渐减少。泥沙含量与密度关系为倒S形曲线,用公式表示为

$$S_c = \frac{6.59}{1 + 1.5906 \times 10^{-13} D^{6.64321}}$$

式中  $S_c$  为泥沙含量,g/L。

表3 不同密度林地地表径流含沙量

Tab. 3 Sediment charge of plots under different density

密度/(丛·hm <sup>-2</sup> )	地表径流含沙量/(g·L <sup>-1</sup> )		
	2003-05-31	2003-07-22	合计
8700	2.05	1.99	4.04
7100	2.17	1.98	4.15
5100	3.30	3.22	6.52
3200	3.30	3.28	6.58
1600	3.32	3.27	6.59

### 3.5 土壤水分与密度的关系

通过以上的分析可以看出,在树种、林龄和立地条件相同的条件下,柠条林密度越大,单位面积生物量增加,林冠盖度加大,林冠截留量增加而地表径流量减小,植被水土保持效益愈显著。近年来在多年生人工林草地出现了土壤旱化现象,说明受自然条件的限制,人工柠条林密度不能过大。密度过大会出现以土壤旱化为主要特征的土壤退化现象。2002年降水量为384.8 mm,略低于多年平均值,属于偏旱年,2003年降水量为623.3 mm,接近多年降雨量的最大值,为丰水年,2004年降水量为322.9 mm,低于多年平均值。每年的柠条林地降水的最大入渗深度不同,他们分别为170 cm(2002年)、210 cm(2003年)、270 cm(2004年)。虽然柠条根系可以深入到5 m以下土层,从剖面土壤水分动态监测结果来看,2002年180~380 cm土层土壤含水量一直维持在8%左右,7月15日到8月15日,全剖面土壤含水率约8%,柠条林因严重干旱胁迫出现叶片变色和提前落叶,而180~380 cm土层土壤含水量变化甚微,说明多年柠条林根系吸收水分和天然降雨的土壤水分补给主要发生在0~400 cm土层。当植物可吸收利用土层土壤水分补给量大于土壤水分消耗量时,土壤储水量增加;反之,剖面土壤水分出现负平衡。从野外定位观测结果分析,1年内土壤水分与植物生长的关系可以分为4个阶段:第1阶段从植物开始萌发到完全展叶进入速生以前,植物生长对土壤水分胁迫反映不敏感;第2阶段从植物完全展叶(6月)到8月的速生期,植物生长对水分特别敏感,如果对这个时期柠条林密度进行调控,对于确保柠条林正常生长具有重要的意义;第3阶段从进入落叶期之前的9月到完全落叶的10月,植物生长对土壤水分胁迫反映不敏感;第4阶段为植物落叶后到萌生前,土壤水分对植物生长影响很小。

一定时期根层土壤水分的补给量与密度的关系取决于每次降雨量及其降雨强度、降雨间隔、降雨前的剖面土壤水分状况、林冠对降雨的拦截量和地表径流损失量。由于天然降雨一般为脉冲式降雨,降雨历时相对较短,降雨过程中空气相对湿度大,植物体和表土层几乎完全湿润,温度又低,降雨过程中蒸发量较小可忽略,则降水对土壤水分补给主要受林冠截留、地表径流和渗漏的影响<sup>[13]</sup>。由于林地降水的最大入渗深度小于测定土层深度,说明研究土层内无深层渗漏发生,那么柠条林地土壤水分补给主要受林冠截留和地表径流的影响。一定时期内根层

土壤水分补给量、消耗量与密度的关系<sup>[11]</sup>分别为:

$$F_1 = -0.0029D + 92.494$$

$$F_2 = 0.000001D^2 - 0.0076D + 64.759$$

式中: $F_1$ 为土壤水分补给量,mm; $F_2$ 为土壤水分消耗量,mm。

联立方程求解,即可获得林地的土壤水分承载力为8115丛/hm<sup>2</sup>。

由于2003年降雨量(623.3 mm)接近1984年的最大降雨量,不仅当年最大实验密度林地剖面土壤水分储量出现盈余,而且在紧随其后的2004年(322.9 mm),最高密度范围内土壤水分出现盈余,说明2003—2004年土壤水分承载力大于或等于8700丛/hm<sup>2</sup>。由于在实验区出现这样降雨年的几率为20年一遇,无代表性,而且2002—2004年柠条林单枝生长差异较小,综合考虑2002—2004年结果,多年生柠条林地土壤水分承载力为8100丛/hm<sup>2</sup>,换算成稳定盖度为 $C_s = 0.2895 \ln 81 - 0.4864 = 0.8$ 。由此可见,土壤水资源承载柠条的能力为8100丛/hm<sup>2</sup>,相应的稳定盖度为0.8,这个盖度就是柠条林恢复的限度。超过这个限度,就会恶化森林生态系统土壤水环境,出现或加剧土壤旱化。

## 4 结论和讨论

通过研究可以发现,随着密度的增加,基径、地表径流及其泥沙含量减小,而林冠盖度、林冠截留量增加。密度与基径为线形关系、与盖度和地表径流为对数关系、与林冠截留量为指数关系,地表径流的含沙量和密度关系可用倒S形曲线进行描述。虽然密度越大、盖度越大,水土保持效益越显著,但是受土壤水资源的限制,人工林或恢复植被应该有一个最大限度,研究区人工柠条林最大恢复限度为盖度0.8。

从水土保持林或植被保持水土效益来看,随着密度增加,林冠盖度越大,林冠拦截和损耗的雨水越多,地表径流及其泥沙含量越小,森林水土保持效益越显著<sup>[14]</sup>;但是,从森林生态系统来看,在相同的降雨(降雨量、降雨历时和降雨强度)条件下,密度越大,人工林林冠拦截和损耗的雨水越多,降雨补给林地的土壤水分越少,与此同时,人工柠条林密度越大,植物蒸腾和土壤蒸发消耗的水分增多,林地出现土壤旱化,引发土壤退化和植被退化问题。这不利于森林生态系统的健康和稳定,而森林生态系统的健康和稳定是维系森林生态系统持续稳定发挥生态效益的基础;因此,从一个较长时期来看,在森林植

被恢复过程中,土壤水分的恢复与消耗之间存在一个水量平衡点,这个平衡点时的林分密度即为土壤水分植被承载力。平衡点时的森林植被(结构)状况即为水土保持植被恢复的最大限度。这个最大恢复限度应该成为制订水土保持林建设目标的依据。如果植被恢复超过这个限度,虽然侥幸暂时会获得较大生产力和水土保持效益,但是,它是以牺牲环境,形成土壤旱化和土壤退化,潜在引发荒漠化为代价的,这不符合可持续发展要求,因而不会长久的。由于该方面研究报道较少,鉴于植被恢复潜力研究在森林植被恢复和水土保持植被建设中的重要性,应加强最大恢复限的研究,为森林植被的恢复和利用提供依据。

## 5 参考文献

- [1] Metcalfe D B, Kunin W E. The effects of plant density upon pollination success, reproductive effort and fruit parasitism in *Cistus Ladanifer* L. (Cistaceae). *Plant Ecology*, 2006, 185: 41-47
- [2] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 106-113
- [3] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000: 30-114
- [4] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 427-432
- [5] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78-84
- [6] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩士峰. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999(5): 48-52
- [7] 李代琼, 从心海, 梁一民. 黄土高原半干旱区沙棘林净初级生产量与耗水量研究. *水土保持通报*, 1990, 10(6): 91-97
- [8] 王力, 邵明安, 侯庆春. 延安试区土壤干层现状分析. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 35-37
- [9] 陈宏松, 邵明安, 王克林. 黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征. *生态学报*, 2005, 25(10): 2491-2498
- [10] 周凌云, 陈志雄, 李卫民. TDR 法测定土壤含水量的标定研究. *土壤学报*, 2003, 40(1): 59-64
- [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. *水利学报*, 2004(10): 95-99
- [12] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究. *北京林业大学学报*, 2002, 24(3): 50-53
- [13] 郭忠升, 邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 522-528
- [14] 刘斌, 罗全华, 常文哲, 等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6): 68-73
- (责任编辑:程云)
- (上接第 48 页)
- [18] Sobrado M A, Turner N C. Comparison of the water relations characteristics of *Helianthus annuus* and *Helianthus petiolaris* when subjected to water deficits. *Oecologia*, 1983, 58: 309
- [19] 李洪建, 王孟本, 柴宝峰. 土壤极端干旱期树种的水分关系研究. *山西大学学报: 自然科学版*, 2001, 24(4): 352-356
- [20] 杨吉华, 张永涛, 王贵霞, 等. 栎树、黄连木、黄栌水分生理生态特性的研究. *水土保持学报*, 2002, 16(4): 152-154
- [21] 王百田, 郭江红. 半干旱黄土地区幼龄侧柏叶蒸腾的数学模型. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 15-20
- [22] 王百田, 张府娥. 黄土高原主要造林树种苗木蒸腾耗水特性. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2003, 27(6): 93-97
- (责任编辑:程云)