

植物生长与土壤水关系调控起始期

郭忠升^{1,2,*}, 李耀林^{1,2}

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

摘要: 确定植物生长与土壤水关系调控起始期是可持续利用土壤水资源的基础。以柠条为研究对象, 采用中子仪对黄土丘陵半干旱区撂荒地, 1~5 年生柠条林生长和土壤水分进行长期定位观测和分析。结果表明: 1a 内, 随着时间推移, 柠条利用土壤水分深度从播种时的表层土壤增加到 220cm; 随着林龄增加, 除丰水年 2 年生柠条林地土壤储水量增加外, 柠条利用土壤水分深度和耗水量增加, 林地土壤储水量下降。在 2004 年生长末期, 3 年生柠条林地 100cm 土层的土壤含水量低于萎蔫系数, 4 年生柠条林地土壤旱化加剧, 柠条生长与土壤水关系调控起始期是第 5 年。此时需要调控柠条生长与土壤水关系, 采取措施降低柠条水分耗水量, 实现土壤水资源可持续利用。

关键词: 黄土丘陵半干旱区; 柠条生长; 土壤水资源利用; 土壤干层; 调控; 起始期

文章编号: 1000-0933(2009)10-5721-09 中图分类号: Q142, Q948, S152.7 文献标识码: A

Initiation stage to regulate the caragana growth and soil water in the semiarid area of Loess Hilly Region, China

GUO Zhong-Sheng^{1,2,*}, LI Yao-Lin^{1,2}

1 Institute of Soil and Water Conservation, Northwestern A & F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Ministry of water resources, China, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5721 ~ 5729.

Abstract: Determining initiation stage to regulate the plant growth and soil water is the base of sustainable use of soil water resources. In this paper, the dynamics of soil water were continuously measured with a neutron probe in fixed positions in the wasteland and newly sowing Caragana forest land during the period from 2002 to 2006 and the data measured was analysed. The results shows that the depth plant use soil water increases from the surface soil on 24th June to 220cm in the first year, and that the depth plant absorb and use soil water and soil water consumption increases, and the amount of soil water storage reduced with increasing age apart from the wet year in 2003 in which the amount of soil water storage increased by 122.8 mm at the 2-year-old Caragana forest land. It is also discovered that the soil water content at the soil layer of 100 cm is smaller than the wilting coefficient in the 3-year-old Caragana land and dried layer of soil become more and more serious in 4-year-old Caragana land and the initiation stage of regulating the relationship between Caragana growth and soil water is 5 years. Effective measures should be taken to control plant density and growth in order to realize sustainable use of soil water resources.

Key Words: Semiarid Region of Loess Hilly Area; caragana growth; use of soil water resources; dried layer of soil; regulation; initiation stage

干旱是一个重要的限制植物生产力^[1]、生态系统生产力的因素^[2]。在干旱和半干旱地区, 自地表下渗的

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD09B08); 国家自然科学基金重点资助项目(30230290); 中国科学院水土保持研究所领域前沿资助项目(SW05111)

收稿日期: 2009-04-13; 修订日期: 2009-08-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhongshengguo@sohu.com

降水蓄存在包气带中,成为土壤水的主要来源。水分是影响生态系统功能和过程的最关键的驱动因子。水对植物生长过程的胁迫程度决定着植物群落的多样性、群落稳定性和生态系统生产力。近年来,在黄土高原大部分地区植被恢复过程中,由于人工林草强烈地蒸腾和吸水,而林草地土壤水分补给和存储量有限,导致植物生长与土壤水分关系(简称植物水关系)失调,结果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,并出现土壤干层。土壤干层隔断了地下水补给路径^[3]。如果不及时对失调的植物水关系进行人为干预和调控,土壤旱化和土壤退化就会随时间的推移进一步加剧,土壤干层加厚,最终会恶化森林植被系统的功能和健康,导致森林植被系统的毁灭,形成土地荒漠化。

为了森林植被系统的稳定和健康,就必须对失调的植物水关系进行调控。理论上,调控植物水关系方法有两种:一种是以需定水,即按照植物需水量,通过灌溉补水满足其生长需要。另一种是以水定需,即依据土壤水分状况,减少植物的枝叶量和密度,拟制植物生长,减少蒸腾耗水。由于黄土高原大部分地区土层深厚、地下水埋藏较深,水资源缺乏,无灌溉条件,林地土壤水分主要依靠天然降雨补给,植物水关系调控只能依据土壤水分补给、土壤水资源状况和土壤水资源承载植被能力,即土壤水分植被承载力决定。土壤水分植被承载力为整株植物水平调控植物水关系的理论依据。目前,根系利用层植物水关系又成为生态需水研究的一个核心问题。研究植物水关系,确定土壤水分植被承载力对于可持续利用土壤水资源、森林植被资源,防治土壤退化均具有重要意义。

生物对环境的要求,如植物对根际土壤水分的要求,有一个最佳含水量范围。在最佳范围附近,生物完成繁殖。偏离最佳环境范围越大,环境对生物的胁迫越严重^[4]。土壤水资源只有通过植物根系吸收利用,才能产生果实、林副产品和经济价值。土壤水消耗后,腾出的土壤水库库容才可以蓄存新一轮的降雨,因此土壤水资源必须利用。但又不能无节制的利用,否则会出现土壤退化,且永远无法恢复。植物叶扩展和蒸腾对土壤水分亏缺的响应有一个阈值^[5]。柠条是半干旱地区生长的优良植物,虽然它能在较宽的土壤水分含量范围内生长,表现良好,抗旱性强。但是,当剖面某一层土壤含水量低于萎蔫系数时,会影响根系吸水;当低于萎蔫系数的土层增加到一定程度时,根系吸水非常困难,土壤水分会严重影响植物生长,例如柠条在7~8月份出现提前落叶现象^[6]。如果干旱年份出现土壤干层的深度,在丰水年土壤水分恢复范围内,就不会出现永久的土壤干层,也不会隔断地下水补给路径。因此植物利用土壤水分应该有一个上限值。据此可将土壤干层累计深度小于或等于土壤水分补给深度作为植物利用土壤水分的“警戒线”。造林后,土壤干层深度达到警戒线时的时间就是植物水关系调控起始期。此时就需要采取有效措施,调控植物水关系。

土壤水资源承载植被的能力即为土壤水分植被承载力。研究植物水关系调控起始期属土壤水分植被承载力理论研究的重要问题之一。近年来有关土壤水分植被承载力概念、定义、确定方法及其在生产中的应用等方面的研究报道逐渐增多^[5~11],而植物水关系调控起始期研究未见报道。本文试图以黄土丘陵半干旱区典型植物群落柠条林为对象,通过对撂荒地和柠条幼林地土壤水分进行多年定位观测和分析,深入研究植物生长与土壤水分关系,确定植物水关系调控的起始期,为完善和量化土壤水分植被承载力、可持续利用土壤水资源提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

实验地位于黄土丘陵半干旱区的上黄生态试验站(宁夏固原),该站位于北纬35°59′~36°02′,东经106°26′~106°30′。区内沟沿线以下坡度大于25°,海拔高度约1 534~1 824 m。降水的年内分配不均,1~3月份降雨稀少,降水主要集中于6~9月份,雨季降雨量占年降雨的70%以上。降水的年际变化较大,年降水量变化在634.7(1984)~259.9 mm(1991),平均为414.9 mm,降水年变率为24.6%,无霜期152 d,土壤为黄绵土,植被类型为森林草原向典型草原的过渡类型。实验地位于黑刺岭东坡中部,坡度为0~15 d(海拔约1 650 m)。实验区为多年撂荒地,主要植物种类有长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔太狗娃花(*Heteropappus attaicus*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等。

1.2 观测项目与测定方法

1.2.1 气象资料

降雨量等气象资料来源于实验地附近的上黄生态试验站气象站。

1.2.2 土壤水分特征曲线

试验地为一个东偏南的缓坡地带,坡度约 8° 。在试验地附近土壤质地均一的地段,挖一4m深的土壤剖面,在剖面中部(180cm和200cm处)用环刀取原状土,在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室采用离心机法测定土壤水分特征曲线。

1.2.3 根系分布深度

在7~8月的雨季,在试验地附近,沿山坡挖一个1m×2m×4m壕沟,表层为0~20cm,20~50cm,50~400cm土层,每50cm一层,分层取样,称量鲜(干)根量,测定根系分布状况。

1.2.4 土壤水分测定

在撂荒地沿山坡选择立地条件比较均一的地段,建立20m(长)×5m(宽)的标准径流观测场。在径流场中心地带安置两个相距1m的4m长的中子仪铝合金套管,铝合金套管外露10cm,用橡皮盖封口。安置前取土样,测定土壤水分,然后再用中子仪测定土壤水分,对两种测定结果进行对比、分析和校对。由于中子仪测定土壤水分精度高^[12],便于连续定位观测,所以采用CNC503A(DR)型智能中子水分仪定期测定剖面土壤水分。测定前对中子仪进行了标定,标定方程为: $y = 55.76x + 1.89$,式中 y 为容积含水量, x 为中子仪读数。对表层土壤水分用烘干土法进行订正。测定时,每20cm记录1次,中子计数时间为16s,测定深度为0~390cm。对土壤水分进行定期和不定期测量。野外定位观测从2002年起到2006年结束。每年从柠条开始萌发的4月中旬开始(第一年为播种时),到落叶(10~11月份),每隔15d测定1次,定期测定剖面土壤水分。另外,非定期的进行降雨前和降雨后土壤水分观测。

1.2.5 柠条林调查

柠条(*Caragana korshinskii*)为当地的乡土树种和主要造林树种。2002年6月24日在标准径流场进行翻土、平整土地和撒播柠条,建立每个小区播量为2.0、1.5、1.0、0.5kg和对照(撂荒地)实验小区,小区播量及密度见表1。撂荒地植被稀疏,植物平均高34cm,主要植物种类有长芒草、阿尔太狗娃花、菱蒿、百里香,生物量75g/m²,地表生物结皮严重。9月中旬采用样线法调查不同播量柠条幼林密度。调查时在每个小区中部沿小区长(20m)每隔1m布设一个样方,每个小区调查9个样方,样方面积为1m×1m。并设立固定样方,在实验小区上半部和下半部各选20株柠条,用于生长状况和保存率调查。

表1 柠条林播种量与密度
Table 1 The amount of seed and density

项目 Item	处理 Treatment 1	处理 Treatment 2	处理 Treatment 3	处理 Treatment 4	撂荒地 Abandoned land
播量 Seed amount(kg/100m ²)	2.0	1.5	1.0	0.5	0
密度 Density(株/100m ²)	6700	6500	5100	2500	0

2 结果与讨论

2.1 土壤水分特征曲线

实验地土壤剖面结构比较均匀。土壤容积含水量(%)与水吸力关系可用经验公式 $Y = aX^b$ 进行描述。水吸力(Ψ ,10⁵Pa)与土壤容积含水量(θ ,%)的关系为($R^2 = 0.8382$):

$$\Psi = 2 \times 10^{-6} \theta^{-5.3559}$$

从图1可以看出,在低吸力范围($\Psi < 2 \times 10^5$ Pa),实测值与拟合值相差较大。在高吸力范围($\Psi \geq 2 \times 10^5$ Pa),随着基质吸力增加,土壤水分的测定值与拟合值非常接近。据此预测,当基质吸力为 15×10^5 Pa时,菱蒿系数约为8.6%。

2.2 撂荒地土壤水分

2002 年降雨量为 384.8mm, 低于多年平均值, 属于偏早年。播种时, 全剖面土壤水分平均值为 12.9%。0~390cm 土层的土壤储水量为 503.9mm。生产实践中一般采用雨季播种以提高柠条发芽率和成活率, 当然也不能太晚。如果播种期太晚, 柠条生长发育期短, 枝条和芽质量较差, 会影响幼苗越冬。2002 年 6 月上旬和下旬分别出现了 46.4mm (8 日) 和 49.5mm (22 日) 的大降雨 (图 2), 土壤墒情较好, 24 日翻地平整并播种。此后, 受降雨的影响, 撂荒地剖面土壤储水量经过短暂的提升后, 由于地被物稀疏, 在高温和大风的作用下, 撂荒地土壤蒸发剧烈, 同时受生物结皮的影响, 地表径流量大而土壤水分入渗量少, 因此土壤储水量一直呈现波浪式下滑。到 2002 年 11 月 29 日, 撂荒地土壤水分储量降到 450.2mm (图 2), 剖面土壤水分平均值为 11.4%。6 月下旬到 11 月下旬土壤水分储量平均值为 478.5mm, 标准差为 81.5mm, 变异系数为 17%。播种前和落叶后撂荒地剖面土壤水分垂直变化见图 3, 可以发现, 从 6 月 24 日到 11 月 29 日, 撂荒地剖面 0~180cm 土层的土壤储水出现下降现象。当然撂荒地土壤储水下降的土层较浅, 一旦降雨来临, 土壤水分很可能得到恢复。

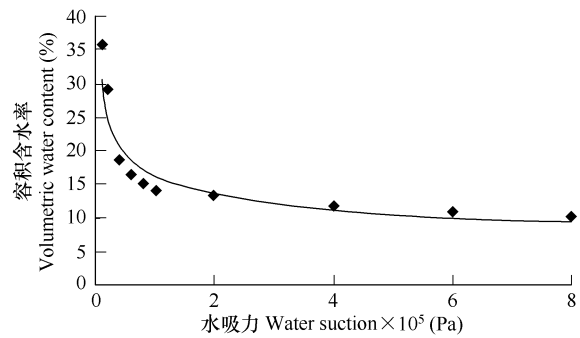


图1 土壤水分特征曲线

Fig.1 Soil water characteristic curve

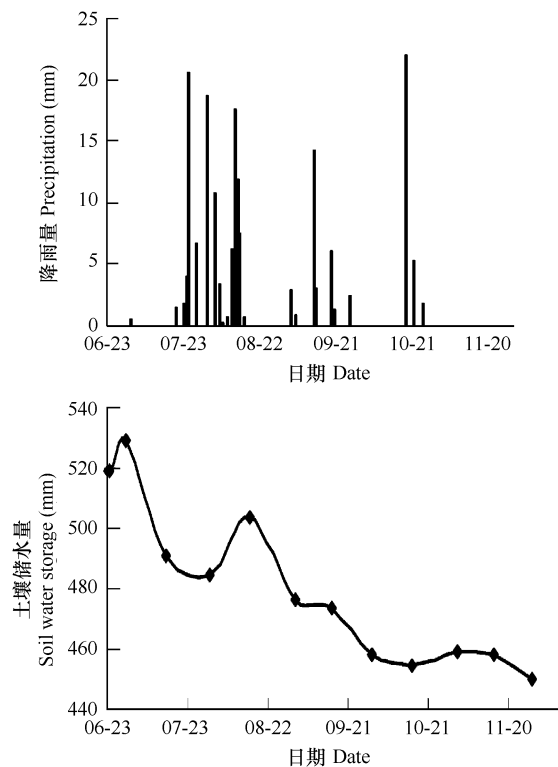


图2 降雨与撂荒地土壤储水量变化(2002)

Fig. 2 The dynamics of precipitation and soil water storage in wasteland (2002)

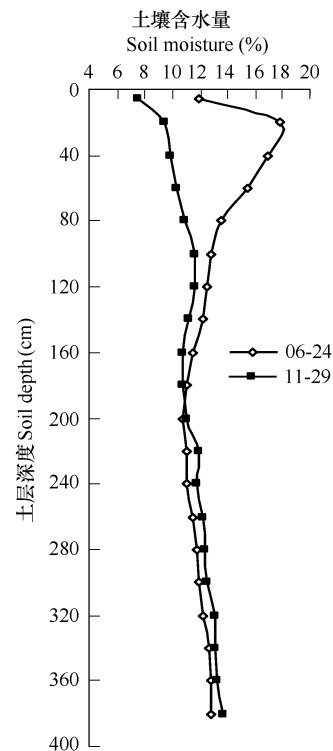


图3 播种和落叶时撂荒地剖面土壤水分

Fig. 3 Soil water content at seeding and leave drop in wasteland

土壤水资源只有通过植物根系吸收才能被利用。土壤水消耗后, 腾出的库容可以蓄存新一轮的降雨。由于撂荒地剖面土壤水分含量全部高于萎蔫系数, 土壤水分含量和储水量也较高, 高于植物利用土壤水分的

“警戒线”。因此不能以播种时撂荒地剖面土壤水分作为植物水关系调控起始期。另外生产中一般不允许植树或种草当年就考虑调控植物水关系,即使当年造林地植物水关系发生失调。

2.3 不同密度柠条林地土壤水分

密度不同,植物生长发育和利用土壤水分程度及其强度不同。生产上一般采用单一种植密度,为了选择代表密度研究植物水关系起始期,对不同初植密度土壤水分状况进行分析。不同播量小区密度不同(表1)。由于实验的第二年(2003年)出现了20年一遇的丰水年,降雨量(623.3mm)接近有记录的最大降雨量,不同播种量小区剖面土壤水分恢复,储水量均增加,无代表性,因此仅能根据1年生不同播种量的柠条幼林地剖面土壤水分状况选择适宜播量和密度。2002年不同密度柠条幼林地剖面土壤水分出现不同程度旱化:高密度(2.0kg)小区从播种到生长季末期剖面土壤储水量由469.5mm下降到397.2mm,下降了72.3mm;1.5kg小区土壤水分下降了51.3mm,对照(撂荒地)下降了53.7mm;低密度的1.0kg小区下降了42.8mm,0.5kg小区下降了22.8mm,密度越小,土壤储水量降低的量越少。为了给幼林的生长发育和成林创造条件,造林时首先应该保证当年林地土壤储水量尽量不出现旱化现象。如果以播种期间撂荒地土壤储水量降低值作为正常的参照值,则只有高密度(2.0处理1)出现土壤旱化,所以柠条林最大播种量为1.5kg/100m²,相应的密度为6500株/100m²。

2.4 植物土壤水分利用深度

当其他条件相同时,密度越大,覆盖地表愈快,植被防止水土流失效果愈显著。为了尽快绿化地表,改善生态环境,柠条林最大播量为1.5kg/100m²。由于植物根系难以接近,历来是研究的难点^[13],但是通过对土壤水分测定资料的分析,随着柠条林的生长,根系吸水量增加,林地剖面土壤水分下降。据此可以根据生长初期和一定时期末期的剖面土壤水分垂直变化曲线来确定柠条土壤水分最大利用深度,这两条曲线的交点处距地表的距离,即为植物利用土壤水分最大深度。一年内柠条林根系利用土壤水分深度随季节变化,如图4所示。从图4可以看出,播种时,剖面土壤水分含量较高。随着柠条的发芽,生长和发育,根系加深,根量逐渐增加,植物利用土壤水分深度逐渐增加。柠条利用土壤水分深度从播种时的地表增加到90cm(9月1日)、110cm(10月15日)、生长季末期柠条利用土壤水分深度达到220cm,由此可见,柠条生命力旺,吸水力较强。为了在有限的时间内充分利用自然资源,定居下来形成群落,柠条当年利用土壤水分深度达到220cm。

2.5 植物利用土壤水分深度和储水量的年变化

降雨量到达林冠时被分为林冠截留量、干流和穿透降雨^[14],柠条幼林个体小,枝条细,不易测定干流量和穿透降雨,计算林冠截留,从而无法计算土壤水分消耗量,但是采用土壤储水量的变化值可相对地反映土壤水分消耗量。随着柠条的生长,植物个体增加、耗水量增加。为了满足植物耗水需要,根系逐渐增加,植物利用土壤水分深度和耗水量也发生变化。由于实验区冬季气温较低,土壤冻结,降雪(雨)很少,1a内根系吸水、植物耗水和土壤水分变化主要发生在生长季,因此可以利用连续两个生长季末期土壤储水量下降值近似反映1a植物耗水量。1年生柠条根系利用土壤水分深度达到220cm(图4),0~390cm土层(下同)土壤储水量由519.2mm下降到467.9mm,降低了51.3mm。2003年为丰水年,虽然2年生生长季末期剖面土壤水分大于生长季初期剖面土壤水分(图5),但是通过对2002年11月到2003年11月土壤水分储量动态变化得知,由于2003年6月15日~30日,植物耗水量较大,虽然有降雨补给,但是林地土壤储水量已达到一年内的最低值,此时柠条根系利用土壤水分深度应该为最大(图6)。从图6可以看出,最上部(20cm)的交点由近日的降雨

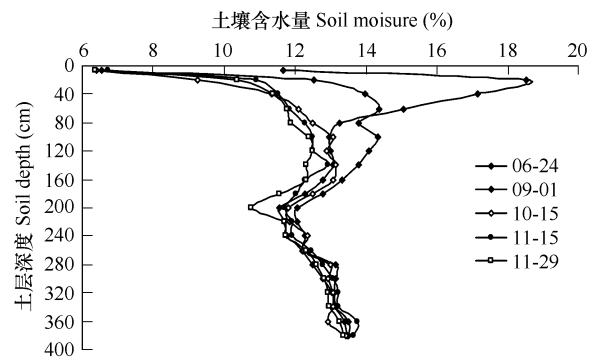


图4 植物利用水分土壤深度演化图(2002年)

Fig. 4 The change of the depth to which plant use soil water in 2002

形成的,不能完全反映根系利用土壤水分深度,而下部的两个交点是由于根系吸水(180cm、中部)和由于根系吸水引发剖面土壤水分上移(320cm、下部)形成的,因此柠条根系利用土壤水分深度应该为 320cm。同时根系调查发现,2 年生柠条根系为 260cm,这说明柠条根系分布深度和根系利用土壤水分的深度不一致,根系利用土壤水分深度大于根系分布深度。受丰水年(2003 年)高频率降雨补给的影响,2 年生生长季柠条地土壤储水量由 462.8mm 增加到 585.5mm,增加了 122.8mm;2004 年剖面土壤初始含水量较高,3 年生柠条利用土壤水分深度仅为 300cm,生长季土壤储水量由 519.2mm 下降到 467.9mm,储水量下降了 99.7mm(图 7);4a 以后,柠条根系利用土壤水分深度超过了 400cm。4 年生柠条林生长季土壤储水量由 410.0mm 下降到 392.1mm,下降了 17.9mm(图 8)。5 年生柠条生长季土壤储水量由 370.9mm 下降到 320.1mm,下降了 41.7mm。

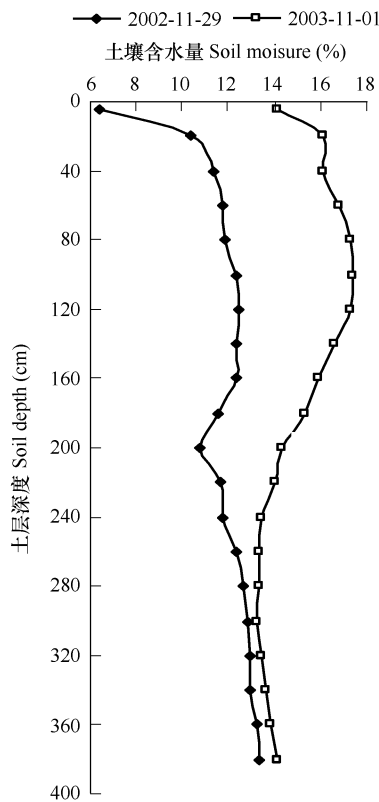


图 5 2 年生柠条利用土壤水分深度

Fig. 5 The using depth of soil water by 2-year-old Caragana

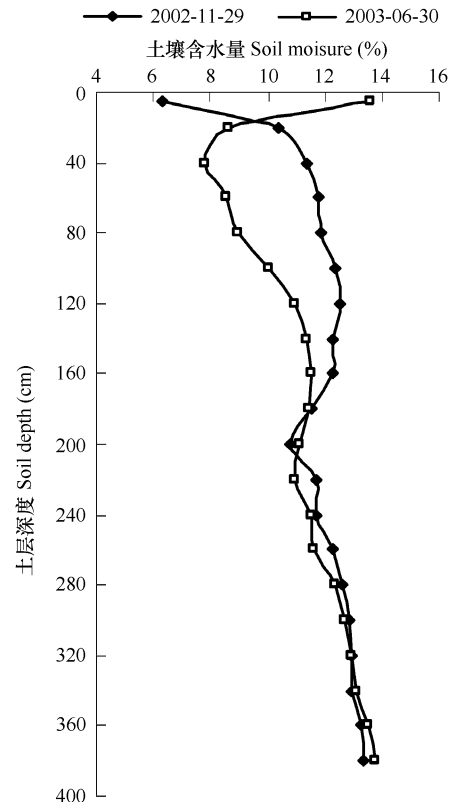


图 6 2 年生柠条利用土壤水分深度

Fig. 6 The using depth of soil water by 2-year-old Caragana

目前土壤干层量化标准尚未统一^[15]。通过对柠条生长表现(图 9)和土壤水分动态变化(图 4 ~ 图 8, 图 10)分析,土壤水资源具有循环再生性,植物利用土壤水分引起土壤库容的下降。在柠条生长过程(图 9)中,随着高度和基径的增加,根系利用土壤水分深度增加,土壤储水量下降(图 10)。当深层土壤水分下降到萎蔫系数(8.6%)及其以下时,柠条吸水困难。如果不能及时得到降雨补充,土壤水分显著地影响柠条生长,使植物生长速度变缓,甚至出现提前落叶现象(图 9)。萎蔫系数不是一个点,而是一个很小的范围^[16],因此可见,柠条林地土壤水分萎蔫系数上界为基质吸力为 15×10^5 Pa 时的土壤含水量(8.6%)。如果以萎蔫系数上界线(8.6%)作为土壤干层的划分标准,那么在 2004 年生长季末(11 月 15 日),3 年生柠条地 100cm 土层土壤含水量低于萎蔫系数,出现土壤干层;4 年生林地土壤旱化严重,土壤干层增厚;5 年生柠条土壤剖面在 60 ~ 300cm 土层出现土壤干层(图 11)。由于 2003 年,17 年生柠条林地降雨的最大入渗深度为 290cm,2 年生幼林地 320cm 土层内的土壤水分得到恢复,那么,柠条利用土壤水分的警戒线应该为土壤干层达到 300cm 左右。

一旦在最大降雨入渗深度以下出现土壤干层,土壤水分将永远无法恢复,因此植物利用土壤水分达到警戒线的时间应作为林水关系调控起始期。5年生柠条林利用土壤水分超过强烈利用土壤水分的警戒线,因此林水关系调控起始期为5年。林龄为5年时需要确定柠条林地土壤水分承载力调控林分密度,或采取有效措施控制柠条生长和耗水,以实现林地土壤水资源可持续利用。

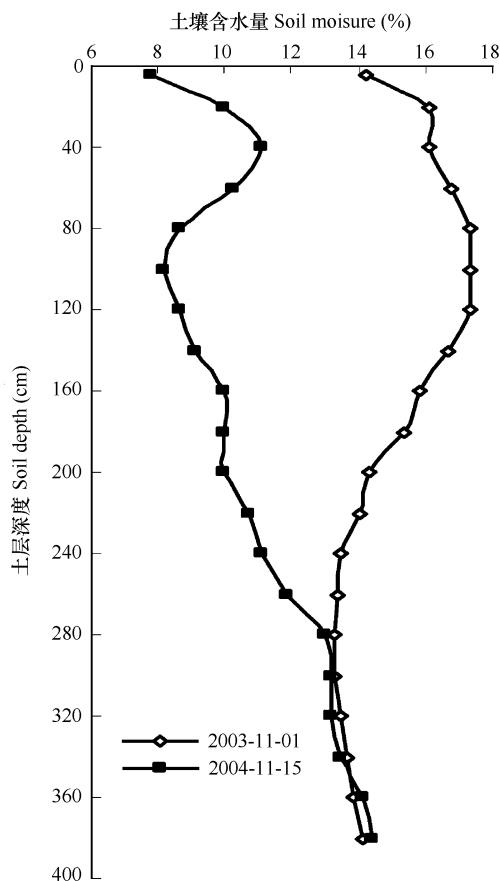


图7 3年生柠条地土壤水分利用深度

Fig. 7 The using depth of soil water by 3-year-old Caragana

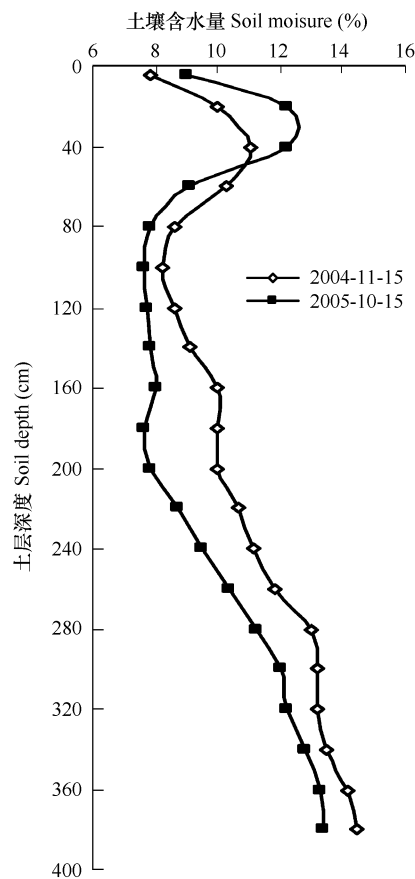


图8 4年生柠条利用土壤水分深度

Fig. 8 The using depth of soil water by 4-year-old Caragana

3 讨论与结论

没有植物就没有土壤水的利用。依靠根系吸水满足自身生长需要,绿色植物才能进行光合作用,生产食物、生物燃料和各种农副产品等,满足人类经济社会发展的需要。由于我国人口较多,不能因为林草地出现土壤旱化而停止利用土壤水资源,而是在利用土壤水资源过程中要注意“度”,对植物水关系进行适度调控,以实现土壤水资源的可持续利用。

林木开始生长时对土壤水分要求较高,因此造林时林地土壤水分含量较高。幼林个体小、耗水量小,随着林龄的增加,植物耗水量和根系利用土壤水分深度增加,土壤水资源存储水平下降,但是当柠条利用土壤水分未达到警戒线时,就没必要对植物水关系进行调控;也不能以土壤旱化严重、出现较厚的且不可逆转的土壤干层时,如2002~2006年测定的出现不可逆转的土壤干层厚度时的16~20年生柠条林作为植物水关系起始

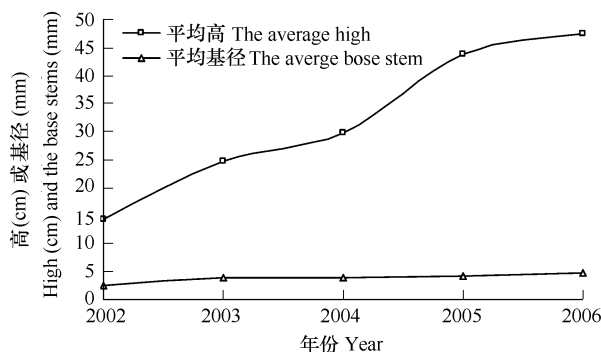


图9 柠条林高和基径生长动态

Fig. 9 The dynamics of height and the base diameter of Caragana with age

分未达到警戒线时,就没必要对植物水关系进行调控;也不能以土壤旱化严重、出现较厚的且不可逆转的土壤干层时,如2002~2006年测定的出现不可逆转的土壤干层厚度时的16~20年生柠条林作为植物水关系起始

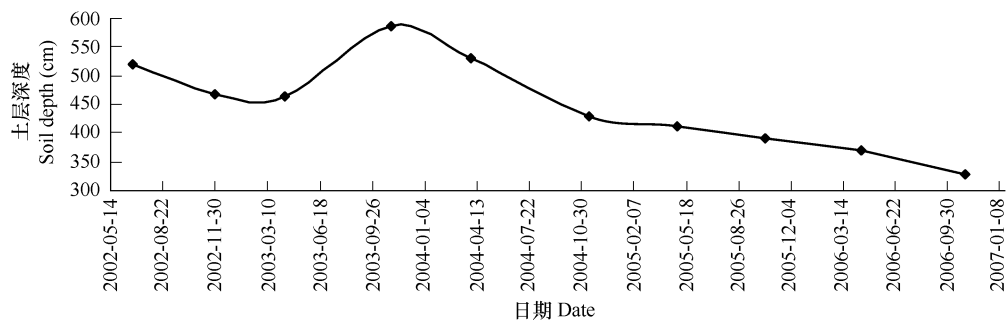


图10 柠条地土壤储水量随林龄变化

Fig. 10 The dynamics of soil water storage with increasing age

期。只有当林地土壤水库的库容降到土壤水分利用的警戒线时,才需要对植物水关系进行调控,这个时间即为植物水关系调控的起始期,对林分而言,是林水关系调控起始期,用林龄表示。

1a 内柠条利用土壤水分深度从播种时的表土层逐渐增加到 220cm;除丰水年,2 年生柠条地土壤储水量增加外,随林龄的增加柠条利用土壤水分深度增加,柠条利用土壤水分深度加深,土壤储水量下降。3 年生林地土壤剖面开始出现土壤土层。4 年生林地剖面土壤旱化严重,土壤干层的厚度增加,5 年生林地剖面土壤干层的厚度达到柠条利用土壤水分的警戒线,此时需要控制柠条林密度和生长,实现林地土壤水资源可持续利用。由于本文是采用可能最大密度为标准研究林水关系调控起始期,如果初植密度较小,林水关系调控起始期可能较长,因此柠条地林水关系调控起始期最小为 5a。

基于该研究结果,文献^[7]的定义可完善为:土壤水分植被承载力是土壤水资源承载特定植被的数量,即土壤水资源承载特定植物种群的数量,属水分制约型土地植被承载力。它是指在较长时期(以年为单位)内,在现有的条件下,当具有一定库容的植物根系吸收利用土层范围内土壤水分消耗量等于土壤水分补给量时,所能维持特定植物种群健康生长的数量,用密度表示,即雨水资源中补给土壤的部分水量所能维持植物健康生长的最大数量。

References:

- [1] Peter M, Neumann. Coping mechanisms for crop plants in drought-prone environments. *Annals of Botany*, 2008, 101(7): 901–907.
- [2] Marie-Béatrice B T, Mikael B, Jenny R, et al. Gradual soil water depletion results in reversible change of gene expression, protein profiles, ecophysiology, and growth performance in *populus euphratica*, a poplar growing in arid regions. *Plant Physiology*, 2007, 143(2): 876–892.
- [3] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau, *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427–432.
- [4] Mackenzic A, Ball A S, Virdee S R. *Instant notes in Ecology*, BIOS Scientific Publishers Limited, U. K., 2001, 14–17.
- [5] Casadebaig P, Philippe D, Jérémie L. Thresholds for leaf expansion and transpiration response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *Europ. J. Agronomy*, 28 (2008) 646–654.
- [6] Guo Z S, Shao M A. Vegetation carrying capacity of soil water in the Loess Plateau, In: *Water-saving agriculture and sustainable use of water and land resources*. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2003. 704–711.
- [7] Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid region s of the Loess

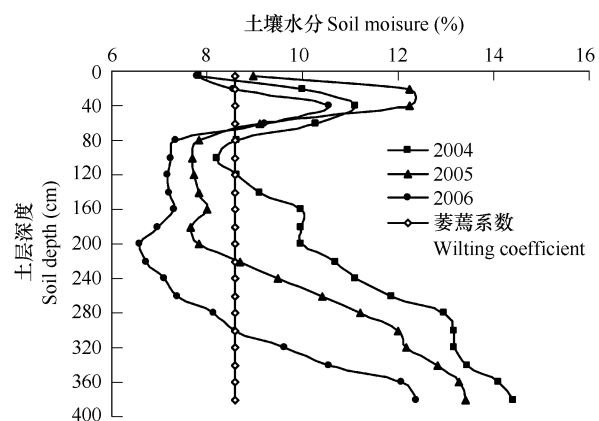


图11 土壤干层及其演化

Fig. 11 dried layer of soil and its change with time

- Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8):1640—1647.
- [8] Tian Y L, He Y H, Guo L S. Soil water carrying capacity of vegetation in the Northeast of UlanBuh Desert. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(9): 13—19.
- [9] Guo Z S, Shao M A. Mathematical model for determining vegetation carrying capacity of soil water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (10): 95—99.
- [10] Xia Y Q, Shao M A. Soil water carrying capacity for vegetation: A hydrologic and biogeochemical process model solution. *Ecological Modelling*, 2008, 214:112—124.
- [11] Guo Z S. Restoration and uses of forest vegetation. *World Forestry Research*, 2008, 21 (Special issue):123—126.
- [12] Wang G Y, Shi X P, Zhang J H, *et al.* A study on the comparison of measuring soil water content with TDR, neutron probe and oven dry. — *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2000, 23(3):23—26.
- [13] Zhang Z S, Li X R, Zhang J G, *et al.* Root growth dynamics of *caragana koshinskii* using minirhizotrons. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (3) 457—464.
- [14] Vernimmen R R E, Bruijnzeel L A, Romdoni A, *et al.* Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*, 2007, 340: 217—232.
- [15] Wang L, Shao M A, Wang Q J, *et al.* Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau. *Transactions of the CSAE*, 2004, (5):27—31.
- [16] Veihmeyer F J. The Availability of soil moisture to plants; results of empirical experiments with fruit trees. *Soil Science*, 1972, 114(4):268—294.

参考文献:

- [3] 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.
- [7] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力. *生态学报*, 2003, 23(8):1640~1647.
- [8] 田有亮, 何炎红, 郭连生. 乌兰布和沙漠东北部土壤水分植被承载力. *林业科学*, 2008, 44(9):13~19.
- [9] 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.
- [11] 郭忠升. 森林植被的恢复与利用. *世界林业研究*, 2008, 21 (特刊):123~126.
- [12] 王贵彦, 史秀棒, 张建恒, 等. TDR 法、中子法、重量法测定土壤含水量的比较研究. *河北农业大学学报*, 2000, 23(3):23~26.
- [13] 张志山, 李新荣, 张景光, 王新平, 赵金龙, 陈应武. 用 Minirhizotrons 观测柠条根系生长动态. *植物生态学报*, 2006, 30 (3) 457~464.
- [15] 王力, 邵明安, 王全九, 贾志宽, 李军. 黄土区土壤干化研究进展. *农业工程学报*, 2004(5):27~31.