

# 水资源紧缺地区土壤水分植被承载力论述

郭忠升<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 在详细论述土壤水资源概念发展和土壤水分植被承载力研究尺度的基础上,介绍土壤水分植被承载力量化模型,包括经典的承载力模型、种群增长通用模型、密度-土壤水分模型和基于物理过程的土壤水分植被承载力模型,述评土壤水分植被承载力研究现状,提出今后应在完善土壤水分植被承载力理论的同时,加强水资源紧缺地区土壤水分与植物生长的野外长期定位研究,从不同时空尺度确定不同植物群落的土壤水分承载力。

**关键词:** 水资源紧缺地区; 土壤水资源; 植物生长; 尺度; 土壤水分植被承载力; 量化模型

中图分类号: S718.44<sup>+</sup>4 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2011)05-0140-05

## A Review of Soil Water Carrying Capacity for Vegetation in Water-Limited Regions

Guo Zhongsheng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwestern A&F University Yangling 712100;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Ministry of Water Resources Yangling 712100)

**Abstract:** In this paper, development of concept of soil water resources and research scale of soil water carrying capacity for vegetation were discussed in detail. We introduced models of quantifying soil water carrying capacity for vegetation, including classic mode of carrying capacity, general model of population growth, density and soil water model and physically based model and soil water carrying capacity for vegetation, and reviewed the present status of study on the soil water carrying capacity. It is suggested that we should further improve the theory system on soil water carrying capacity for vegetation and quantify the value of soil water carrying capacity at different spatial and temporal scales for different plant community in water limited region, and strengthen a long-term location investigation of relationships between plant growth and soil water in the future.

**Key words:** water-limited region; soil water resources; plant growth; scale; soil water carrying capacity for vegetation; quantifying model

我国黄土高原和北方少雨地区水资源缺乏,多年生人工林草植被大量消耗土壤水分,而土壤水资源补给深度和补给量有限,结果在多年生林草地出现了土壤旱化,实为植被超载的土壤退化现象。土壤退化不仅影响陆地水循环过程和水分生产力(Bossio *et al.* 2010),而且威胁森林植被生态系统的稳定性。为了实现林业可持续发展,植被承载力的问题引起了人们的普遍关注,土壤水分植被承载力概念应运而生(郭忠升等 2002)。目前土壤水分植被承载力研究报道逐渐增多(刘建立等 2009;王延平等 2009; Wang *et al.* 2008; Xia *et al.* 2008; 田有亮等 2008;郭忠升等 2004;2003a;2003b),计算评价方法也颇多(Cohen,1995;Price,1999;马焕成等,2001;郭忠升等,2004;田有亮等,2008;王延平等,

2009)。本文论述土壤水资源概念、土壤水分植被承载力量化尺度、量化方法和研究现状,以便提高对土壤水分植被承载力的认识,加速土壤水分植被承载力研究,为水资源紧缺地区土壤水资源的可持续利用,森林植被的可持续经营提供依据。

### 1 土壤水资源

土壤水资源是干旱和半干旱地区限制植物生长的主要因素,是认识和量化土壤水分植被承载力的物质基础。土壤水是指地表面以下至地下水(潜水面)以上土壤非饱和带土层中的水分(雷志栋等,1999)。土壤水的补给、存储及运移有利于植物根系的吸收和利用。土壤水库将休闲期的土壤水分积存起来,供植物生长旺盛期使用,实现了土壤水资

收稿日期: 2010-03-17; 修回日期: 2011-03-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071193),国家自然科学基金重点资助项目(30230290),中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿项目。

源的跨季节调配。

土壤水资源这一概念最早由前苏联地理水文学家李沃维奇提出(朱福星等,1993),他认为:土壤水是一种可恢复的淡水资源,是陆地水循环的重要组成部分,土壤水积极参与水循环,并不断得到补充和消耗,在陆地生物的生命活动过程中起着积极作用。但是,他认为土壤水资源是降水量与地表径流的差值,把降水入渗补给地下水的部分也视为土壤水资源。20世纪80年代,布达果夫斯基从农业的角度概括了土壤水资源的2大特点:1)土壤水资源蓄水量影响地表水与地下水的形成;2)土壤水资源是植物生长和发育的重要因素。

施成熙等(1984)认为:土壤水被调蓄到起后备水源的作用,形成可以向根层补给土壤水分的土壤水库,但还不是浅层潜水的组成部分时,也可按水资源论;刘昌明(2004)详细论述土壤水资源的概念,提出了区域多年平均土壤水评价的计算公式。王浩等(2006)定义土壤水资源为:赋存于土壤包气带中,具有更新能力,并能被人类生产和生活直接和间接利用(包括人类对生态环境的维持)的土壤水量和对维持天然生态环境良性循环具有一定作用的土壤水量,沈荣开(2007)认为这个概念是可以接受的。

随着水资源范畴的扩展,人们对土壤水的认识加深:1)土壤水是地表水、地下水以及大气水相互联系的纽带,具有其他水资源共有的循环再生性和可控性(王浩等,2004);2)土壤水是维系植物正常生长发育、生态环境良性循环的最主要水源泉;3)土壤水存量巨大,据统计世界土壤水储量为165 000亿 $m^3$ ,是世界河流中常年蓄水量的7.8倍(王浩等,2006;易秀等,2007),1956—1979年中国降水量的55%被转化为土壤水(沈振荣等,1998)。

在一个较长时期内,降水进入森林植被生态系统补给土壤水分的过程和土壤水分消耗过程一般是相互影响的,因此土壤水资源是一个动态变化的量,一定时期内其计算公式为:

$$S = \int_{t(1)}^{t(2)} [(P + P_1 + E_2) - (R_g + R_s + I) - (E + E_i)] dt$$

式中: $S$ 为土壤水资源(mm); $t(1)$ 为计算土壤水资源的起始时间; $t(2)$ 为计算土壤水资源的结束时间; $P$ 为降水量(mm); $P_1$ 为地表水下渗量(mm); $E_2$ 为潜水蒸发量(mm),当潜水埋深较大时,可忽略不计; $R_g$ 为深层渗漏通量(mm)(降水对地下水的补给); $R_s$ 为地表径流量(mm); $I$ 为植被冠层截留量

(mm),包括乔木层、灌木层、草本层和枯枝落叶层截留量; $E$ 为表土蒸发量(mm); $E_i$ 为植被蒸腾量(mm)。对于具有侧向壤中流的地貌单元山丘区的土壤蓄水量则是在上式的基础上增加侧向壤中流的净流入量(流入量-流出量)。

为了满足不同专业的需要,土壤水资源应包括广义和狭义定义。广义的土壤水资源是指地面以下至潜水面以上的非饱和带土层中的土壤水分(雷志栋等,1999),用于陆地水循环研究。狭义的土壤水资源是指可被植物吸收利用的土壤水,即地表面以下至植物吸收和利用土层以上土层中的土壤水分,用于农业和林业研究。植物根系吸收利用土层包括根系下扎深度和根系影响深度。对于无灌溉条件、地下水埋藏较深的黄土高原大部分地区而言,多年生植物群落根系分布深度不同于根系吸收和利用土层深度,它随植物生长年龄而变化。如在土层深厚的黄土丘陵半干旱区的人工柠条(*Caragana korshinskii*)林根系分布深度和根系吸收利用土壤水分深度随降水量和植物生长年龄而变化(郭忠升等,2010)。由于黄土丘陵半干旱区人工林草地土壤水分主要依靠天然降水,而该区的降水资源有限,因此,人工林草地降水的补给深度和补给量是有限的(郭忠升等,2009a)。随着森林植被的发育,人工林草地土壤水资源量下降(郭忠升等,2010)。当林草地根系吸收和利用层的土壤水资源下降到一定程度,达到土壤水资源利用限度时(郭忠升,2010a),就需要依据土壤水分植被承载力调控植物与水的关系(郭忠升等,2009c)。

## 2 土壤水分植被承载力研究尺度

尺度的选取对植被承载力或土壤水分植被承载力的量化非常重要。植被是一个国家或地区植物群落的总称。它由不同的植物群落组成。天然状态下,陆地上的植物很少单生,常由不同植物种聚集在一起,形成群落。植物群落中的优势种特别是最上层的优势种建群种)以及人工植被中的主要树种或目的树(草)种的数量变化对植物群落的结构和功能产生巨大影响,常成为植物水关系调控的对象,因此在表示土壤水分植被承载力时,指示植物应选用天然植被的建群种或人工植被中的主要树种或目的树(草)种(郭忠升,2008;郭忠升等,2009b)。量化土壤水分植被承载力的生态学组织层次应该为种群、群落或景观等,空间尺度为地块、坡面、集水区、流域、区域或地区等。

在一日内受天气和土壤水分等因素影响,植物

的光合、蒸腾和呼吸等生理变化表现出日变特性;一年内,植物呈现出萌动、萌发、发芽、展叶、开花、果实膨大和落叶(落叶树种)等生长发育过程,呈现出季节性变化;在不同的年际之间,植物的生长呈现出年际变化。理论上可以从不同时间尺度研究土壤水分植被承载力,但是最基本、最重要的时间尺度应该为年(郭忠升等,2006)。另外,传统森林资源监测的持续期和间隔都显过长,已不适应林业发展和生态建设的需要。为了改变这种状况,从20世纪90年代起,美国、奥地利、芬兰、法国和瑞典等国开始研究和实施森林资源年度监测(Scott *et al.*, 1999)。美国在2005年6月公布了《强化森林资源监测与分析项目——全国抽样设计及估计方法》,表明美国的新监测体系已基本成型(葛宏立等,2007)。我国浙江省也从20世纪90年代后期开始研究年度监测问题(张国江等,2002)。另外承载力单位用年,这与生产力单位中的时间单位一致,便于实践中的应用。

### 3 土壤水分植被承载力定义

为了解决经济社会发展中存在的诸如水资源、水土流失和温室气体排放等问题,需要大面积恢复植被,但又不能因植被恢复而引发土壤旱化和土壤退化,甚至荒漠化。为了实现林业可持续发展战略,植被承载力问题引起了人们的关注。Blake等(1991)报道了生境承载力。郭忠升等(2003a)首次定义了土壤水分植被承载力。土壤水分植被承载力是土壤水资源承载植被的能力,属水分制约型植被承载力,主要存在于干旱和半干旱地区。它是指在较长时期和特定条件下,当植物根系吸收利用土层内的土壤水分消耗量等于土壤水分补给量时,所能维持指示植物群落健康生长的最大数量,用指示植物的种群数量(绝对指标)或密度(相对指标)表示。从一个较长的时期来看,土壤水分植被承载力即为雨水资源中补给土壤的部分水量维持植物健康生长的最大数量。

在表示土壤水分植被承载力时,除植被承载力的基本度量单位指示植物密度(Wang *et al.*, 2008; 郭忠升等,2003a)外,还应该说明植物群落的树种组成,指示植物的直径、高度,植物群落的生产力及其构成(郭忠升等,2009b),叶面积(指数)、枝量,木材蓄积和叶量,固碳能力(郭忠升,2010b),生态、经济和社会效益(郭忠升,2009)等。直接采用叶面积指数或生产力表示土壤水分植被承载力不妥,也不便于生产上的应用。当植物种类、立地条件和林龄一定时,直径、高度、密度与叶面积、生物量和生产

力间关系密切,可用 Allometry 方程等进行换算。

## 4 土壤水分植被承载力量化方法

目前,量化土壤水分植被承载力的模型有:经典的承载力模型(Cohen,1995)、种群增长通用数学模型(Price,1999)、密度-土壤水分模型(郭忠升等,2004)和基于物理过程(physically based model)的土壤水分植被承载力模型(Xia *et al.*, 2008)。

### 4.1 经典的承载力模型

根据土壤提供的有效水总量和树种的单株水分消耗量,马焕成等(2001)计算土壤对各树种的最大承载力,其计算公式为  $Q = C/D$ 。式中: $Q$ 为土壤水分植被承载力; $C$ 为土壤的有效水分总量; $D$ 为单株树木水分消耗量。由于该公式在形式上和常用的人口承载力计算模型(Cohen,1995)相同,我们称之为经典的土壤水分植被承载力量化模型。该模型的优点是简单、易行,便于实际应用。马焕成等(2001)根据有关测定结果,确定土壤能够提供植物利用水分的土层厚度,计算出每公顷土壤可供植物利用的有效水总量,再根据各树种在整个旱季(11月至翌年5月)的单株水分消耗量,估测出每公顷林地对树种的最大承载力。由于他在计算最大承载力时,没有计算研究时期降雨补给土壤的水量和根层土壤的下渗水量,也没有考虑土壤蒸发,因而不能客观反映土壤水资源承载植被的能力。模型中单株水分消耗量也是随树种、天气和土壤水分状况而定。

### 4.2 种群增长通用数学模型

种群增长的基本方程可分为  $r$ 型和  $k$ 型。在自然种群中,资源和环境是有限的,种群在资源和环境有限的条件下增长。随着种群数量的增多,个体对有限空间的自然资源的竞争加剧,这必然影响到种群的出生率、死亡率以及种群增长率,从而降低种群的实际增长率。当种群的个体数目接近于资源环境所能支持最大值  $K$ 时,种群不再增长。受土壤水分影响的  $k$ 型种群增长模型可表示为(Price,1999):  $dN/dt = rN \times [K - N/K]$ ,对上式积分得 Logistic 方程  $N = K/[1 + \exp(a - rt)]$ 。 $N$ 为种群数量, $t$ 为时间, $r$ 为种群的内禀增长率, $a = r/K$ 。

如果知道了指示植物(优势种或目的树草种)的种群在不同时间序列( $t_i$ )所对应的种群密度( $N_i$ ),根据不同时期的时间和密度实测资料,将不同时间2个变量数值点:( $t_1, N_1$ ), ( $t_2, N_2$ )...( $t_i, N_i$ )(最少3组)代入 Logistic 方程,联立方程组求解,即可获得  $a$ 、 $r$ 和  $K$ 值。由于土壤水积极参与水循环,不断得到补充和消耗。土壤水资源是可恢复

的,在一年内,受降雨的影响,土壤湿度随降水迅速改变(徐化成等,1979),因此采用该模型计算土壤水分植被承载力比较困难。

#### 4.3 密度-土壤水分模型

土壤水分植被承载力可以通过试验观测法获得。试验观测法就是在野外做试验,找出目的树(草)种种群数量变化过程对土壤水资源变化的影响。在分析密度与土壤水分消耗和补给量关系的基础上,郭忠升等(2004)提出了密度-土壤水分模型。该模型假定土壤水分消耗量、土壤水分补给量与密度的关系分别为  $Y_1 = F(x)$  和  $Y_2 = G(x)$ ,  $Y_1$  为土壤水分补给量(mm);  $Y_2$  为土壤水分消耗量(mm),  $x$  为林分密度(株·hm<sup>-2</sup>)。根据实测资料回归分析,分别建立土壤水分补给量与密度为线性关系,土壤水分消耗与密度为二次多项式关系。在满足土壤水分消耗量等于土壤水分补给条件下,求解方程组,即可获得临界密度  $x$  值,该密度即为该条件下的土壤水分植被承载力。

该方法简单、易行,符合实际,便于操作。采用该方法可以连续获得不同年际的土壤水分植被承载力。虽然一个区域的试验观测结果不能应用到其他研究区域,但是该研究方法可以适用其他地区。

#### 4.4 基于物理过程的土壤水分植被承载力确定模型

Xia等(2008)探讨了量化土壤水分植被承载力的过程模型。该方法以土壤水分位于萎蔫点以下的天数是否大于植物能忍受土壤水分调萎点的天数  $N_w$  来判断植物群落密度是过大还是过小。如果土壤水分出现亏缺,且连续亏缺天数  $N_{wl}$  大于植物所能忍受的最大天数  $N_w$ ,此时种群密度超过土壤水分所能承载力,应减少种群的密度,此时对模型重置。依次类推,进行迭代运算,一直搜索到  $N_w > N_{wl}$  为止,再计算植物呼吸、碳分配、植株生长等。

1969年Freeze和Harlan发表了“一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图(FH69蓝图)”,许多具有物理基础的分布式水文模型几乎都是基于FH69蓝图构建的(张金存等,2007)。过程模型从机理上对土壤水分和植被生长各物理过程以及影响因子进行分析和模拟,理论框架完整,结构严谨。通过不同参数的输入,可以得到该区的土壤水分植被承载力。过程模型优点是机理性强,可以预测不同情景模式下土壤水分的植被承载力,但是该模型需要大量的参数,参数获取的难易性和准确性是模型应用的关键。更多的参数意味着更多的率定问题,更多的率定则会给预测带来更大的不确定

性,尤其是超出率定范围时(张金存等,2007)。模拟以土壤水分位于凋萎点以下的天数是否大于植被能忍受土壤水分凋萎点的天数来判断植物种群的密度是过大还是过小是值得进一步商榷的,因为陆地植物特别是木本植物能够依靠雨季恢复的土壤水分、或通过根系延伸吸收深层土壤储水、或通过调节蒸腾强度和生长量维持其生存,因此在一般情况下,在全土壤剖面或土壤剖面的某一土壤层,短期土壤水分胁迫能引起植物生长发育不良、叶片变色、提前落叶和生产力下降,生产力甚至降为零,但一般不会使植物枯死。目前还未发现土壤旱化和土壤退化引起的植物死亡现象,但是根系吸收利用土层的水分资源却出现严重亏缺,因此模拟结果不能完全反映实际情况。

## 5 研究展望

目前,土壤水分植被承载力的概念、量化方法和基本参数获取的研究及方法均取得了进展,但是受时间、认识水平和试验材料的限制,研究多侧重于理论,比较零散。目前急需完善土壤水分植被承载力理论,加强野外不同立地和不同植物群落指示植物的生长与土壤水分(补给和消耗)关系的长期定位试验,从不同时空尺度确定不同植物群落的土壤水分承载力,为水土资源合理利用,大面积生态修复,维持生态系统健康和可持续经营森林植被提供依据。

## 参 考 文 献

- 葛宏立,周国模,张国江,等.2007.遥感、地面三相抽样及其在森林资源年度监测面积估计中的应用.林业科学,43(6):77-82.
- 郭忠升,邵明安,张一平.2002.林地土壤剖面水分垂直变化层次划分方法的研究//邵明安.土壤物理与生态环境建设研究文集.西安:陕西科技出版社,74-79.
- 郭忠升,邵明安.2003a.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,23(8):1640-1647.
- 郭忠升,邵明安.2003b.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,18(5):522-528.
- 郭忠升,邵明安.2004.土壤水分植被承载力数学模型的初步研究.水利学报,35(10):95-99.
- 郭忠升,邵明安.2006.土壤水分植被承载力初步研究.科技导报,24(2):56-59.
- 郭忠升.2008.森林植被的恢复与利用.世界林业研究,21(增刊):123-126.
- 郭忠升,邵明安.2009a.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析.土壤学报,46(5):953-958.
- 郭忠升,邵明安.2009b.土壤水分植被承载力研究成果在实践中应用.自然资源学报,24(12):2187-2193.
- 郭忠升,李耀林.2009c.植物生长与土壤水关系调控起始期.生态学

- 报 29(10):5721-5723.
- 郭忠升. 2009. 黄土高原半干旱区水土保持植被恢复限度. 中国水土保持科学, 7(4):49-54.
- 郭忠升, 邵明安. 2010. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响. 林业科学, 46(12):1-7.
- 郭忠升. 2010a. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度. 应用生态学报, 21(12):3029-3035.
- 郭忠升. 2010b. 碳汇林、植被承载力与森林可持续经营. 世界林业研究, 23(增刊):40-43.
- 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 1999. 土壤水研究进展与评述. 水科学进展, 10(3):311-318.
- 刘建立, 王彦辉, 于澎涛, 等. 2009. 六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力. 植物生态学报, 33(6):1101-1111.
- 刘昌明. 2004. 水文水资源研究理论与实践——刘昌明文选. 北京: 科学出版社, 432.
- 马焕成, 吴延熊, 陈德强. 2001. 元谋干热河谷人工林水分平衡分析及稳定性预测. 浙江林学院学报, 18(1):41-45.
- 沈荣开. 2007. 关于土壤水资源计算的有关问题——与王浩、杨贵羽等同志商榷. 水利学报, 38(8):1021-1022.
- 沈振荣, 汪林, 于福亮, 等. 1998. 用好土壤水//沈振荣, 陈家琦. 中国农业水危机对策研究. 北京: 中国农业科技出版社, 235-242.
- 施成熙, 粟崇嵩, 曹万全. 1984. 农业水文学. 北京: 农业出版社, 347.
- 田有亮, 何炎红, 郭连生. 2008. 乌兰布和沙漠东北部土壤水分植被承载力. 林业科学, 44(9):13-19.
- 王延平, 邵明安. 2009. 陕北黄土丘陵沟壑区杏林地土壤水分植被承载力. 林业科学, 45(12):1-7.
- 王浩, 秦大庸, 陈晓军, 等. 2004. 水资源评价准则及其计算口径. 水利水电技术, 35(2):1-4.
- 王浩, 杨贵羽, 贾仰文, 等. 2006. 土壤水资源的内涵及评价指标体系. 水利学报, 37(4):389-394.
- 徐化成, 易宗文. 1979. 华北低山区土壤水分季节性变化与林木生长的关系. 林业科学, 15(2):97-104.
- 易秀, 李现勇. 2007. 区域土壤水资源评价及其研究进展. 水资源保护, 23(1):1-5.
- 张国江, 刘安兴. 2002. 森林资源年度监测中若干问题研讨. 华东森林经理, 16(2):37-39.
- 张金存, 芮孝芳. 2007. 分布式水文模型构建理论与方法述评. 水科学进展, 18(2):286-292.
- 朱福星, 王金针. 1993. 四维治水——黄淮海平原农业水资源综合治理配套技术. 北京: 科学出版社, 54.
- Blake J, Somers G, Ruark G. 1991. Estimating foliar biomass in conifer plantations from allometric relationships and self-thinning behavior. Forest Science, 37(1):296-307.
- Bossio D, Geheb K, Critchley W. 2010. Managing water by managing land: addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. Agricultural Water Management, 97(4):536-542.
- Cohen J E. 1995. Population growth and earth's human carrying capacity. Science, 269(21):341-346.
- Price D. 1999. Carrying capacity reconsidered. Population and Environment, 21(1):5-26.
- Scott C T, Kohl M, Schnellbacher H J. 1999. A comparison of periodic and annual forest surveys. For Sci, 45(3):433-451.
- Wang Y H, Yu P T, Xiong W, et al. 2008. Water-yield reduction after afforestation and related processes in the semiarid Liupan Mountains, Northwest China. Journal of the American Water Resources Association, 44(5):1086-1097.
- Xia Y Q, Shao M A. 2008. Soil water carrying capacity for vegetation: a hydrologic and biogeochemical process model solution. Ecological Modelling, 214(2-4):112-124.

(责任编辑 于静娴)