

土壤水分植被承载力数学模型的初步研究

郭忠升¹, 邵明安^{1,2}

(1. 中科院水利部、西北农林科技大学, 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中科院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 本文通过对不同密度林地根层土壤水分补给和消耗量的分析, 提出确定土壤水分植被承载力的概念模型。通过对不同密度人工林地根层土壤水分补给和消耗的定位监测资料分析, 建立了土壤水分植被承载力的数学模型。通过实例分析可以看出, 该方法是简便易行。

关键词: 土壤水分植被承载力; 密度; 土壤水分补给; 土壤水分消耗; 数学模型

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

自从1992年世界环发大会以来, 可持续发展思想已成为世界各国制定社会经济发展战略的主要依据。可持续发展的核心问题就是如何将人类活动强度控制在资源、环境和生态系统承受的范围之内, 于是承载力概念逐渐被人们接受并应用到有关方面。水资源持续利用是自然资源持续利用中最重要的问题之一。土壤水分植被承载力是土壤水分紧缺地区补充给土壤的部分雨水所能承载植物的最大负荷。研究土壤水分植被承载力对于合理利用雨水资源、合理经营林草植被、维持人工林草植被生态系统健康具有重要的意义^[1,2]。近年来关于生态环境需水量^[3], 水资源承载力^[4-6], 区域水资源承载力^[7-8]等报道较多, 地下水环境承载力也有报道。但是有关土壤水分植被承载力及其确定方法的研究报道较少。本文试图通过对特定种群不同密度林地土壤水分补给量和消耗量定量分析, 构建确定土壤水分植被承载力的数学模型。

1 基本理论

1.1 种群数量增长的数学模型 若资源环境(植物生存空间和食物资源)不受限制, 设增长率 r 为一恒值, 则单位面积单种种群的数量(用密度表示)呈指数式增长

$$\frac{dN}{dt} = rN \quad (1)$$

式中: N 表示单位面积某个种的个体数量, 即密度。 r 为种群增长率, t 为时间。

在大部分条件下, 植物群落生长的资源和环境条件有限。随着种群内个体数量的增多, 对有限空间的光、热、水等自然资源的竞争加剧, 这必然影响到种群的出生率 b 和死亡率 c , 从而降低种群的实际增长率 $r=b-c$ 。当种群的个体数目接近于资源环境所能支持的最大值, 环境承载力 K 时, 种群数目不再增长。群落密度随时间变化可用微分方程表示为

收稿日期: 2003-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018605), 中国科学院资环局知识创新重要方向(KZCX2-411), 国家自然科学基金重点项目(30230290)

作者简介: 郭忠升(1963-), 男, 陕西富平人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤水分与植物生长、森林水文与水土保持等方面研究。

$$\frac{dN}{dt} = rN_{(t)} \times \left(\frac{K - N_{(t)}}{N} \right) \quad (2)$$

对式(1)积分得Logistic方程

$$N = \frac{K}{1 + e^{(a-rt)}} \quad (3)$$

式(2)、(3)中 $N(t)$ 表示时间 (t) 之末的种群数量； K 表示环境承载力， $a=r/K$

如果知道了不同时间序列 (t_i) 某种群相应的密度 (N_i) ，根据不同期间时间和密度实测资料 (t_1, N_1) ， (t_2, N_2) ... (t_i, N_i) (最少3组)代入方程3，联立方程组求解，即可获得 K 值。采用该方法确定植被承载力需要的时间较长。另外用此方法计算植被承载力所反映的实质上是土地资源(或生境)总体对植被的承载能力，即土地植被承载力，体现不出干旱和半干旱地区土壤水分对植被承载力的独特作用，因而不清楚达到承载力时的林地土壤水分状况：是亏缺，平衡还是改善，因此研究土壤水分植被承载力，必须另辟它径。

1.2 土壤水分植被承载力的数学模型 森林植物主要依靠其根系从根层土壤吸收水分。雨水在穿过林冠到达土壤前，部分被林冠截留，部分被直接蒸发，或沿树干流下形成干流。干流部分占的比例较少且直接渗入土壤，不须单独观测。天然降雨一般历时较短，空气相对湿度大，温度低，蒸发量较小，可忽略不计。到达林地的雨水部分沿坡面流失，部分渗入土壤。进入土壤的雨水有可能发生深层渗漏。在实验地降水入渗深度在平水年和丰水年一般不超过210cm，土壤耗水量的变化主要发生在400cm土层以内，根层土壤厚度一般大于降水入渗深度，因此在计算根层土壤储水量变化时，不考虑深层渗漏。这样穿过林冠到达根层土壤的雨水被分为两部分，补充土壤或损耗(林冠截留和地表径流)。植物生长发育呈现出发芽、展叶、开花、结果、落叶周期性季节性变化，根层土壤水分储量随天气、降雨、蒸发、蒸腾等因素的影响呈现出下降、增长、消退和平稳的周期性变化。土壤水分对植物生长的胁迫需经过一定时间才会导致植物的死亡，遇到水分胁迫时，植物也能通过调节自身的生理变化来适应干旱的环境，因此在研究土壤水分植被承载力时，需要在一定的期间内进行。

土壤水分植被承载力是在较长时期内，在现有的条件下，当植物根系利用土层范围内土壤水分消耗量等于或小于土壤水分补给量时，维持特定植物群落健康生长的最大密度，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。如果在一定时期内测定密度的根层土壤水分补给量恰好等于土壤水分消耗量，该密度即为土壤水分植被承载力，这种几率是非常低的。为了确定土壤水分植被承载力，就必须研究不同密度林地雨水资源与土壤水分转化，土壤水分与植物生长的相互关系，探求确定土壤水分植被承载力的一般方法。

首先通过增加密度(对于未出现土壤旱化的幼林地)或减少密度(对于已出现土壤旱化的成林地)建立不同密度实验样地，获得出现土壤旱化和未出现土壤旱化的密度与土壤水分补给和消耗资料。假定在一定立地条件和植被类型下，获得了一定时期内不同密度林草地土壤水分消耗和补给量的实测资料，则土壤水分消耗和补给量与密度关系可概化为

$$Y_1 = F(x) \quad (4)$$

$$Y_2 = G(x) \quad (5)$$

式中： Y_1 表示土壤水分补给量； Y_2 表示土壤水分消耗量， x 表示林分密度。

方程的类型和参数由实验获得。为了实现林业可持续发展,首先应使根层土壤水分在一定时期内保持平衡。如果根据实测资料,分别建立土壤水分消耗和补给量与密度的定量关系,那末通过联立方程求解。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。

2 实例分析

2.1 野外实验简介 该项研究在中国科学院、水利部水土保持研究所上黄生态试验站(宁夏·固原)进行。该站位于黄土高原中部的黄土丘陵半干旱区,东经 $106^{\circ}26' \sim 106^{\circ}30'$,北纬 $35^{\circ}59' \sim 36^{\circ}02'$ 。坡度为 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$,海拔高度约1534~1824m。据1983年到2002年观测,年降雨量变化在634.7mm(1984)~259.9mm(1991),平均为414.1mm,降水年变率为23%。无霜期152d,土壤为黄绵土,植被为森林草原。实验地位于站内的黑刺栎东坡中部,坡度为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$,海拔约1650m。该研究以抗旱性和适应性强,在黄土高原干旱和半干旱区分布广的柠条人工林为研究对象。16年生实验柠条林平均冠幅 $102.9\text{cm} \times 87.2\text{cm}$,高103.3cm,地径11.2mm,分枝数34个。林下草本植物有长芒草、阿尔太狗娃花、芨芨、白里香等。

2.2 观测项目与测定方法 气象资料来源于上黄简易气象站。气象站在实验区附近,距实验地300m,海拔1602m。

测定项目包括根系分布深度,林冠截留,地表径流,土壤水分和植物生长。根系分布深度的调查采用挖掘剖面法。土壤水分补给量的测定包括降雨量,林冠截留和地表径流量。在柠条林外安置标准雨量器,在不同密度柠条林内安置微型雨量器并建立 $5\text{m} \times 20\text{m}$ 的标准径流观测场,每次降雨后,测定林内外降雨量和地表径流量。

植物生长和土壤水分:土壤水分测定采用CNC503A(DR)型智能中子水分仪。在每个径流场中心安置2个4m长的中子仪铝合金套管,标定方程为: $y=55.76x+1.89, R^2=0.9353$ 。每20cm测定记录一次,测定深度为0~400cm。从4月中旬到11月同步进行植物生长和土壤水分测定,每隔15d测定一次。

林冠截留量=林外降水量-林内降水量;土壤水分消耗量(蒸发散)=前期土壤储水量-末期土壤储水量+观测期间降雨的土壤水分补给量。土壤水分补给量=林外降水量-林冠截留量-地表径流量。在每个处理小区选10个代表样丛,每丛选4个代表枝,用于观察和测定柠条林生长。选择代表样丛进行刈割,测定单枝径、高、叶量和生物量、枝叶含水率。

理论上来说,密度的微小变化(X),如每 100m^2 密度从99株增加到100株, X 等于1,都可能引起单位面积林冠截留、地表径流、土壤水分补给和消耗量变化。但是这些变化是比较小的,在野外条件下用仪器是难以测得的,因此密度实验中密度梯度确定就成了一个难点问题。合适的密度梯度应为密度变化所引起林冠截留、地表径流、土壤水分补给和消耗量的变化能被仪器感知,这取决于:(1)密度梯度愈大,密度差所引起土壤水分补给和消耗量的变化越大,不同密度之间差异易被测出。但是在有限的实验密度范围内(本次实验林密度为 $90 \sim 100$ 丛/ 100m^2),密度梯度不能太大。如果太大,不同密度的样本个数太少,不利于数学模型的建立;(2)观测仪器,仪器感量越小,愈容易测定土壤水分的微小差异。在土壤水分观测仪器方面,中子仪和TDR精度都高,但是中子仪价格合适,该项研究选用中子仪。(3)观测间期,间期愈长,密度变化引起的微小差异愈易观测。

实验设计前(2001年7月下旬),对初步选定的实验地内不同密度人工柠条林,包括 $1\text{m} \times 1\text{m}$, $2\text{m} \times 3\text{m}$, 平茬, 0.8m 行距土壤水分进行了测定。通过对测定结果的分析,初步确定人工实验密度为9000、7000、5000、3000和1000丛/ hm^2 。在比较均匀的多年生人工柠条林修建径流场。径流场修成后,按照实验设计,对径流场内人工林进行疏伐,以调整并保持人工林密度。径流场于2002年4月下旬修建,到5月下旬建成。2002年

5月19日进行密度处理作业。调整密度时除去生长差，树冠较小、比较拥挤的灌丛。要求调整后径流场灌丛空间分布比较均匀。实际上实验场内的柠条林分布不是绝对地均匀，因此在施工时，又根据小区内柠条林的实际分布状况，实际密度分别为8700、7100、5100、3200、1600丛/hm²。

2.3 结果与讨论

2.3.1 密度与土壤水分补给

(1)密度与林冠截留。植物能依靠其巨大的枝叶表面吸附能吸附雨水，枝叶稠密，叶面粗糙的林冠截留的雨水较多。在立地条件，雨量、雨强、植被类型、生长发育阶段相同条件下，密度越大，林冠的郁闭度或盖度(灌木和草本植物用盖度表示)越大，单位面积枝叶量大，林冠截留量大，这与有关报道林冠截留随密度变化趋势相同^[9]。以2002年7月25日观测的资料为例(见图1)，说明林冠截留量与密度的定量关系。通过对实测资料分析，林冠截留量(I)与密度(x)的关系为： $I=0.0158x^{0.6601}$ ， $R^2=0.9859$ 。

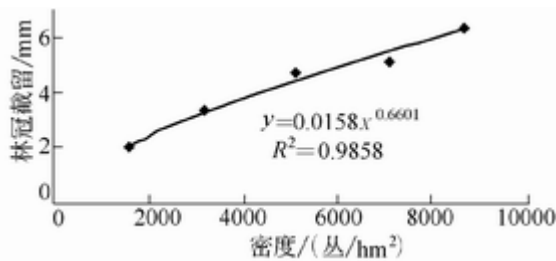


图1 林冠截留量与密度关系

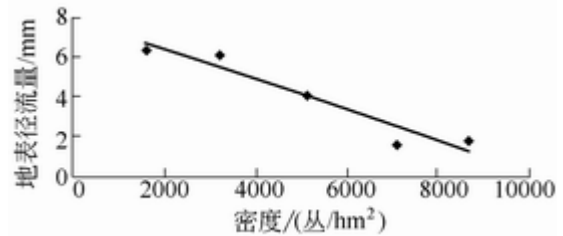


图2 地表径流与密度的关系

(2)地表径流与密度关系。黄土高原地表径流一般为超渗产流。在降雨强度大于入渗速率时形成。由于冠层拦截降低了雨滴动能，防止了地表结皮的形成；植被增加了地表粗糙度。森林植被改善土壤结构能增加降雨入渗；活立木的机械栅栏作用，增加了坡面径流阻力，延缓了径流的流速，增加了雨水入渗。从表2可以看出，随着密度增加，林地地表径流量减少。地表径流(Run)和密度(x)关系为： $Run=-0.0008x+7.9219$ ， $R^2=0.9398$ 。

(3)土壤水分补给与密度关系。一定时期内根层土壤水分补给量与密度的关系取决于降雨量、林冠截留和地表径流损失量的大小。由于密度变化改变了林冠截留和地表径流的数值大小，这种影响必然会反映在土壤水分补给量。2002年6月底到8月15日人工柠条林根层土壤水分补给量与密度关系如图3所示，根层土壤水分补给量(Y₁)与密度(x)的关系为线性关系： $Y_1=0.0029x+92.494$ ， $R^2=0.9355$ 。

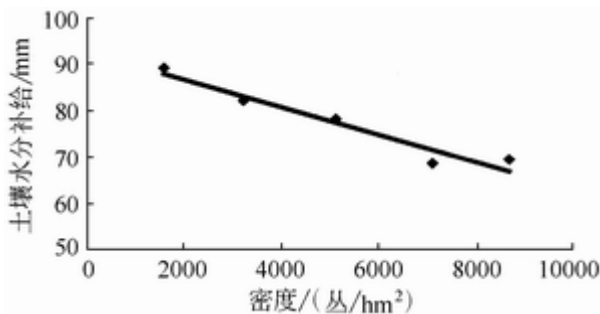


图3 林地土壤水分补给量与密度的关系

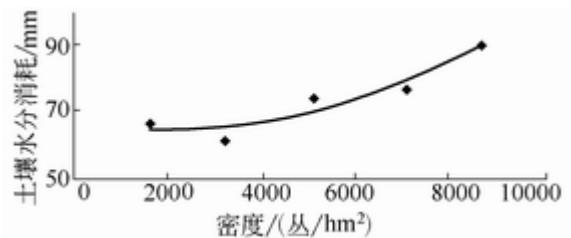


图4 土壤水分消耗量与密度的关系

2.3.2 土壤水分消耗与密度关系 黄土高原大部分地区的天然降水是土壤水分的唯一补给源。降雨时穿过林冠和地表面进入到根层土壤的水分增加了土壤含水量和储水量，提高了土壤水分对植物的有效性，有利

于促进植物的生长和发育。植物的生长发育又消耗了土壤储水量。2002年6月底到8月15日人工柠条林根层土壤水分消耗量的实测结果如图4所示,在测定的密度范围内,土壤水分消耗量(Y_2)与密度(x)的关系为

$$Y_2=0.000001x^2-0.0076x+64.759, R^2=0.8898$$

2.3.3 土壤水分植被承载力 根据人工柠条林密度与土壤水分补给量和土壤水分消耗量关系的定量分析结果,建立确定土壤水分植被承载力的联立方程组

$$\begin{cases} Y_1 = -0.0029x + 92.494 & (6) \\ Y_2 = 0.000001x^2 - 0.0076x + 64.759 & (7) \end{cases}$$

当 $Y_1=Y_2$,上述方程组有两个解: $X_1=8115$ 和 $X_2=-3415$ (密度不为负,舍去),所以 $X_1=8115$ 丛/ hm^2 即为土壤水分植被承载力。在实验密度范围内,生物量(W)与密度关系为: $W=0.6497x-663.9$,当 $X=8115$ 丛/ hm^2 时,单位面积生物量(鲜重)为 $3.47t/hm^2$ 。枝叶平均含水量为 45.9% ,叶茎比(干重)为 31.2% ,则单位面积地上部分干生物量增量为 $1.88t/hm^2$,其中叶净增量为 $0.45t/hm^2$ 。

3 小结

本文通过对森林生态系统土壤水分补给和消耗量的分析,在实现林地可持续发展的前提下,提出了土壤水分植被承载力的一般确定方法;首先通过增加密度(未出现土壤旱化幼林)或减少密度(已出现土壤旱化林地)建立不同密度实验样地,通过野外定位观测获得不同密度根层土壤水分补给和消耗资料。分别建立密度与土壤水分消耗和补给量定量关系方程,在满足土壤水分补给等于消耗量的条件下,联立方程求解,即可获得土壤水分植被承载力数值。以黄土丘陵半干旱区发生土壤旱化的人工柠条林实地定位观测资料为例,建立了土壤水分植被承载力数学模型。通过分析可以看出,该方法简单、易行,便于操作。另外在像黄土高原这样的易变环境中的林草植被,影响土壤水分植被承载力的因素较多,作为初步研究,本文只研究了问题一部分或侧面。由于不同密度人工林野外定位观测资料期间较短,确定的土壤水分植被承载力数值有待于进一步完善;建立的密度与土壤水分补给量或土壤水分消耗量的关系有待进一步验证,以便完善土壤水分植被承载力的确定方法。在表示土壤水分植被承载力时除经典的临界密度外,还需要说明立地条件、植被类型、生长发育阶段、生物量及其构成等,以便于林地密度调控和经营管理。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [2] 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[J].自然资源学报,2003,18(5):522-528.
- [3] 倪晋仁,催树彬,李天宏,金玲.论河流生态环境需水量[J].2002,9:14-26.
- [4] 周维博.河西走廊灌溉农业发展的水资源承载能力分析[J].自然资源学报,17(5):564-570.
- [5] 夏军,朱一中.水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J].自然资源学报,2002,17(3):262-269.
- [6] 李令跃,甘泓.试论水资源合理配置与承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展,2000,11(3):307-313.
- [7] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等.区域水资源承载力[J].水科学进展,2003,14(1):109-113.
- [8] 姚治君,王建华,江东,陈传有.区域水资源承载力的研究进展及其理论探讨[J].水科学进展,2002,13(1):111-115.

[9] 刘向东, 吴钦孝, 韩冰. 黄土丘陵区油松人工林和山杨林林冠对降水的再分配及其对土壤水分的影响[J]. 中国科学院水利部水土保持研究所集刊, 1991, (14): 9-20.

Mathematical model for determining vegetation carrying capacity of soil water

GUO Zhong-sheng¹, SHAO Ming-an^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Yangling 712100, China;

2. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the analysis of soil water supply and consumption in forest ecological system the method for determining vegetation carrying capacity of soil water is proposed. The data of soil water supply and consumption for different density of root zone soil layer are derived from field experiment. The quantitative relationship between planting density and soil water supply and water consumption is derived consequently. According to the principle of balance between water supply and water consumption the carrying capacity is obtained by solving the set of equations expressing the relationship. The mathematical model for describing the vegetation carrying capacity of soil water in a Caragana forestland in semi arid loess hilly area based on the observation data is presented as an example for demonstration of the proposed method.

Key words: vegetation carrying capacity of soil water; planting density; soil water supply; soil water consumption; mathematical model