

Soil Water Resource Use limit by Plants in Water-Limited Regions

Guo Zhongsheng^{1,2}

1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwestern A & F University, Yangling;
2. Research Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment, CAS & DE, Yangling

Abstract: Soil moisture can only be absorbed and utilized by plant roots, but in most areas where water resources are scarce, the soil moisture absorbed and utilized by the roots is mainly due to natural precipitation. Due to insufficient precipitation with a big season and yearly change, deep groundwater storage and no irrigation conditions, the soil water supply in the root layer is insufficient, resulting in soil drought, soil degradation, vegetation decay, fruit and crop failure. In order to realize the sustainable utilization of soil water resource and sustainable management of forest and sustainable production of fruit and crop, it is necessary to regulate the relationship between plant growth and soil moisture according to the soil water resource utilization limit by plants and soil water carrying capacity for vegetation. So, in this earea, there should be a control limit for the absorption and utilization of soil water by plants. That is, the soil water resources utilization limit for plants. It refers to the residual soil water storage in maximum infiltration depth when the soil moisture content of the soil layer is equal to the wilting coefficient. The infiltration depth and soil moisture supply for one rain

event were determined by two-line method, and the maximum infiltration depth was determined by a series of two-line method. The indicator plant for natural vegetation is constructive species of the plant community, and the non-native vegetation is the main tree species or target tree (grass) species. Soil water resource utilization limit by plants is the function of vegetation type and site condition and the theoretical basis for judging whether plants overuse soil water resources and determining the starting period of plant water relationship regulation and the selection of tree and grass species.

Key words: Soil water; water-limited regions; plant growth; soil water resources utilization limit by plants; vegetation type; site condition

Received: 2019-08-03; Accepted: 2019-09-18; Published: 2019-09-20

水资源紧缺地区土壤水资源利用限度

郭忠升^{1,2}

1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌

2. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨凌

邮编: zhongshenguo@sohu.com

摘 要: 土壤水分只能被植物根系吸收和利用, 但是在大部分水资源紧缺地区, 根系吸收利用土层的水分主要来自天然降水, 由于降水不充分, 且年际和季节变化较大, 地下水埋藏较深, 无灌溉条件, 导致该层土壤水分供应不充足, 常

引发严重土壤早化、导致土壤退化，植被衰败，果品或农作物绝收。为了实现土壤水资源可持续利用，森林可持续发展，果品或农作物可持续生产和可持续发展，就需要依据土壤水资源利用限度和土壤水分植被承载力对植物生长和土壤水分关系进行调控。因此在大部分水资源紧缺地区，植物对土壤水分的吸收和利用应该有一个控制限，这个限度即植物利用土壤水资源的限度，简称土壤水资源利用限度，它是指当最大入渗深度范围内所有土层的土壤水分含量等于指示植物萎蔫系数时的残留土壤储水量。采用二线法确定次降水入渗深度和土壤水分补给，采用系列二线法确定最大入渗深度。天然植被的指示植物为植物群落的建群种，人工植被为主要树种或目的树（草）种。土壤水资源利用限度是植被类型和立地条件的函数，是判断植物是否过度利用土壤水资源，确定植物水关系调控起始期和树草种选择的理论依据。

关键词：土壤水分；水资源紧缺地区；土壤水资源；土壤水资源利用限度；植被类型；立地条件

收稿日期：2019-08-03；录用日期：2019-09-18；发表日期：2019-09-20

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1 前言

土壤水资源是水资源的一个重要组成部分，四水转化的中枢。土壤水分只能被植物根系吸收和利用。在水资源紧缺地区，大部分人工植被的土壤水分主要来自天然降水，只能被植物根系吸收。在这些地区，土壤水分是限制植物生长的主要因素，在研究土壤水分和植物生长关系及其调控时，土壤水资源是表

示剖面土壤水分的最好指标,调控植物生长和土壤水分关系,认识和研究土壤水资源利用限度和土壤水分植被承载力的物质基础。

20世纪60年代,在陕西渭北东部半干旱区农田、关中半湿润区人工草地和陇东半湿润子午岭林区相继发现土壤存在下伏干燥化土层之后,许多学者对这一现象表示关注。他们分别对土壤干层的分布、形成条件和形成原因、土壤干层定义、分类,干层的危害、土壤干层的确定标准进行了研究。作者发现无论在偏旱年还是丰水年,多年撂荒地剖面相同土层土壤水分平均值,标准方差和变异系数变化较小,土壤水资源较大且变化较小,但是植被稀疏,盖度约50%,单位面积地上部分生物量 50 g/m^2 ,地表径流量较大,土壤流失严重,这会造成生产力的下降和土壤水资源浪费;而多年生人工林高度较高,人工柠条林为 $2\text{ m} \sim 3\text{ m}$,防风效果较好;其地上部分盖度为90%左右,总盖度为100%,生物量为撂荒地20倍。地表径流量和土壤流失量轻微,保持水土能力很强,与此同时,还会生产部分薪柴和饲料。由于中国是一个人口众多,资源相对匮乏的国家,我们不能粗放利用自然资源,而必须可持续地高效利用土壤水资源[1]。

多年生人工林草地,生物量大,特别是高生产力或高效益的林草地出现的土壤旱化和土壤退化会进一步加剧,出现永久干层。永久干层影响土壤水分的移动性,土壤水分深层下渗、补给和陆地水循环过程,最终导致森林植被的衰败,果品或农作物绝收。为了确保森林生态系统的稳定,森林生态、经济和社会效益的持续稳定发挥,实现可持续发展,我们必须深入研究土壤水分和植物生长关系,提出调控理论和控制指标,然后在该理论指导下调控植物生长和土壤水分关系[2][3]。继2000年作者提出植被承载力和土壤水分植被承载力概念[4],创立土壤水分植被承载力理论之后;2010年提出土壤水资源利用限度[5]。与此同时,在描述土壤旱化方面还有作物水分指数(crop moisture index)[6]。土壤水分亏缺指数(soil moisture deficit index),蒸发亏缺指数(evapotranspiration deficit index)和植物水分亏缺指数(plant water deficit index)[7]。这些指标可以划分为气象的、水文的和农业干旱指数。因为许多干旱指标是基于气象指标[8]或水量平衡方程,他们很难描述土壤剖面和根系分布空间的土壤水分亏缺

和土壤储水量 [9]，而土壤水资源利用限度是基于植物生长对土壤水分的反应，综合反应了土壤水分胁迫程度、最大入渗深度、土壤储水量和土壤水分管理要求，可以很好地描述剖面 and 根系分布空间土壤旱化和土壤储水量。因此掌握多年生人工林草地土壤水资源动态变化规律和土壤水资源利用限度，及时采取有效措施调控土壤水分和植物生长的相互关系，可以避免多年生人工林草地，果园或农田出现的土壤旱化，引发土壤退化，甚至出现荒漠化，果品或农作物绝收等极端现象，为土壤水资源可持续利用，森林植被可持续管理，果树和农业可持续生产和可持续发展提供理论依据和科技支撑提供依据。本文目的就是详细介绍土壤水资源，土壤水资源利用限度理论及其确定方法和在实践中的应用，以便提高公众对土壤水资源可持续利用认识水平，加速土壤水资源利用限度理论推广和利用。

2 土壤水资源

Lvovick (1980) 提出土壤总体湿润系数 (Overall Soil Moistening) 概念后 [10]，布达果夫斯基提出土壤水资源概念 [11]。由于土壤水资源是水资源成分之一，其具有水资源共有的有效性、可控性和可再生性。它不仅受土壤质地和结构的影响，而且受降水、表土蒸发和植物蒸腾等因素的影响，处于不断变化之中。为了满足土壤水分植被承载力研究和土壤水资源可持续利用的需要，土壤水资源有两种定义：一种是瞬态定义法，土壤水资源就是土壤储水量；另一种为动态定义法，土壤水资源就是一定深度一定时期之初始土壤储水量与植物生长期间土壤水分补给量之和。

瞬态土壤水资源是指一定土层深度非饱和带土壤中瞬时水分储量。为了满足不同专业的需要，土壤水资源有广义土壤水资源和狭义的土壤水资源之分。广义的土壤水资源范围是指地表面以下至地下水面（潜水面）以上非饱和带土壤中的水分。由于广义上的土壤水资源只能被植物根系吸收利用，植物无法利用较深土层中的水分。因此常用狭义土壤水资源概念。狭义的土壤水资源是指可被植物吸收利用的土壤水分，即植物根系吸收利用和影响土层的土壤水资源。

由于在一个较长时期内,植物生长、雨水补给土壤水分和土壤水分消耗过程一般是同时进行、相互影响的。因此受降雨补给、蒸发散、壤中流和深层渗漏等的影响,土壤水资源(S , mm)是一个动态变化的量。我们认为土壤水资源是在一定时期的一定深度土体(如植物根系吸收利用土层)内,如一个生长季或一年内,初始土壤储水量与生长期间土壤水分补给量之和。

3 土壤水资源利用限度

在水资源紧缺地区,植物对土壤水资源的利用是有限度的,这个限度即土壤水资源利用限度,它是指最大入渗深度范围内所有土层的土壤水分含量等于指示植物萎蔫系数时的残留土壤储水量 [1] [5]。

3.1 指示植物

指示植物是认识和确定土壤水资源利用限度的一个重要指标。在天然状态下,植物很少单生,许多植物生活在一起,组成植物群落,共同影响和利用土壤水资源。在同一地区相同立地条件和植物群落内生长的不同植物对土壤水分的响应是不同的。有的植物对土壤水分胁迫不敏感,有的植物种对土壤水分胁迫变化反应非常敏感。同时,在相同植物群落内不同物种的地位和作用是不同的。植物群落中的优势种,特别是最上层的优势种,建群种;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,常成为研究和调控植物与水环境关系的对象,因此我们必须用指示植物表示植物群落对土壤水分敏感程度,因此在确定植物利用土壤水资源利用限度时,指示植物应该为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,例如人工柠条林地指示植物为柠条,人工紫花苜蓿地指示植物为紫花苜蓿,玉米地为玉米。

3.2 萎蔫系数

萎蔫系数是认识和确定土壤水资源利用限度的另一个重要指标。土壤干层属于低湿土层,但不同于一般低含水土层,它是土壤含水率极低,且对植物的生

长发育产生严重影响的低湿层，是一种自然灾害。因此应该以萎蔫系数作为土壤干层的划分标准 [1] [2]。在一年中的任何时期，一旦出现土壤湿度等于或低于萎蔫系数，则该土层属于土壤干层。在林草植被经营和土壤水分管理过程中，一旦出现土壤干层，都应引起人们足够的重视。由于植物萎蔫是一个连续渐变过程，当土壤水分环境条件恶化到一定程度时，指示植物（目的树草种）会通过控制气孔开张度减少蒸腾耗水，当土壤旱化超过植物的自调控能力，达到严重土壤旱化时，引起部分或整个植株死亡。某些软叶植物，如苜蓿，出现萎蔫或死亡现象，而柠条等硬叶植物则出现变色和提早落叶。由于萎蔫系数是一个很小的范围 [12]，一旦出现萎蔫或提前落叶，说明土壤水分不能满足植物正常生长的需要，此时的土壤含水量为初始萎蔫系数，植物因缺水凋萎并不能复原时的土壤含水量为永久萎蔫系数。当指示植物开始出现萎蔫时的土壤含水量为萎蔫系数的下界，也是维持植物正常生长的下限值，此时的萎蔫系数应该成为划分土壤干层和确定土壤水资源利用限度的重要参数之一，因此初始萎蔫系数确定非常重要。

萎蔫系数一般采用离心法或压力室确定。如果我们在剖面中某一部用环刀取原状土，用离心机法或压力室测定土壤水分特征曲线。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。例如，宁夏南部黄土丘陵半干旱区人工柠条林地剖面中部，土壤容积含水量 θ （%）与水吸力 ψ （ 10^5 Pa）的关系为（ $R^2=0.9176$ ）： $\theta=16.226\psi^{-0.2746}$ ，见图1。

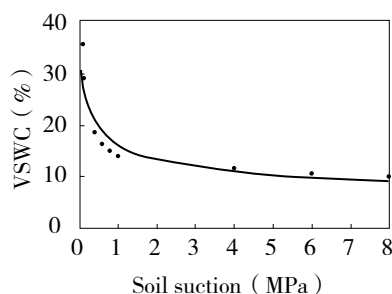


图1 人工柠条林地土壤水分与土壤水吸力关系图

Figure 1 Relationship between soil moisture and soil water suction in non-native Caragana shrubland

从图 1 可以看出, 在低吸力范围 ($\psi < 2 \times 10^5 \text{ Pa}$), 测值与拟合值相差较大, 在高吸力范围 ($\psi \geq 2 \times 10^5 \text{ Pa}$), 随着基质吸力增加, 土壤水分的测定值与拟合值非常接近。Rechard 和 Wadleigh (1952) 发现萎蔫系数一般介于基质吸力 $-1.0 \sim 2.0 \text{ MPa}$ 之间, 常用平均值 -1.5 MPa 时的土壤含水量表示 [13]。例如在黄土丘陵半干旱区 (宁夏固原上黄生态站) 人工柠条林地 (下同), 当土壤水分降低到 7.7% 时, 储存在土壤中的水分对植物为无效水, 此时的土壤水分严重影响植物吸收和利用, 柠条林叶片出现变色和提前落叶或死亡现象, 该土层即为土壤干层。该层土壤的储水量即为土壤的土壤水资源利用限度。据此预测, 当基质吸力为 $15 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 林地土壤水分的萎蔫系数估算值约为 7.7%。

在上黄生态站黑刺岭西面退耕多年种植的多年生人工柠条林地萎蔫系数随土层深度发生变化, 从表层土 ($0 \sim 5 \text{ cm}$) 的 10.34% 下降到 7.67% ($160 \sim 165 \text{ cm}$), 然后又增加到 10.45% ($360 \sim 365 \text{ cm}$)。在黑刺岭东面多年生人工柠条林地萎蔫系数随土层深度变化也表现出相同的规律性 (见表 1)

表 1 上黄生态站黑刺岭西面多年生人工柠条林地萎蔫系数随土层深度变化

Table 1 the change of wilting coefficient with soil depth in annual non-native Caragana shrub Land at the top of Heici Mountain in the Shanghuang Eco-experiment Station

深度 (cm)	饱和含水量 (%)	田间持水量 (%)	萎蔫系数 (%)	有效水含量 (%)
0	50.64	25.31	10.32	15
20	53.19	21.94	9.79	12.15
40	54.16	21.36	8.88	12.48
80	52.38	18.95	8.13	10.82
120	54.09	19.55	8.08	11.47
160	52.47	20.35	7.67	12.68
200	54.6	23.45	8.74	14.71
240	56.38	24.99	9.54	15.45
280	54.88	24.79	9.22	15.57
320	53.88	25.49	9.75	15.74
360	55.63	26.67	10.45	16.21
400	56.12	26.65	10.07	16.58

3.3 入渗深度和入渗量

入渗深度和入渗量是认识和确定土壤水资源利用限度的又一个重要指标。由于水资源紧缺地区大部分为人工林草地，无灌溉条件，地下水埋藏较深，因此在确定植物利用土壤水资源限度时，不仅要考虑植物利用土壤水资源的能力，而且还需要考虑林草地土壤水资源补给能力。描述雨水补给土壤水资源能力重要指标是雨水入渗深度和入渗量。

土壤水分入渗是在一定时间进程中进入土壤中水分向下移动过程。进入土壤的水分，或存储在土体内供植物吸收和利用，或在垂直入渗过程中改变方向形成壤中流，或穿过土层形成深层渗漏补给地下水。

测定土壤入渗的方法有直接测定法和间接测定法。我国从清代起就采用直接测定法研究降水入渗深度。选一块较为平整的土地做定点观测。每次降雨过程结束后，用铁锹向下挖土，挖到肉眼可直接看到的干湿交界面处停止，然后测量这一界面至地表的距离，即为次降水入渗深度。但是这种方法确定干湿交界面较困难，特别是在降水几天过后，干湿土层含水量差异较小，颜色差异不太明显时。因此该方法不适于非破坏林地土壤水分入渗深度动态变化研究。

次降水入渗深度确定。降水后，通过对不同时间序列剖面土壤水分垂直变化过程的观测和分析，即可确定土壤入渗深度和入渗量，这种方法称二线法（见图 2），土壤入渗深度和入

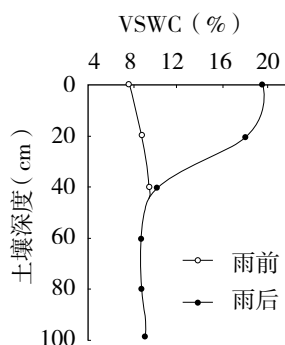


图 2 二线法确定次降水入渗深度和入渗量, VSWC 为容积含水量

Figure 2 Estimation of infiltration depth and soil water supply using two curve method for a rain event. VSWC is volume soil water content

渗量随降水量增加而增加。以此类推, 如果获得一个连续较长入渗过程中不同时刻林地剖面土壤水分垂直变化过程, 可以确定不同时间段人工林草地最大累积入渗深度 [3]。二线法还可用来确定一定时期土壤水分消耗量和植物利用土壤水分深度。例如, 我们根据当地天气预报和经验判断, 2002 年 6 月 20 日有降雨。于是我们于 6 月 20 日上午 9 时, 对人工柠条林地剖面土壤水分进行了测定。6 月 20 日晚至 21 日上午, 试验地降了一场长历时的大雨, 降雨量为 49.5 mm, 21 日下午测定了不同处理雨后剖面土壤水分含量, 降雨前后林地土壤剖面的水分状况见图 3。降雨是一个随机事件, 一个降雨事件可以用最小时间间隔表示 (Minimum Inter-event Time, MIT), 我们野外测定最小时间间隔为 30 分钟。

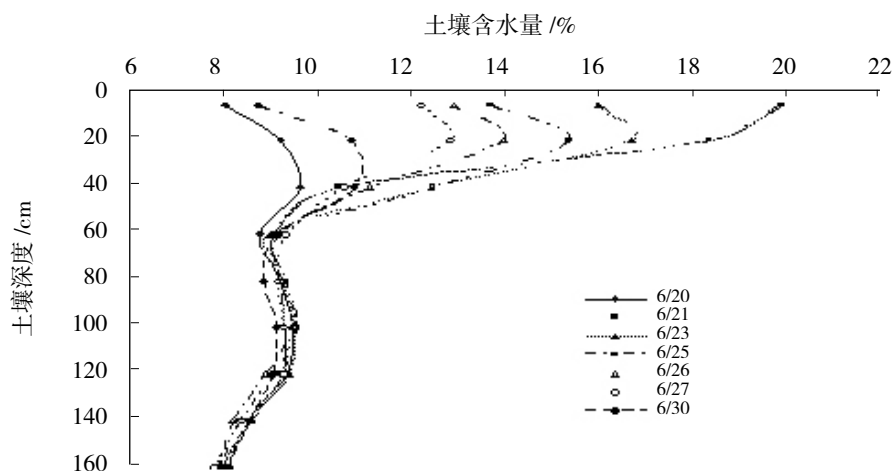


图 3 上黄生态站降雨后人工林地剖面土壤水分分布 (2002 年 6 月 20—30 日)

Figure 3 Soil water distribution with time after rain event in the soil under the non-native *Caragana* shrubland in the Shanghuang Eco-experiment Station (20–30, June, 2002)

通过对降雨前林地剖面土壤含水量 $\theta(x, 0)$ 和降雨后 $\theta(x, t)$ 林地剖面土壤含水量变化情况进行分析, 即可确定次降雨入渗深度和入渗量 (mm)。土壤水分入渗量 (F_t , mm):

$$F_t = \int_0^l [\theta(x, t) - \theta(x, 0)] dx \quad (1)$$

上式中, 积分下限为地表面, 0 cm, 上限为 l cm, 入渗深度, 即地表距次降

雨前后林地剖面土壤水分分布曲线交点的距离。因为剖面土壤水分垂直变化比较复杂,可以采用入渗深度范围内降雨前后剖面土壤水分储量的差值来计算土壤水分入渗量。这样,根据当地天气预报和经验判断,如果我们预估某日有雨,那么预先测定剖面土壤水分,再测定雨后剖面土壤水分,根据前后两次测定的相同剖面土壤水分资料可确定土壤水分入渗深度和入渗量。例如 2002 年 6 月 20 日次降水入渗深度为 70 cm,土壤水分补给量为 32.24 mm。次降水入渗深度和土壤水分补给量随降水量的增加而增加。

最大累积入渗深度。从较大的时间尺度来看,降雨停止后,受重力、土壤基质吸力和土壤孔性的影响,进入土壤的水分部分被植物根系吸收利用,部分随时间的推移而发生变化,使得进入土壤介质的水分在土体内进行再分配和累积下渗,这种入渗过程称为累积入渗 (Cumulative infiltration)。累积入渗过程包括降雨过程中的入渗和雨间入渗,即再入渗 (Reinfiltration),可采用系列二线法确定。2002 年 6 月 20 日—30 日降雨前后剖面土壤水分动态见图 3。从图 3 可以看出,雨后,在土壤剖面的上部土层易形成“高含水土层 (High Water Content soil Layers, HWCSL)”,即该土层的土壤含水量既高于其上部相邻土层的土壤含水量,也高于下部相邻土层的土壤含水量。“高含水土层”内的土壤水分运动表现为两种相反方向的变化:一方面由于表土蒸发和其内根系吸水使该土层含水量逐步下降。与此同时,由于湿润锋上面土壤含水量和水势较高,而湿润锋下邻的较深土层土壤含水量和水势较低,水势差引起土壤水分的下移,使较深层次土壤含水量逐渐升高,入渗深度增加。随着时间推移,在较深土层又形成较高含水量的土层,“高含水土层”。依次类推,入渗过程继续进行,累积入渗深度继续增加。在天然状态下,几次间隔较短的大雨过后,土壤入渗深度逐渐增加,即降水后土壤水分最大入渗深度可能出现在几次较大连续降雨之后,特别是在气温较低、植物落叶以后这段时期。

通过对 2002—2007 年、2011—2016 年降雨资料及其相应的人工林地剖面土壤水分动态测定资料进行初步分析,发现 2003 年降雨量为 623.3 mm,接近有记录的最大降雨量 634.7 mm (1984 年),土壤水分最大入渗深度可能出现在丰水年 (2003 年) 过后的 2004 年。

2003 年 1 月到 2004 年 12 月, 逐日次降水量随时间的动态变化见图 4。从图 4 中可以看出, 他们分别为: 8 月 1 日降雨量为 55 mm, 25 日为 45.7 mm、26 日为 56.4 mm。此时月均温度已越过 7 月最高气温 (月均 20.6℃), 8 月份 (平均温度为 17.9℃) 气温逐渐降低。在 2003 年 4 月中旬柠条开始萌发时, 0 ~ 390 cm 土层储水量 (土壤水资源) 仅为 295.3 mm, 林地土壤非常, 土壤水分从 2003 年 8 月初开始, 试验地连续出现了降雨, 其中几次较大降雨量分干旱。6 月林地降雨补给量小于蒸散耗水量, 土壤水分出现亏缺。受前期气候和土壤干旱的影响, 8—9 月以后柠条提前落叶, 土壤蒸发和植物根系吸水急剧减少, 土体内湿润锋一直向下推移, 入渗深度不断增加 (见图 5)。根据 2003 年 11 月 1 日土壤剖面观测资料分析, 湿润锋已下移到 200 cm 测定位置, 代表深度 210 cm。这是 2003 年内的最后一次观测, 所以 2003 年的最大入渗深度确定为 210 cm。实际上, 11 月 1 日以后, 降雨量稀少, 且多为无效降雨。

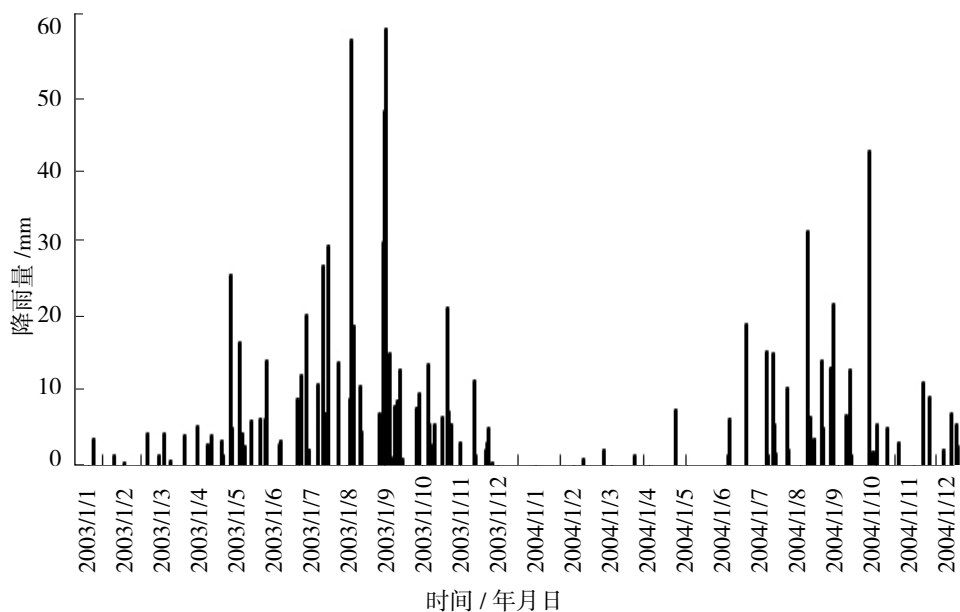


图 4 2003 年到 2004 年上黄生态站人工柠条林地降雨量逐日分布图

Figure 4 Daily rainfall Distribution Map of non-native caragana korshinskii Forestland in Shanghuang Ecological Station in the period from 2003 to 2004

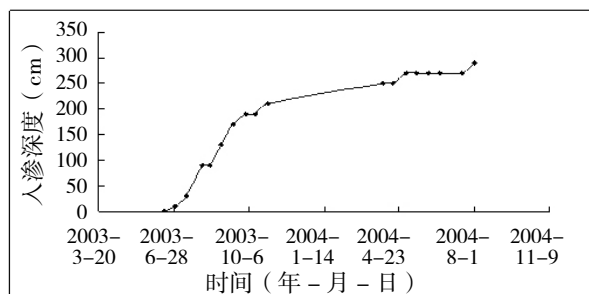


图 5 上黄生态站人工柠条林地累积入渗深度随时间变化

Figure 5 Change of cumulative infiltration depth with time in non-native caragana forestland in Shanghuang Ecological Station

气温和表层土壤温度较低，而较深土层土壤温度较高，湿润锋下移进程还在继续，累积入渗深度还在增加。通过对观测资料的分析，2004 年 4 月 1 日湿润锋已经下移到 250 cm；到 5 月 3 日，湿润锋又下移到 270 cm，湿润锋前沿的土壤平均容积含水量已降到 9% 以下。这种较高含水土层一直持续到 7 月 15 日后，虽然湿润锋土壤含水量低，接近萎蔫系数，湿润锋下移速度缓慢，但是经过一个半月后，湿润锋仍缓慢地下移，直到 2004 年 8 月 1 日，累积入渗深度已经达到 290 cm，最大降水入渗深度为 290 cm。这说明从一个较长的时间尺度来看，由于半干旱区降雨的季节分配不均，主要集中在 6—9 月，如果植物生长前期遇到干旱胁迫，植物较早落叶，而雨季来临较晚，降雨量较大，那么人工林地最大降水入渗深度不是出现在丰水年，而是出现在丰水年过后的第二年（2004 年）[1]。

根系是陆生植物的一个重要的吸收器官，它不但固定植物地上部分，为植物吸收养分和水分，而且通过呼吸和周转消耗光合产物并向土壤输入有机质。反映植物吸收利用土壤水分的一个重要指标是植物根系分布深度，根生物量和表面积。植物根系随深度发生变化，2 年生柠条幼林根系可以达到 200 cm，利用 260 cm 土层水分；16 年生人工柠条林地根系分布超过 500 cm，但是根系主要分布在 0 ~ 150 cm 土层，如图 6 表示。植物根系可以从土壤剖面吸收土壤水分，它不仅吸收利用根系分布范围内土层的土壤水分，而且还吸收利用较深土层根系影响深度范围的土壤水资源。因此当最大入渗深度范围内土壤含水量下降到萎蔫系数时，植物还可以从较深土层吸收水分，维持植物生长的最低需要。

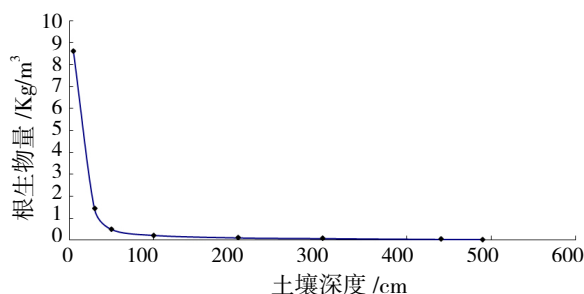


图 6 上黄生态站人工柠条林地根系随土壤深度变化

Figure 6 Change of root distributed depth with time in non-native caragana forestland in Shanghuang Ecological Station

通过对降水最大入渗深度, 最大入渗深度范围内土壤水分动态变化和土壤水资源可持续管理的目标的综合分析, 提出了土壤水资源利用限度概念[1][4]。土壤水资源利用限度是在一个人工林草地土壤剖面内, 当地表面以下至最大降水入渗深度范围内, 所有土层的土壤含水量等于萎蔫系数时, 最大入渗深度范围内土壤残留储水量之和, 即土壤水资源利用限度。例如在黄土丘陵半干旱区黑刺荆中上部多年生人工柠条林地雨水最大入渗深度为 290 cm。土壤水资源利用限度为在 0 ~ 290 cm 土层范围内, 萎蔫系数为 7.7%, 土壤水分储量为 223.3 mm。人工柠条林地最大入渗深度范围土壤储水量等于土壤水资源利用限度时, 最大入渗深度范围的土壤水分下行运动停止, 在土水势作用下, 土壤剖面最大入渗深度范围内湿润锋面以下的土壤水分可能上移, 虽然优良植物可以吸收利用最大入渗深度以下土层的土壤水分, 但是由于植物根系主要分布在 0 ~ 150 cm 的土层, 在植物吸收利用土层范围, 最大入渗深度以下土层根系分布较少, 此时植物吸收的土壤水分速率较低, 吸收的水分只能满足指示植物柠条变黄, 提前落叶和停止生长过程中对水分的需要, 苜蓿出现萎蔫和停止生长。由于土壤水分穿过该锋面的下行运动难以进行, 最大入渗深度以下出现的土壤干层成为永久干层, 难以恢复。此时最大入渗深度范围内根层土壤水分状况严重影响指示植物生长, 特别是高生长。因此在水资源紧缺地区植被恢复过程中, 土壤水分管理应尽量避免此类事情的发生。

4 土壤水资源利用限度是指示植物和立地条件的函数

4.1 土壤水资源利用限度是指示植物的函数

在相同的地理位置和立地条件下，可能种植不同的指示植物，不同的指示植物形成不同的植物群落或植被类型。指示植物的不同是影响土壤水资源利用限度的主要因素。一方面，不同指示植物所形成的植物群落其树冠结构，地上部分生物量、叶面积指数等不相同，根系分布深度、根密度，根系吸水、水分利用效率和生物量都有很大的差异。另一方面，不同的指示植物对土壤水分反应的敏感性不同，植物萎蔫时的土水势可能不同；不同指示植物形成的植物群落影响土壤水分补给或消耗的能力也不同，因此，不同指示植物所形成植被类型对土壤水分要求不同，林地土壤水资源利用限度程度不同，例如黑刺桤东面中部人工柠条林地（表 2）和台地紫花苜蓿地（表 3）。根据 2018 年对梯田红梅杏成林地研究，最大入渗深度为 290 cm，土壤水资源利用限度为 212.7 mm。

表 2 上黄生态站黑刺桤东面中部坡地人工柠条林地土壤水资源利用限度

Table 2 Soil water resources use limit by plants at the middle part of Heici

Mountain in the non-native caragana forestland in Shanghuang Ecological Station

土壤深度 (cm)	代表土层 (cm)	饱和含水量 (%)	萎蔫系数 (%)	代表土层储水量 (mm)
5	0-10	10.34	58.09	10.34
20	10-30	9.01	56.42	18.02
40	30-60	8.04	52.04	24.12
80	60-100	7.33	46.98	29.32
120	100-140	7.34	44.12	29.36
160	140-180	7.07	42.88	28.28
200	180-220	7.42	47.1	29.68
240	220-280	7.61	46.5	45.66
320	280-290	8.05	52.26	8.05
合计	0-290			222.8

表 3 上黄生态站人工紫花苜蓿草地土壤水资源利用限度

Table 3 Soil water resources use limit by plants at the middle part of Heici Mountain in the non-native alfalfa grass land in Shanghuang Ecological Station

土壤深度 (cm)	代表土层 (cm)	饱和含水量 (%)	萎蔫系数 (%)	土层储水量 (mm)
0	0-10	7.06714	37.7473	7.06714
20	10-30	6.995856	36.9589	13.99171
40	30-60	7.152202	36.0308	21.45661
80	60-100	7.548363	35.997	30.19345
120	100-150	7.873807	36.1743	39.36904
180	150-210	8.356747	41.005	50.14048
240	210-270	7.598339	39.357	45.59004
300	270-290	6.339579	40.0053	12.67916
合计	0-290			220.5

4.2 土壤水资源利用限度是立地条件的函数

不同地形地貌地区的降雨、光能和温度不同,立地条件不同,适宜生长的指示植物不同,这些都影响土壤水资源利用限度;相同地区的坡度、坡位、坡向等,也会通过影响降雨、光能和温度再分配等,进而影响土壤水分入渗、土壤水分蒸发过程及总量,最终影响土壤水资源利用限度,例如黑刺荆西面坡地人工柠条林(表4)和台地紫花苜蓿地。

表 4 上黄生态站黑刺荆顶人工柠条林地土壤水资源利用限度

Table 4 Soil water resources use limit by plants at the top part of Heici Mountain in the non-native caragana forestland in Shanghuang Ecological Station

土壤深度 (cm)	代表土层 (cm)	饱和含水量 (%)	萎蔫系数 (%)	代表土层储水量 (mm)
5	0-10	10.32	50.64	10.32
20	10-30	9.79	53.19	19.58
40	30-60	8.88	54.16	26.64
80	60-100	8.13	52.38	32.52
120	100-140	8.08	54.09	32.32
160	140-180	7.67	52.47	30.68
200	180-220	8.74	54.6	34.96
240	220-260	9.54	56.38	38.16
320	260-290	9.22	54.88	27.66
SWRLP				252.84

5 土壤水资源利用限度在实践中的应用

5.1 土壤水资源利用限度是判断植物是否过度利用土壤水资源的一个重要标准

植物是否过度利用土壤水资源应该有一个明确的、客观的标准进行判断。传统地以萎蔫系数或土壤水分亏缺指数等来表示植物是否过度利用土壤水是不够的，因为它没有考虑降水入渗深度、根系分布和土壤水资源管理要求。土壤水资源利用限度是判断植物是否过度利用土壤水资源的一个重要指标。在多年撂荒地，不论是丰水年还是偏早年，土壤水分状况较好，土壤水资源处于较高状态。如果不利用土壤水资源，不仅会造成土壤水资源浪费，而且加剧水土流失，因此必须利用土壤水资源。土壤水分只能被植物根系吸收利用，而撂荒地植被稀疏，盖度低，因此需要种植人工植被恢复。

5.2 土壤水资源利用限度是确定植物水关系调控起始期的依据

调控植物生长和土壤水分关系的一个重要概念就是植物水关系（植物生长与土壤水分关系）调控起始期。在水资源紧缺地区，土壤旱化是一种自然现象，在该区的人工林草植被种植和恢复过程中，林草地经常发生不同程度的土壤旱化。我们不能一发生土壤旱化就调控植物生长和土壤水分的关系，而是要视情况而定。随着植物生长，植物利用土壤水资源程度逐渐增强，土壤水资源存储水平下降，当土壤水资源下降到土壤水资源利用限度时，才进行调控。

5.3 土壤水资源利用限度是水资源紧缺地区优良树草种选择依据

2008年，作者在宁夏回族自治区南部黄土丘陵半干旱地区上黄生态站引进5个品种的高钙树种桤叶唐棣，进行试验。根据对上黄生态站引种8年的桤叶唐棣试验观察，在不采取任何抗旱和抗寒措施情况下，桤叶唐棣生长表现良好，能可持续利用土壤水资源，抗旱、抗寒和病虫害能力强，无性繁殖力强，经济

效益高, 适宜于宁夏南部黄土丘陵半干旱大面积推广。因此在新造林地, 树草种的选择非常重要, 对于不出现严重土壤旱化和土壤退化的林草地, 不需要进行植物生长和土壤水分关系调控; 当林草地土壤水资源下降到土壤水资源限度时, 土壤水分严重影响人工林生长。此时就需要依据土壤水分植被承载力, 采取有效措施, 如采用平茬或疏伐, 进行植物水关系的调控。

6 小结

土壤水资源利用限度理论是近年来形成的新理论, 是水资源紧缺地区控制植物利用土壤水资源, 防治林草地出现严重土壤旱化, 引起土壤退化, 植被衰退, 果品和农作物绝收的一个重要理论和指标。由于新造林草地土壤水资源丰富, 因此在植被恢复过程中, 可以采用高密度种植以便迅速地形成高盖度的林草植被, 满足保持水土、防治沙尘暴和减少雾霾天气, 改善生态环境的需要或高产高效需要。但是当土壤水资源下降到土壤水资源利用限度时, 应该及时采取措施, 如果有水源, 应进行节水灌溉, 或依据土壤水分植被承载力, 经济林定植后, 一般不用密度调控, 因此应用适宜枝叶量表示, 采用修剪进行植物水关系调控, 这样在人工植被恢复过程中不仅可以获得部分薪柴或饲料等, 而且可以促进保留木生长。

由于水资源紧缺地区面积较大, 立地条件和植被类型多样, 不同植物对土壤水分反应不同, 因此目前该方面依据不足, 不能满足水资源紧缺地区土壤水资源可持续利用, 森林草地可持续管理, 果品和农业可持续生产的需要, 急需加强这方面研究, 为国家生态安全体系, 美丽中国建设, 实施乡村振兴战略和可持续发展服务。

基金项目

本研究得到国家重点研发计划(2016YFC0501702)和国家自然科学基金(41271539和41071193)的资助。

参考文献

- [1] 郭忠升. 土壤水分植被承载力的理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 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.
- [3] 郭忠升, 邵明安. 半干旱区人工林地土壤入渗过程分析 [J]. 土壤学报, 2009, 46 (5): 953–958.
- [4] 郭忠升, 邵明安, 张一平, 等. 林地土壤剖面水分垂直变化层次划分方法的研究 [M] // 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, 2002: 74–79.
- [5] 郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度. 应用生态学报 [J]. 2010, 21 (12): 3029–3035.
- [6] Palmer W C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: the new crop moisture index [J]. Weatherwise, 1968, 21: 156–61.
<https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>
- [7] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts [J]. J. Hydro. , 2010, 391: 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- [8] Shi J, Li S, Zuo Q, et al. An index for plant water deficit based on root-weighted soil water content [J]. J. Hydrol. , 2015, 522: 285 – 294.
- [9] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C] // Eighth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993: 179–184.
- [10] Martínez-Fernández J, González-Zamor A, Sánchez N, et al. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator [J]. J. Hydrol. , 2015, 522: 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.051>
- [11] Lvovich M I. Soil trend in hydrology [J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1980 (25): 33–45.

-
- [12] Budagovski A I. Soil water resources and water supplies of plant cover, Vodnye [J] . Resursy, 1985 (4) : 3–13.
- [13] Veihmeyer F J. The availability of soil moisture to plants: Results of empirical experiments with fruit trees [J] . Soil Sci. , 1972, 114: 268–94.
<https://doi.org/10.1097/00010694-197210000-00006>
- [14] Richards L A, Wadleigh C H. Soil water and plant growth, Soil physical conditions and plant growth [M] . New York: Academic Press, Inc. , 1952.