

半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力

郭忠升¹, 邵明安^{2,1}

(1. 中国科学院 水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室、西北农业大学, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:近年来在黄土高原地区多年生林草地,出现了以土壤旱化为主要特征的土壤退化现象。退化土壤反过来影响植物的生长和发育,最终将导致植物群落衰败和生态系统的退化,从而影响到林草植被的长期稳定,经济效益和生态效益的持续稳定发挥,这已成为当前林草植被建设的重大问题之一。分析了土壤旱化现象与土壤干层的关系,探讨了土壤干层的划分标准。认为防止土壤旱化的主要措施就是控制林草地密度和生产力,而控制林草地密度和生产力的理论依据就是土地植被承载力。在黄土高原大部分地区植物吸收和利用的土壤水分主要依靠当地的天然降水,土壤水分是限制植物生长的决定因子,该类地区土地植被承载力实质上为土壤水分的植被承载力。作者定义土壤水分植被承载力为土壤水分承载植物的最大负荷。它是指在较长时期内,在现有的条件下,当植物根系可吸收和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,所能维持特定植物群落健康生长的最大密度。探讨了土壤水分植被承载力的确定方法和影响因素,认为凡是影响林草地土壤水分的补给和消耗,植物群落生长发育和植物水分利用效率的因素,包括地理位置、地形、气候、植被类型及其发育阶段,抚育管理措施都影响土壤水分植被承载力数值。开展土壤水分植被承载力研究对于林草地合理经营与管理具有重要意义。

关键词:黄土高原; 林草地; 土壤旱化; 土壤干层; 防治措施; 土壤水分植被承载力

Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau

GUO Zhong-Sheng¹, SHAO Ming-An² (1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Shaanxi Yangling 712100, China; 2. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1640~1647.

Abstract: Recently, soil deterioration appeared on the Loess Plateau in the form of excessive soil drying

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

收稿日期: 2002-08-29; **修订日期:** 2003-03-25

作者简介: 郭忠升(1963~), 男, 陕西省富平县人, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态和经营研究, 黄土高原土壤水分植被承载力研究。E-mail: zhongshenguo@sohu.com

Foundation item: the major state basic research development projects of China (No. G2000018605), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-411), and the NSFC Project (No. 30230290)

Received date: 2002-08-29; **Accepted date:** 2003-03-25

Biography: GUO Zhong-Sheng, Ph. D., Associate professor, majored in forest ecology and management. E-mail: Zhongshenguo@sohu.com

under perennial grasses and forests. Excessively dry soil influences the growth and development, stabilization, economic and ecological benefits of plant communities, which is one of the most important problems of vegetation rehabilitation. In this paper, the authors analyzed the relationship between soil desiccation and drying of the root zone soil layer, developed an approach to determine the limit of root zone drying, and considered that the main measure to control soil desiccation is to control the density and productivity of a vegetation community which is related to the theory of the land's carrying capacity of vegetation. Plant water uptake and utilization mainly depends on soil water, and the soil water is related to the precipitation. Soil water is the most important factor influencing plant growth and development in most of the Loess Plateau. The land's carrying capacity of vegetation in this region is mostly affected by soil water. The term soil water carrying capacity of vegetation was developed and defined as the ability of soil water to carry vegetation. The limit is the largest density of the vegetation community when soil water consumption is equal to or lower than soil water supply in the root zone soil layers from which plant roots can take and utilize water on an annual basis under modern management conditions. The authors provide preliminary discussion of the method and the factors influencing soil water carrying capacity of vegetation, and considered that all of the factors which influence the soil water consumption and soil water supply, plant community growth and development and the water utilization coefficient of plant including geography, topography, climate, vegetation type and plant development stage, will influence the level of soil water carrying capacity of vegetation. It is important to conduct further research on soil water carrying capacity of vegetation for forest and grassland management.

Key words: the Loess Plateau; artificial forestry and grass land; soil desiccation; dried soil layer; controlling measures; the soil water carrying capacity of vegetation

文章编号:1000-0933(2003)08-1640-08 中图分类号:Q948.1 文献标识码:A

黄土高原地区植被稀少,干旱缺水,土壤沙化和水土流失严重。为了改善该区生态环境,我国在黄土高原开展了大面积的植树种草工作,取得了重大进展。从 1949~1989 年,全区造林保存面积(含灌木林)约 150 万 hm^2 ,人工草地保存面积约 50 万 hm^2 ,森林覆盖率由 2.0% 提高到 7.8%^[1]。由于在以往的林草植被建设中存在着“三重三轻”现象,即树种选择中重视乔木、轻视灌木;经营目标确定中重视用材林和经济林等商品林,轻视水土保持林和防风固沙林等公益林以及植被建设过程中重视前期的造林而轻视后期的抚育管理,以致在多年生速生、高产和高水分利用效率的人工林草地出现了以土壤旱化为主要特征的地力衰退和土壤退化^[2~5]。在半干旱地区的陕西吴旗县,飞播沙棘(*Hippophae rhamnoides*)林 3~4a 后生长加快,4~5a 根蘖繁殖,8a 后密度达到最大值(28500 株/ hm^2),对水、肥、光的竞争加剧,出现被压木^[6]。在宁夏固原地区,沙打旺播后第 2 年出现土壤旱化,到 5~6a,1~3m 土层土壤含水量接近凋萎湿度。在半湿润的陕西省武功地区,苜蓿生长 1a 后,2.1m 以下土层开始出现土壤旱化现象。在黄土高原多年生人工林草地土壤旱化现象分布相当广泛^[3~7]。退化土壤反过来影响植物的生长和发育,最终将导致植物个体死亡,群落衰败和生态系统的退化,从而威胁到保留林草植被的长期稳定,经济效益和生态效益的持续稳定发挥,这与可持续发展这一基本国策不相适应。目前多年生人工林草地土壤旱化和地力衰退已成为林草植被建设的重大科学问题之一。在植被建设成为西部大开发中心任务之一的今天,研究林草地土壤旱化及其防治措施,探讨土地植被承载力,对于促进西部生态环境和植被建设具有重要的现实意义。

1 土壤旱化与土壤干层

自从 20 世纪 60 年代在陕西和甘肃干旱区一半湿润区的人工草地和林区相继发现林草地土壤存在下伏干燥化土层,简称干层以来^[3],土壤旱化及其危害已引起了人们的普遍关注。2002 年 4 月以来,采用土钻取样烘干和土壤水分数据,对位于中国科学院、水利部水土保持研究所固原生态试验站 16 年生柠条灌木林地土壤水环境进行了调查和定位研究。该站位于黄土高原半干旱区,地理位置为东经 106°30',北纬 36°02',

地貌为黄土丘陵,坡度为 10~25°,海拔高度约 1534~1824m。年总辐射 5342MJ/m²,年均气温 7.0℃,多年平均降雨量为 472mm。降水的年内分配不均,6~9 月份降水量占总降水的 60%以上,降水的年际变化较大。无霜期 152d,土壤为黄绵土,植被属森林草原带。实验柠条林地处于试验站内的黑刺岭东坡(半阴坡)中部,坡度为 10~15°。研究的对象为抗旱性和适应性强,在黄土高原干旱和半干旱区分布广泛且具代表性的柠条(*Caragana Microphylla*)人工林。柠条林高为 1.0~1.5m,初植密度为 10000 丛/hm²,保存密度为 9000 丛/hm²,柠条林冠层盖度为 0.95~1.0。柠条林 10m 土层和柠条灌丛四周(东 0.5m 和东 1.0m 分别表示样丛东向距样株 0.5m 和 1.0m 土壤含水量,依次类推)4 个方向,不同距离土壤水分随深度变化进行了测定(图 1 和图 2)。

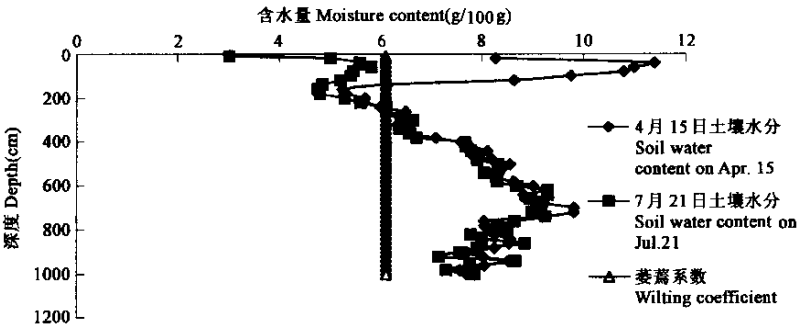


图 1 多年生柠条林地土壤水分随深度变化

Fig. 1 The changes of soil water with depth in 16-year caragana fore land

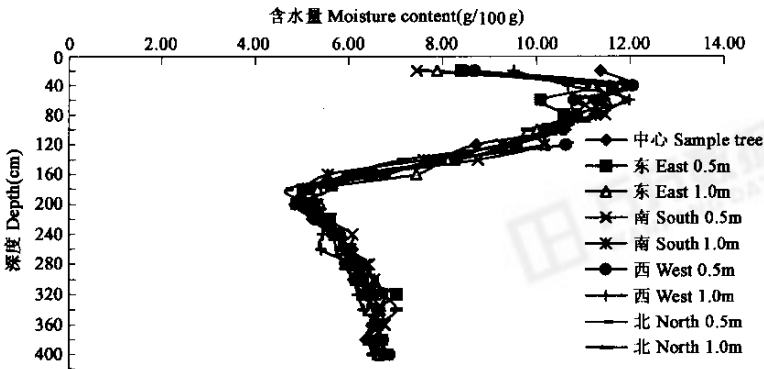


图 2 样株不同方向和距离土壤水分随深度变化

Fig. 2 The changes of soil water with depth in four direction and different distances

植物生长在土壤中,依靠根系吸收和利用其根系(垂直和水平)分布范围内或根系附近土层或土体的水分,分布均匀的植物个体利用群落平均空间的土壤水分。在多年生柠条密林地,由于植物根系在土壤剖面分布不均和植物强烈吸水和蒸腾,造成根系分布范围内某层土壤水分的过量消耗。如果在一定时期内,植物根系分布范围内土壤水分供应不足以满足植物吸水和土壤蒸发的需要,则在单位土体内出现土壤水分消耗量大于补给量,土壤储水收支出现负平衡,导致土壤储水量下降,使植物生长的土壤水环境呈现旱化趋势。连年土壤旱化的累积作用,最终将形成土壤干层。因此土壤旱化的实质是土壤水分出现负平衡,这是形成土壤干层的物质基础。土壤旱化作用的常年积累作用最终形成土壤干层。从野外实测资料(如图 1 和图 2 所示)万万数据由于土壤旱化,在多年生林草地根系分布范围内出现了土壤水分等于和低于萎蔫系数的干土层。

多年生林草地土壤干层一般分布在根系分布范围内的土体内。关土壤干层划分标准,杨文治认为,土壤干层划分的湿度范围为下限值小于或等于凋萎湿度,上限为土壤稳定湿度或毛管断裂湿度,土壤干层具有位于土体的一定深度范围内,相对持久性和具有一定湿度范围的特征^[2]。李玉山认为,土壤干层位于降水渗透以下,因植物强烈蒸散导致土壤水分出现负平衡,土壤湿度处在萎蔫系数至 75%田间持水量之间^[3]。在根系分布范围内土壤水分受植物生长和大气的相互作用,一年内土壤水分处在消耗-积累-消退-稳定的循环变化之中,土壤水分一般都会出现低含水期(旱季)和高含水期(雨季)。土壤干层属于低湿土层,但不等同于一般的低含水土层,而是一类特殊的土壤“低湿层”。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。如果将土壤干层作为一种土壤退化和灾害,那么作为划分土壤干层的标准,应该以萎蔫系数作为划分标准。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,在林草植被经营管理中,都应引起人们足够的重视。据此将根层土壤水分等于或低于萎蔫系数且在雨季不能恢复的土层称为土壤干层。在 16 年生柠条林地 1.4~2.4m 土层范围内形成土壤干层(土壤重量含水量低于萎蔫系数 6.1%^[2]),在柠条丛周围不同方向和相同方向的不同部位,土壤干层出现的层次几乎相同。除表土层外,植株周围相同深度不同部位土壤水分差异较小。在黄土高原 400~600mm 降水区,每年降水的最大入渗深度为 1~3m,半湿润地区大丰水年份可达 5m^[3],而半干旱地区为 100~150cm,补给土壤水分的土层较浅,而植物根系吸收和利用土壤水分的土层较深。因此在天然降雨最大渗透以下的根带土层一旦出现土壤干层,则难以恢复。

2 土壤旱化的防治措施

影响多年生林草地出现土壤旱化并最终形成土壤干层的因素较多,其中主要原因是:①土壤水分供应不足,即在植物生长发育进入生长旺盛阶段,植物根系分布范围内土层的土壤水分供应不能满足植物群落生长需要,致使该土层土壤水分的收支出现负平衡;②植物群落过量蒸腾耗水造成根系分布范围内出现土壤干层,③大气干旱持续期间,大气愈旱且持续的时间愈长,土壤水分负平衡持续时间愈长,旱化现象愈严重,形成的土壤干层愈厚。因此防治土壤旱化,必须针对形成土壤干层的两个重要方面:土壤水分供应不足和植物群落过量蒸腾耗水,要么以需定水,即采用灌溉补充土壤水分以满足植物生长发育的生态需水量;要么以水定需,按照现有的土壤水分条件,控制植物群落密度和生产力,减少土壤耗水量以达到控制土壤旱化,防止土壤干层危害之目的。

2.1 以需定水消除土壤干层

多年生人工林草地出现土壤旱化的主要原因之一为土壤水分匮乏,即供给植物生长的土壤水分不能满足林草植被大量蒸发散的生态需水量。2002 年 4 月在柠条实验林地进行了 200h 连续滴灌实验,5 月份又进行了深灌(根据当地气候和土壤特点,改进喷灌设备而设计的一种自压灌溉方式)实验,并用中子水分仪对实验效果进行了连续观测,发现采用点状滴灌法和深灌法都可以消除或最终消除土壤干层,但消除的快慢和范围不同。深灌法可以迅速消除柠条灌丛周围土壤干层,同时几乎未增加表层土壤水分,而采用滴灌法在短时期内仅能消除表层土壤干层,欲消除 1.4~2.4m 土壤干层需要较长时间(见图 3),滴灌和深灌详细实验结果见专文报道。

由于发生土壤旱化的林草地多大多以改善生态环境为主要营造目的,经济收益较低,且分布在水源奇的沟沿线以上地段,采用灌溉补充土壤水分成本较高。因此,灌溉法只能适用于经济效益可观的经济林(事实上为了追求较高的经济收益,灌溉林草地一般不易出现土壤干层)或像甘肃省兰州市白塔山上的特用林草地。在西部大开发中,一方面,大面积生态环境治理要靠林草植被建设来完成,林草植被面积较大;另一方面,我国水资源缺乏,人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4,而西北地区水资源缺乏现象更加突出。因此对这些以发挥生态效益为主的林草地,采用灌溉法补充土壤水分,以防治土壤旱化为主要特征的土壤退化现象成本较大,难以大面积推广。

2.2 以水定需、调整群落密度、控制林草地生产力

由于林草地建设过程中出现了植被类型选择不当,密度过大和群落生产力过高等问题,这些问题直接导致了人工林地和草地土壤旱化^[4],因此防止土壤旱化的另一个重要方面就是按照土壤水分状况,调整植物

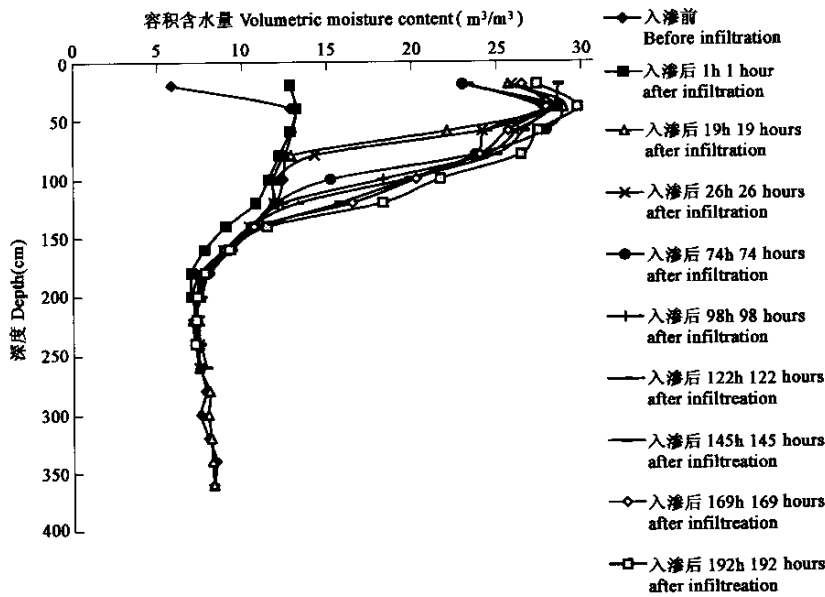


图 3 样株不同入渗时间土壤水分的剖面变化

Fig. 3 The changes of soil water with time on the soil water profile at the sample tree after infiltration

群落密度,控制群落的生产力,即将林草植被生长和发育程度控制在土地承载植被的最大负荷以内,使土壤水分生态环境得到维持或改善。控制植物群落密度和生产力的前提和依据就是确定适宜的土地植被承载力。

生产力(Productivity)是指单位面积和单位时间(通常为 1a)所生产有机物的量,单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。虽然森林植被生态系统的生产力取决于地形因子,气候因子(光、温度、降水),土壤因子(土壤水分、土壤温度、土壤养分等),生物因子等因素的相互作用,但是在不同地区,这些因素对生产力相对重要性的次序与李比希的最低定律(Law of the minimum)相一致,处于最低量水平的因素往往会支配整个系统。

黄土高原大部分地区的土壤土层较厚,土层厚度一般大于毛管提水高度和根系分布深度之和,地下水位多在地表以下 60~100m^[3],埋藏较深。天然降水是土壤水分的唯一补给形式。因此土壤水分不仅是限制植物生长发育的重要生态因子,而且是限制因子,该类地区植物群落的生长发育及其适宜生产力实际上由土壤资源中的土壤水分供给状况来决定,该类地区的土地植被承载力实质上是土壤水分植被承载力。

3 土壤水分植被承载力

3.1 承载力与土壤水分植被承载力

承载力(Carrying capacity)属于物理学的范畴,它是用以控制或限制发展的一个常用概念,是可持续发展的核心问题。最早进行承载力研究的是群落生态学,它是指在一定环境条件下,单位面积某种生物个体存在数量的最大值,即著名的逻辑斯谛方程的 K 值^[8]。1933 年,Reineke 用平均直径树木个数(密度)的预报因子^[9],基于不同树种组成的密林的平均直径和密度资料提出了一个简单的密度关系式,关系式中的系数 a 即为生境承载力(Carrying capacity of the site)^[10]。森林生产力通常用生境指数(site index)表示,Assman^[11]和 Bradley 等^[12]研究证明潜在木材产量甚至在一个固定的生境指数内也发生变化,为了弥补立地指数的不足,第二个森林生产力指数是需要的,这个指数被称作产量水平^[13]、产量等级^[12]或增量水平^[14],它们都描述了一个固定生境指数内潜在密度的变化,也可理解为在供养树木生长的相同生境指数内,不同的生境具有不同的承载力^[15]。Assman 提出用最大胸高断面面积表示潜在密度指数^[13]。Sterba 建议用 Reineke 胸高断面面积指数来表示不受林龄和立地指数影响的潜在密度变化^[16]。森林的最大叶量承载力也有研究^[10]。当密度接近土地承载力时,林木胸高断面面积停止增加^[17]。近年来,在我国北方少雨地区

多年生人工林草地出现土壤旱化为主要特征的大面积土壤退化问题。为了实现可持续发展战略,土地植被承载力问题引起了人们普遍关注,本文根据西部生态环境和植被建设的需要提出了土壤水分植被承载力(soil water carrying capacity of vegetation)概念。

在以天然降水为土壤水分唯一补给源的地区,土壤供水状况不仅受降水量、雨强和降雨间隔期的影响,而且受土壤入渗能力、持水能力等物理特性的影响。植物生长所需水分主要通过根系从土壤吸收和补充。植物生长发育不仅受生长发育阶段、密度、立地条件(地形、太阳辐射、土壤供水状况等)的影响,而且受植物自身的蓄水“库容”和含水量的影响。由于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(即使某层土壤含水率接近萎蔫系数)能引起植物个体生长发育不良和生产力的下降,但一般不会使植物枯死,特别是木本植物,这是因为木本植物的结构能保证在干燥以后仍能保持其原有的形态。植物常常通过降低叶含水率、落叶等调节自身的蒸腾量和生长量来适应干旱土壤和气候条件。只有当植物个体生长发育在较长时间(1a 以上)受到土壤供水严重不足的影响时,才导致植物个体死亡和群落个体数量的下降。另外黄土高原干旱、半干旱和半湿润地区,降水的年际变化较大,在干旱年份,土壤水分一般收入小于支出;丰水年份,土壤水分收入大于支出,富余的水分储存在土壤水库中以供植物来年利用。土壤水分植被承载力(土壤水分承载植物的最大负荷)是指在较长时期(1~多年)内,在现有的条件下,当植物根系可吸收和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,所能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,单位为株/hm²。一年内土壤水分植被承载力称为临时土壤水分植被承载力,多年平均土壤水分植被承载力称为稳定土壤水分植被承载力,同一地区(或区域)不同立地条件下土壤水分植被承载力的集合构成了该地区(或区域)土壤水分植被承载力。对于黄土高原干旱、半干旱、半湿润地区,降水的年际变化较大,因此研究多年(30~50a)的土壤水分植被承载力并掌握土壤水分植被承载力的年际变化规律对于林草地的经营管理具有重要价值。

3.2 影响土壤水分植被承载力的因素

植物群落生物量 and 生产力是由单株个体重量或生长速率的累积而成。个体重与植被类型、立地条件、植物的生长发育阶段和密度关系密切。当立地条件、植被类型和植物的生长发育阶段一定时,单株个体重量与密度密切相关。当密度和植物个体较小时,由于平均空间的光热和水资源能够满足植物生长发育的需要,不易产生植物个体对光、水等自然资源的竞争,此时密度变化对单株生物量的影响较小;当密度超过一定范围(承载力)时,密度越大,造成不同植物个体之间为争夺生存空间的光、热和水等资源而产生剧烈竞争,使植物的个体生长发育产生严重分化,形成大小不一的植物个体。在植物群落中,生长健壮的植物个体一般称为优势木,其生物量也大,这就为该植物个体进一步生长发育创造了条件;而生长较差的植物个体生物量较小,对光、水等资源的竞争处于劣势。在自然稀疏时,愈容易产生个体死亡现象。在立地条件和植被类型一致时,当植物群落生长发育到一定阶段,单位面积的生物量 and 生产力与密度密切相关^[6,10,18~20]。

植物群落的生长和发育与其所处的生态环境条件相互作用。在一定立地条件下,土壤水分条件越好,植物群落密度愈大,植物个体生物量越大,单位面积生产力愈高,耗水量越多;另一方面,在植物生长发育过程中,植物通过冠层拦截降水,冠层影响近地表微气候和植物根系吸水等方式影响土壤水分补给和消耗^[21~27],植物群落生产力与密度和土壤耗水密切相关。土壤水分补给量是决定土壤水分植被承载力大小的物质基础,在相同的立地条件下,土壤水分补给量越大,愈有利于承载较多的植物。因此在确定土壤水分植被承载力时,首先应研究土壤水分补给量。土壤水分的补给量和消耗量与植物植物群落的生长发育阶段,群落密度,地形部位和土壤种类密切相关。另外还应确定土壤水分消耗量与植物生长之间的定量关系,研究土壤水分利用效率,因为不同植被类型或相同植被类型的不同生长发育阶段,其水分利用效率是不同的。如果在相同的立地条件、降水、植被类型和相同的植物年龄条件下,获得了植物群落密度和耗水量的定量关系,那末,当土壤水分消耗量等于补给量时植物群落密度,即为该条件下土壤水分植被承载力。

从理论上来看,凡是影响林草地土壤水分的补给和消耗,植物生长发育和植物水分利用效率的因素,

包括地理位置,地形因素,气候条件,降水分布、降雨量及其强度,植被类型及其发育阶段,抚育管理措施等都会影响土壤水分植被承载力的数值大小。

4 结语

植被建设是生态环境建设的主要内容之一。由于在以往的植被建设中出现了植被类型选择不当,密度过大和群落生产力过高等问题,在多年生林草地出现了土壤旱化现象,并形成土壤干层,导致地力的衰退,土壤旱化成为当前林草植被建设的隐患之一。土壤水分植被承载力属应用基础研究,其研究结果成为防治土壤旱化和林草地合理经营的理论基础。本文从分析土壤旱化和土壤干层的关系入手,提出了防止和解决土壤旱化的具体措施。提出和定义了土壤水分植被承载力,并探讨了影响土壤水分植被承载力数值大小的因素。

目前,可持续发展日益成为资源环境管理和发展的目标,而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所接受并应用到有关方面。土壤水分植被承载力是在为解决以土壤旱化为主要特征的土壤退化现象的客观形势下应运而生的。虽然土壤水分植被承载力新近形成,目前还没有一个完整的理论体系,但是土壤水分植被承载力的研究,特别是以天然降水为土壤水分唯一补给地区(该区郁闭林草地蒸散需水量一般大于天然降水量)土壤水分植被承载力的研究,对于促进西部地区生态环境建设和林草植被的经营和管理具有重要价值。确定土壤水分植被承载力的基础是全面深入的研究不同地区和气候条件下的植物群落生长与土壤水分的相互关系,特别是天然降水、土壤水分和植物群落生长发育的关系。目前生态学已由经典生态学发展成为一门基础性强、研究范围广、学科间渗透面广、应用范围宽的非常活跃的前沿科学,这为广泛深入地开展土壤水分与植物生长相互关系研究奠定了基础。

References:

[1] Wu Q X, Yang W Z, eds. *Vegetation construction and Sustainable development on the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1998. 1~15.

[2] Yang W Z, Shao M A, eds. *Study of soil water on the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2000. 30~114.

[3] Li Y S. Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *J. natural resources*, 2001, **16**(5): 427~432.

[4] Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern regions of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, **32**(1): 78~84.

[5] Hou Q C, Han R L, Han S F. Preliminary research on the problem of soil drying in artificial forest and grass land in the loess plateau. *Chinese J. of soil and water conservation*, 1999, **5**: 48~52.

[6] Li D Q, Cong X H, Liang Y M. Research on net preliminary product and water consuming amount of seabuchthorn shrubbery in semi-arid region. *Bulletin of soil and water conservation*, 1990, **10**(6): 91~97.

[7] Wang L, Shao M A, Hou Q C. Status of Dried soil layer in the Yan'an experimental area. *Bulletin of soil and water conservation*, 2000, **20**(3): 35~37.

[8] Qu Z X, Wu Y S, Wang H J, et al. *Plant Ecology* (second edition). Beijing: Higher Education press, 1986. 152~154.

[9] Zeide B. Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. *Forest Science*, 1987, **33**(2): 517~537.

[10] Blake J, Somers G, Ruark G. Estimating foliar biomass in conifer plantations from allometric relationships And self-thinning behavior. *Forest Science*, 1991, **37**(1): 296~307.

[11] Assmann E. Die Bedeutung des "erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes" für die konstruktion von Ertragstafeln. *Forstw. Centralblatt*, 1955, **74**: 321~330.

[12] Bradley R T, Christie J, and Johnson D R. *Forest management tables*. Booklet 16. Forestry Commission, London, 1966. 218.

[13] Assmann E. *The principles of forest yield studies*. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506.

[14] Lembeck E, and Dittmar O. DDR-Kiefern-Ertragstafeln. Inst. f. Forstwiss. Eberswalde, 1975. 82.

[15] Curtis R O. Yield tables-past and present. *J. Forest*, 1972, **70**: 28~32.

[16] Sterba H, Monserud R. The maximum density concept applied to uneven-aged mixed-species. *Forest Science*, 1993, **39**(3):432~452.

[17] Manion P D, Griffin D H. Large landscape scale analysis of tree death in the Adirondack park, New York. *Forest Science*, 2001, **47**(4): 542~549.

[18] Zhang D Y, Zhao S L. Studies on the Model of forest population density change during Self-thinning. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, **21**(4):369~374.

[19] Liou D L, Johnson I R, Lovett J V. An empirical model to describe yield\|density relationships. *Acta Ecologica Sinica*, 1990, **10**(3):195~202.

[20] Xue L, Hagihara Akio. Summary and evaluation of the researches on self-thinning pure stands. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(5):834~838.

[21] White J, Harper J L. Correlated changes in plant size and number in plant population. *J. Ecol.*, 1970, **58**:467~485.

[22] Gómez J A, Giráldez J V, Fereres E. Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **49**:65~76.

[23] Wallace J S, Jackson N A, Ong C K. Modeling soil evaporation in agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **94**:189~201.

[24] Jackson N A, Wallace J S. Modeling soil evaporation in agroforestry system in Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **94**:203~215.

[25] Gregory P J, Simmonds L P, Pibeam C J. Soil Type, Climatic Regime, and the Response of Water Use Efficiency to Crop Management. *Agronomy Journal*, 2000, **92**:814~820.

[26] Cramer P J. *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press, New York London Paris, San Diego and so on, 1995. 215~340

[27] Spur S H, Barnes B V. *Forest Ecology*, John Wiley and Sons, 1980. 252~276.

参考文献:

[1] 吴钦孝, 杨文治主编. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. 1~15.

[2] 杨文治, 邵明安编著. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000. 30~114.

[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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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, 2000, **20**(3):35~37.

[8] 曲仲湘, 吴玉树, 王焕校, 等. 植物生态学(第二版), 高等教育出版社, 1986. 152~154.

[18] 张大勇, 赵松玲. 森林自疏过程中密度变化规律研究. 林业科学, 1996, **21**(4):369~374.

[19] 刘德立, I R Johnson, J V Lovett. 一个描述多种产量-密度关系的经验模型. 生态学报, 1990, **10**(3):195~202.

[20] 薛立, 狄原秋男. 纯林自然稀疏研究综述. 生态学报, 2001, **21**(5): 834~838.