

茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 晋西黄土高原水资源植被承载力分析及对策建议[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 923-929.

RU Hao, ZHANG Jianjun, LI Yuting, et al. Analysis and countermeasures of the carrying capacity of water resources for vegetation on the Loess Plateau, western Shanxi Province, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 923-929.

晋西黄土高原水资源植被承载力分析及对策建议

茹豪¹, 张建军^{1, 2*}, 李玉婷¹, 田宁宁¹, 张艳婷¹

1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 临汾 042200

摘要: 干旱缺水始终是黄土高原地区林业水资源管理面临的难题. 为了探究造成黄土高原地区林水失衡的主要原因, 以2009—2012年晋西黄土高原蔡家川流域油松人工林树干液流量与土壤水分长期连续定位观测数据为基础, 采用土壤有效水与单株油松耗水量的比值来衡量该区域水资源植被承载力. 结果表明: ①在油松人工林实际密度(1 300株/hm²)下, 油松人工林过度耗水是深层土壤干化的主要原因; 降水量是决定水资源植被承载力的主要环境因子, 降水量越大, 油松人工林地的水资源植被承载力就越高. ②根据构建的降水量-水资源植被承载力拟合方程, 在当地年均降水量为576 mm条件下, 研究区20 a林龄油松人工林地水资源植被承载力为1 084株/hm², 而油松人工林地的实际密度远大于该水资源植被承载力. 在黄土高原地区, 人工林密度过高是造成深层土壤干化、植被退化等生态恶化的主要原因. 因此, 将人工林密度控制在当地水资源植被承载力范围之内, 是减少林地深层土壤水分消耗、调节林地水平衡的重要措施.

关键词: 晋西黄土高原; 水资源; 植被承载力; 人工林; 合理密度

中图分类号: X143; S725.6

文章编号: 1001-6929(2015)06-0923-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2015.06.12

Analysis and Countermeasures of the Carrying Capacity of Water Resources for Vegetation on the Loess Plateau, Western Shanxi Province, China

RU Hao¹, ZHANG Jianjun^{1, 2*}, LI Yuting¹, TIAN Ningning¹, ZHANG Yanting¹

1. Department of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. National Field Research Station of Forest Ecosystem in Ji County, Linfen 042200, China

Abstract: Forestry water resources management to solve drought and water shortage at the Loess Plateau is a big problem in environmental management. In order to investigate the causes of the imbalance of water resources in plantations, the carrying capacity of water resources for vegetation (CCWRV) was measured by the ratio between available soil water and water consumption of a single Chinese Pine. The data were obtained through long-term continuous *in situ* simultaneous monitoring of soil water content and measurements of stem sap flow in Chinese Pine at the Loess Plateau in Western Shanxi Province during 2009-2012. The results showed that the water consumption of Chinese Pine plantations is one of the factors deteriorating soil water deficit under the conditions of the actual stand density (1300 trees per hectare). Precipitation is one of the key environmental factors determining the CCWRV. The higher the precipitation was, the higher the CCWRV. A curve-fitting equation to calculate the reasonable density for Chinese Pine stands based on annual precipitation was created in the present study. The CCWRV in a 20 years-old Chinese Pine plantation in the experimental area was estimated as 1084 trees per hectare, using the equation based on an average annual precipitation of 576 mm. The CCWRV in Chinese Pine plantation was far less than the actual stand density. It is the basic reason for ecological deterioration, such as deep soil water deficit, vegetation degradation, etc., on the Loess Plateau. Therefore, keeping the stand densities of vegetation within the limits of CCWRV is an important measure to reduce deep soil water consumption and maintain the soil water balance on the Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; water resources; vegetation carrying capacity; plantation; stand density

收稿日期: 2015-01-05 修订日期: 2015-03-20

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304308)

作者简介: 茹豪(1987-)男,山西长治人, ruhao1987@163.com.

* 责任作者: 张建军(1964-)男,甘肃天水人,教授,博士,博导,主要从事水土保持效益及森林水文研究, zhangjianjun@bjfu.edu.cn

水资源是限制植物群落获得持续稳定生产力和良好生态经济效益的关键因子,有限的水资源直接决定着林地所能承载的植物种类、数量和格局^[1-3]. 水资源短缺是限制黄土高原地区植被恢复与重建的重

要因素,因土壤干化造成的人工林和草地大面积退化等生态问题,使得黄土高原的水资源植被承载力成为国内外研究的热点^[4-6]。水资源植被承载力是在一定水资源条件下,单位面积土地能够承载的某种生物个体的最大数量^[7-10],其核心问题是在保证不发生土壤水分亏缺的条件下确定其能够承载的植被量。由于黄土高原地区水土流失严重,森林覆盖率低,为了尽快防治水土流失、改善生态环境,在造林初期盲目营造高密度的人工林一方面过度消耗土壤水分,另一方面水分缺乏也造成人工林生态功能退化和衰减^[11-12]。因此,水资源植被承载力是黄土高原地区调整植被类型和群落密度、控制植物生产力的理论基础与依据,也是避免植被恢复与重建失败的关键^[13-14]。

有关土壤水分与植被之间的相互关系及其反馈机制的研究多集中在干旱胁迫对植物生物量、叶面积指数以及气孔导度等生理生态指标影响方面^[15-16],对于在一定土壤水分条件下土地所能承载植被数量的研究也主要关注灌木与草本植物^[1,11,14]。与灌草植被相比,乔木在获取生物量、控制植被密度以及研究时间的连续性等方面均存在一定困难,故其水资源植被承载力研究相对较少,亟需探寻一种简单合理、便于操作的技术方法来探讨乔木的水资源植被承载力。在水资源植被承载力模型研究方面,以水量平衡原理为基础的模型是国内外学者关注的重点^[17-18]。其中,国内相关研究主要集中在黄土高原中部,以密度-土壤水分模型为主要代表^[18-20],其优点是可以连续获得不同年份的水资源植被承载力,研究对象多为灌木和草本;国外在计算不同地类水资源植被承载力时,则主要以 Hydrobal 生态水文模型^[21]为主,该模型以微气象、蒸散、径流和含水层补给为主要变量,同时将各环境影响因子的权重系数进行率定,但需要海量的数据支撑。

该研究依据土壤水量平衡原理,以黄土高原植被恢复中经常采用的油松(*Pinus tabulaeformis*)作为研究对象^[19,22],采用 EnviroSMART 土壤水分监测系统长期连续监测林地及对照样地的土壤水分,以掌握土壤水分及其蓄水量的动态变化,同时利用热扩散探针(TDP)技术长期连续监测油松的树干液流速率,以确定油松耗水量。采用单位体积土壤供给植物的土壤有效水与单株植物耗水量的比值来衡量水资源植被承载力,以期为黄土高原地区植被恢复与重建、密度调控和水资源合理利用提供参考。

1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域(36°14'N~36°18'N,110°40'E~110°48'E),属晋西黄土梁状丘陵区。平均海拔 1 168 m;年均降水量 576 mm,其中 6—9 月降水量占全年降水量的 70% 左右;年均水面蒸发量 1 733 mm,属于半湿润半干旱地区;年均气温 10℃,≥10℃积温 3 358℃,绝对最高气温 38.1℃,绝对最低气温 -20.4℃,生长季昼夜温差 6~15℃;光照充足,多年平均日照 2 565.8 h,无霜期平均为 172 d。流域大体上为自西向东走向,长约 14 km,面积 39 km²。土壤为褐土,黄土母质,质地均匀。森林覆盖率 79%,流域上游主要为由辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、黑桦(*Betula dahurica*)、丁香(*Syringa oblata*)等组成的天然次生林,中游为由刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)组成的人工林,下游为荒草地和农地。

在蔡家川流域内通过样地调查选择林龄为 20 a、林相整齐、郁闭度为 0.75、密度为 1 300 株/hm²、平均胸径为 12.4 cm、平均树高为 5.8 m 的油松人工林地作为研究样地,样地面积 10 m×10 m。

2 材料与方法

2.1 土壤含水量的测定

采用 EnviroSMART 土壤水分定位监测系统(Sentek 公司,澳大利亚)长期监测油松人工林地的土壤含水量,监测时间间隔为 30 min,监测深度为 0~150 cm。由于 EnviroSMART 土壤水分定位监测系统的水分探头为 10 cm 高的圆环,因此在 0~150 cm 土壤范围内每 10 cm 安装一个水分探头,分别测定各层土壤含水量,采用 CR200 数据采集器对土壤水分监测数据进行收集^[19]。

同时,设置一个 10 m×10 m 的无任何乔木遮挡的裸地作为对照样地,采用遮阴网对其进行遮阴处理,遮阴度与油松人工林地的郁闭度相同,采用同样方法对其土壤水分进行监测。由于研究区土壤为黄土母质、土层较厚,并且对照样地与油松人工林样地位置相近且地形相同^[19,23],故二者土壤理化性质相似,土壤水分运动特征无显著差异。

2.2 树干液流的测定

由于观测样地内油松人工林的树形、树冠相似,可以认为通过标准木边材横截面的树干液流流量即可代表油松人工林内每棵油松的蒸散量,故以标准木每天的树干液流流量均值为基础进行单株油松年耗

水量的计算. 在样地内通过每木检尺调查, 选择 3 株树干圆满、不偏心、不偏冠, 并且胸径上、下 50 cm 范围内无结疤的油松标准木作为观测样木, 采用热扩散探针 (TDP) 技术^[24-25] 长期监测树干液流, 每 10 min 测定一次. 降水量、土壤含水量与树干液流监测装置如图 1 所示.

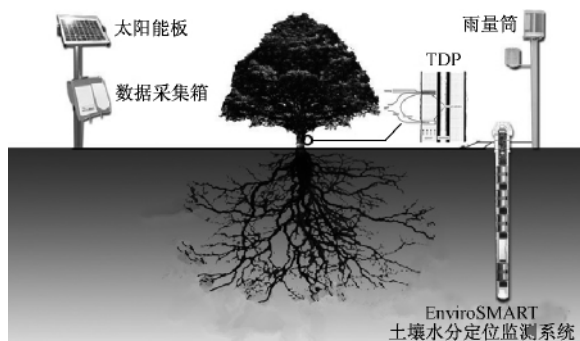


图 1 数据监测装置

Fig. 1 Schematic diagram of the monitoring instruments

2.3 水资源植被承载力的计算

2.3.1 油松人工林地土壤蓄水量及蒸散发总量

林地内土壤水分的消耗主要用于植被蒸腾和土壤蒸发, 由于油松人工林下灌草植被稀少, 其蒸腾量占林地蒸散发总量的比例也较小, 故将其忽略以方便计算. 由于蔡家川流域的黄土层较厚、无壤中流、地下水埋藏深, 并且深层 (> 100 cm) 土壤含水量的垂直变化较小^[19-23], 因此, 油松人工林地 0~150 cm 土壤的总蓄水量近似为

$$W = \sum_{i=1}^{15} \theta_i \times (Z_{i+1} - Z_i) \quad (1)$$

式中: W 为 0~150 cm 土壤的总蓄水量, μm ; Z_i 为第 i 层土壤深度, μm ; θ_i 为第 i 层土壤含水量, %.

将每层土壤蓄水量的减少量之和作为油松人工林地 0~150 cm 土壤的蒸散发总量.

2.3.2 对对照样地的蒸发量

由于对对照样地遮阴度与油松人工林地郁闭度相同, 而对对照样地土壤没有乔木蒸腾的干扰, 则其蒸发量可近似于土壤本身蒸发量. 对对照样地 0~150 cm 土壤蒸发量的计算方法与油松人工林地蒸散发总量计算相同.

2.3.3 土壤有效水

该研究中, 土壤有效水是指能够被用于油松蒸腾耗水的那部分土壤水分, 为油松人工林地土壤蒸散发总量与对对照样地土壤蒸发量之差.

2.3.4 油松耗水量

林木液流量与边材面积密切相关, 油松的边材面积与胸径之间存在较高的相关性, 可以用幂函数模型^[26] 进行计算. 树干液流量计算公式:

$$F_s = A_s \times V \quad (2)$$

$$A_s = 0.696 \cdot 9D^{1.964} \quad (3)$$

式中: F_s 为每小时树干液流量, $\mu\text{m}^3/\text{h}$; A_s 为油松平均边材面积, μm^2 ; V 为油松树干液流平均速率, $\mu\text{m}/\text{h}$; D 为油松平均胸径, μm .

单株油松的月耗水量和年耗水量:

$$F_m = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^{24} F_s / A_c \times 10^{-3} \quad (4)$$

$$F_y = \sum_{m=1}^{12} F_m \quad (5)$$

式中: F_m 、 F_y 分别为单株油松的月耗水量、年耗水量, mm ; A_c 为林冠投影面积, μm^2 ; d 为当月的实际天数; n 为小时数; m 为月份.

单位面积内油松的月耗水总量为单株油松的月耗水量与油松密度的乘积; 同理, 单位面积内油松的年耗水总量为单株油松的年耗水量与油松密度的乘积.

2.3.5 水资源植被承载力

油松人工林地 0~150 cm 土壤的月水资源植被承载力与年水资源植被承载力计算公式:

$$C_m = W_{am} / F_m \quad (6)$$

$$C_y = W_{ay} / F_y \quad (7)$$

式中: C_m 、 C_y 分别为月水资源植被承载力、年水资源植被承载力, 株/ hm^2 ; W_{am} 、 W_{ay} 分别为油松人工林地的月土壤有效水、年土壤有效水, μm .

3 结果与分析

3.1 油松人工林地蒸散发总量的变化

2009—2012 年油松耗水量、对对照样地土壤蒸发量及油松人工林地蒸散发总量的变化如图 2 所示. 由图 2 可见, 油松耗水量、对对照样地土壤蒸发量与油松人工林地蒸散发总量的月际变化随着生长季的变化十分明显, 生长季蒸散发总量明显大于非生长季. 从年际变化来看, 2009—2012 年油松耗水量分别为 232、212、170、206 mm , 对对照样地土壤蒸发量分别为 352、489、263、399 mm , 油松人工林地蒸散发总量分别为 476、522、431、490 mm . 可见, 2009—2012 年油松耗水量分别占油松人工林地蒸散发总量的 49%、41%、39%、42%, 对对照样地土壤蒸发量分别占油松人工林地蒸散发总量的 74.0%、93.8%、61.1%、81.5%. 油松耗水量与对对照样地土壤蒸发量之和分别

为油松人工林地蒸散发总量的 1.23、1.35、1.00、1.24 倍. 这是由于 0 ~ 150 cm 土壤内的有效水被油松人工林的蒸腾作用消耗之后, 不能再提供足够的土壤水分供油松蒸腾, 进而激发 > 150 cm 深度范围内的土壤水分在毛细作用下向上运动, 以满足林地的蒸散发耗水, 从而出现 0 ~ 150 cm 土层内水分失衡现象. 在黄土高原地区, 油松根系一般分布在 0 ~ 100

cm 深度范围内土壤中, > 100 cm 土壤中根系分布很少^[22 27] 因此, 将 0 ~ 150 m 的土层作为油松根际耗水层较为恰当. 为此需要调整油松实际密度, 减少油松人工林耗水量, 将油松耗水深度控制在 0 ~ 150 cm 土层以内, 以使该土层内的水分达到平衡状态, 避免消耗深层土壤水分, 进而缓解深层土壤的干化程度.

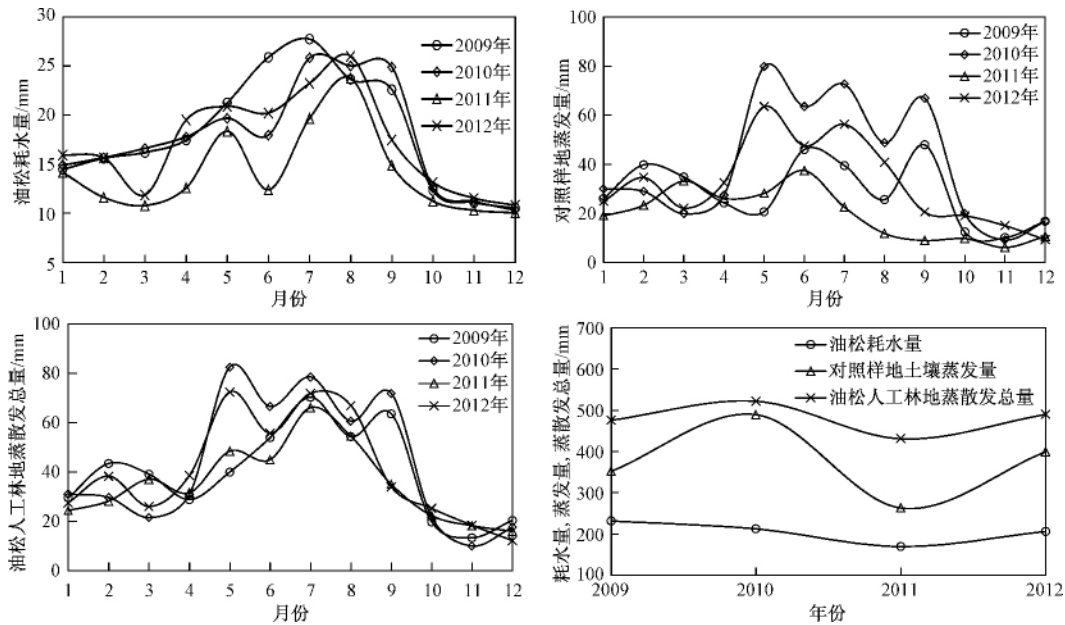


图2 2009—2012年油松耗水量、对照样地土壤蒸发量及油松人工林地蒸散发总量的变化
Fig. 2 The changes of *Pinus tabulaeformis* water consumption, control plot soil evaporation, and forestland total evapotranspiration in 2009-2012

3.2 油松人工林地的水资源植被承载力

2009—2012年油松人工林地水资源植被承载力月际变化如表1、图3所示. 由表1可见, 2009—2012年油松人工林地水资源植被承载力的年内变化很大, 与油松实际密度(1300株/hm²)相比, 雨季月份(7—9月)水资源植被承载力明显较高, 而其他月份水资源植

被承载力明显偏低. 这是由于土壤水分年内分布不均所致, 即雨季时土壤蓄水量较大, 0 ~ 150 cm 土层内的水分能够承载较多数量的油松; 而旱季(12月—翌年3月)缺乏降水, 土壤蓄水量较小, 导致 0 ~ 150 cm 土层内的水分所能承载的油松数量十分有限, 油松需要消耗更深层的土壤水分才能勉强维持自身生长.

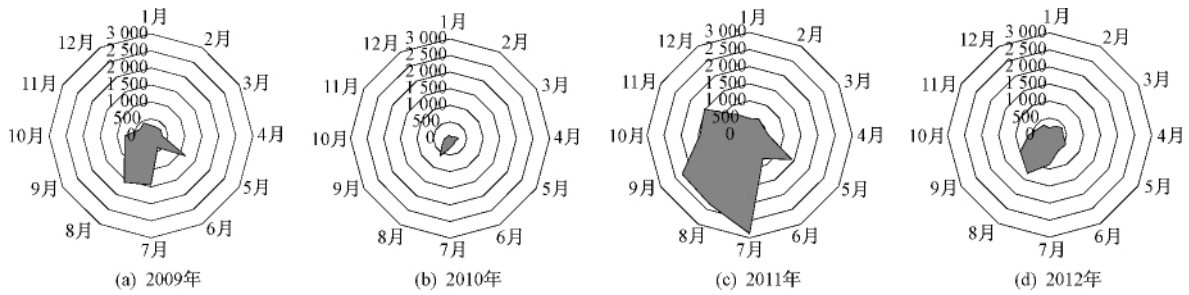
表1 水资源植被承载力的月变化

Table 1 The monthly variation of the carrying capacity of water resources for vegetation

年份	水资源植被承载力/(株/hm ²)												年降水量/mm	
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月		
2009	310	300	336	332	1 178	396	1 441	1 575	897	772	372	434	695	478
2010	86	54	125	260	176	214	293	614	252	162	92	96	202	374
2011	491	546	466	556	1 435	786	2 874	2 330	2 272	1 447	1 520	690	1 284	624
2012	206	302	422	399	553	528	869	1 300	995	607	373	337	574	465

由表1、图3可知, 2009—2012年油松人工林地水资源植被承载力的年际变化差异较大. 2010年, 年降水量仅为374 mm, 属于枯水年, 水资源植被承载力

最小, 仅为202株/hm², 远小于油松实际密度, 表明 0 ~ 150 cm 土层内有限的土壤水分无法满足油松的蒸腾耗水, 由此限制了油松的正常生长, 严重时会出现



注: 单位为株/hm².

图 3 水资源植被承载力的年变化

Fig. 3 The annual variation of the carrying capacity of water resources for vegetation

现枯萎、衰老甚至死亡等现象. 而 2011 年的年降水量为 624 mm, 属丰水年, 水资源植被承载力最大, 为 1 284 株/hm², 接近于油松实际密度, 说明 0 ~ 150 cm 土层内的水分能够满足油松的蒸腾耗水, > 150 cm 土层的水分没有受到油松蒸腾耗水的影响. 2009 年、2012 年的年降水量分别为 478、465 mm, 水资源植被承载力分别为 695、574 株/hm², 也远小于实际油松密度, 年降水量虽然只相差 13 mm, 但是水资源植被承载力却相差 121 株/hm², 可见年均降水量对水资源植被承载力的影响之大. 由于研究区年均降水量为 576 mm, 比 2011 年少 48 mm, 可以推测在年均降水量条件下 0 ~ 150 cm 土层内的水分不足以供养 1 300 株/hm²的油松, 需要将油松实际密度调至适当的水资源植被承载力水平, 才能维持 0 ~ 150 cm 土层内的水量平衡, 以减少对深层土壤水分的干扰和消耗.

3.3 水资源植被承载力的回归模型分析

水资源植被承载力是在保证不发生土壤水分亏缺条件下确定的土壤所能够承载的植被量, 但其影响因素较多. 如果能确定影响水资源植被承载力的主导因素, 不仅省时省力, 而且实践指导性也较强. 该研究采用 Z-Score 标准化法将水资源植被承载力与月降水量、气温、风速、树干液流量、土壤含水量等因子进行标准化, 并分析其相关性, 结果如表 2 所示.

表 2 水资源植被承载力与其影响因子的 Pearson 相关性

Table 2 The Pearson correlation analysis between the carrying capacity of water resources for vegetation and its influence factors

影响因子	水资源植被承载力	降水量	树干液流量	气温	风速
月降水量	0.692				
树干液流量	-0.255	0.662			
气温	0.425	0.648	0.729		
风速	-0.344	-0.336	0.088	-0.010	
土壤含水量	0.436	0.204	-0.080	0.140	-0.446

注: n = 48.

相关性分析结果显示, 各影响因子对水资源植被承载力的影响大小依次为月降水量 (0.692) > 土壤含水量 (0.436) > 气温 (0.425) > 风速 (-0.344) > 树干液流量 (-0.255). 以水资源植被承载力 (C) 为因变量、上述 5 个影响因子为自变量, 利用 SPSS 18.0 多元统计回归分析构建多元回归模型 (见表 3).

表 3 水资源植被承载力与其主要影响因子的回归模型

Table 3 The regression models of the carrying capacity of water resources for vegetation and its main influence factors

年份	回归模型	R ²	F	sig
	$C = 375.999 + 8.012P$	0.817	44.508	0.000
2009	$C = -217.143 + 7.194P + 29.481W$	0.918	50.599	0.000
2010	$C = 74.736 + 4.081P$	0.934	140.603	0.000
2011	$C = 506.665 + 14.964P$	0.942	161.046	0.000
2012	$C = 309.24 + 6.849P$	0.895	84.991	0.000

注: P 为月降水量; W 为月土壤含水量. n 均为 12.

由表 3 可见, 2009 年水资源植被承载力的主要影响因子包括月降水量和土壤含水量, 而 2010—2012 年仅降水量影响较大. 回归分析统计结果显示, 所构建回归方程均能较好地揭示水资源植被承载力与降水量之间的变化规律.

虽然土壤水分是影响水资源植被承载力的关键因素, 但由于自然降水是土壤水分的最主要来源, 所以在黄土高原地区确定水资源植被承载力时必须首先考虑当地的自然降水量. 此外, 在回归模型中, 降水量的影响程度远高于土壤含水量. 因此, 可以采用降水量与水资源植被承载力之间的关系来描述水资源植被承载力的变化. 在分析降水量与水资源植被承载力关系时, 考虑到可行性与指导性, 以年份作为时间尺度比较合理. 因此将 2009—2012 年实际年降水量与对应的年水资源植被承载力进行拟合, 结果显示, 二者呈显著线性相关 ($y = 4.3446x - 1418.4$, $R^2 = 0.9962$, $P < 0.01$) 拟合程度较高. 根据研究区

年均降水量(576 mm),计算得到区域内20 a林龄油松人工林地的水资源植被承载力为1 084株/hm²。因此,应当将研究区油松实际密度控制在1 084株/hm²的水资源植被承载力范围以内,才能保障林地的水资源平衡,缓解深层土壤干化、植被枯萎衰亡等生态恶化现象。

4 讨论

2009—2012年油松人工林地0~150 cm土层根际土壤水分一直处于严重亏缺(亏缺量分别为208、179、2、115 mm)状态,为了维持现有林分的正常生长,亏缺的土壤水分主要来自>150 cm深度范围内的土壤贮水补给,因此,油松人工林对土壤深层水分的消耗是造成土壤干化的主要原因^[28-29]。油松根系一般分布在0~100 cm深度范围内土壤^[22-27],若根际土壤水分能够满足其耗水需求,林地水资源得到平衡,则黄土高原地区深层土壤的干化现象将会有所缓解,深层土壤亏缺的水分也会在丰水年得到相应补充^[30]。

降水量是黄土高原地区人工林地土壤水分的唯一来源,不仅影响土壤水分的盈亏程度,更是限制黄土高原人工林合理生长密度的关键因素。该研究根据建立的年降水量-水资源植被承载力回归方程,计算当地年均降水量为576 mm条件下20 a林龄油松人工林地0~150 cm土壤的水资源植被承载力为1 084株/hm²,高于采用生物量法估算的林分密度(581株/hm²)^[31]。研究区油松实际密度为1 300株/hm²,远高于该研究计算结果,可见,过高的林分密度是导致黄土高原土壤水资源过度消耗的主要原因,这与已有研究结果^[32]相一致。因此,需要将林分密度限制在当地水资源植被承载力之内,既能避免林地深层土壤干化现象的发生,又能促使林分生产力处于最优水平。

分析结果显示,降水量与水资源植被承载力的相关性最大,是水资源植被承载力与环境因子回归模型中的决定性变量。因此,采用建立降水量-植被承载力拟合曲线的方法可以运用到对其他乔木林地在不同降水量条件下的水资源植被承载力估算,同时能够指导降水量差异较大的黄土高原地区进行乔木植被的恢复、重建与改造。但是,由于缺乏极端干旱年份的水资源植被承载力数据,同时受到观测年限的限制,导致在建立降水量-水资源植被承载力关系时存在样本量不够大等问题,这也是今后研究水资源植被承载力阈值以及合理确定水资源植被承载力的重点方向。

5 结论

a) 2009—2012年晋西黄土高原蔡家川流域油

松耗水量与对照样地蒸发量之和分别是油松人工林地0~150 cm土壤水分蒸散发总量的1.23、1.35、1.00、1.24倍,土壤水分亏缺量分别为208、179、2、115 mm,过高密度的油松人工林促进了土壤深层水分的消耗。

b) 研究区内各影响因子对水资源植被承载力的影响大小依次为降水量>土壤含水量>气温>风速>树干液流量,其中,降水量是限制水资源植被承载力的关键因素。

c) 通过建立降水量-水资源植被承载力回归方程,得到在当地年均降水量为576 mm条件下,20 a林龄油松人工林地的水资源植被承载力为1 084株/hm²,而油松人工林地的实际密度(1 300株/hm²)远大于该水资源植被承载力,因此,需要将油松人工林调至水资源植被承载力范围以内才能维持当地水资源的平衡。

参考文献(References):

- [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.
GUO Zhongsheng,SHAO Ming'an. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau [J]. Acta Ecology Sinica, 2003, 23(8):1640-1647.
- [2] SHALTOUT K H, SHEDED M G, SALEM A I. Vegetation spatial heterogeneity in a hyper arid Biosphere Reserve Area in North Africa [J]. Acta Botanica Croatica 2010, 69(1):31-46.
- [3] SUSANNE S, RANDY A D, GERARDO M M. Soil and water dynamics [J]. Mediterranean Oak Woodland Working Landscapes, 2013, 16:91-121.
- [4] 刘建立,王彦辉,于澎涛,等.六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力[J].植物生态学报,2009,33(6):1101-1111.
LIU Jianli, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Vegetation carrying capacity based on soil water on typical slopes in the Diediegou small watershed of Liupan mountains, northwestern China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology 2009, 33(6):1101-1111.
- [5] CHEN Liding, HUANG Zhilin, GONG Jie, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Catena 2007, 70(2):200-208.
- [6] LI Xinrong, ZHANG Zhishan, TAN Huijuan, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J]. Science China-Life Sciences 2014, 57(5):539-548.
- [7] 栾芸,刘静玲,邓洁,等.白洋淀流域水资源管理中的公众参与分析及评价[J].环境科学研究,2010,23(6):703-810.
LUAN Yun, LIU Jingling, DENG Jie, et al. Analysis and evaluation of public participation in water resources management of Baiyangdian Basin, China [J]. Research of Environmental Sciences 2010, 23(6):703-810.
- [8] 邓伟明,雷坤,苏会东,等.2008年滇池流域水环境承载力评估

- [J]. 环境科学研究 2012 25(4):372-376.
DENG Weiming ,LEI Kun ,SU Huidong ,*et al.* Assessment of water environmental carrying capacity in the Dianchi Lake Watershed in 2008 [J]. Research of Environmental Sciences 2012 25(4):372-376.
- [9] WANG Shuo ,YANG Fenglin ,XU Ling ,*et al.* Multi-scale analysis of the water resources carrying capacity of the Liaohe Basin based on ecological footprints [J]. Journal of Cleaner Production 2013 , 53:158-166.
- [10] ZHANG Zheng , LU Wenxi , ZHAO Ying , *et al.* Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process [J]. Ecological Modelling 2014 275:9-21.
- [11] 王延平 邵明安. 陕北黄土丘陵沟壑区人工草地的土壤水分植被承载力[J]. 农业工程学报 2012 28(18):134-141.
WANG Yanping ,SHAO Ming'an. Vegetation soil water carrying capacity of artificial pasture in loess region in northern Shaanxi , China [J]. Transactions of the CSAE 2012 28(18):134-141.
- [12] XAVIER T M T ,PEZZOPANE J E M ,PENCHEL R M. Influence of water deficit and season on biomass yield from clonal stands of eucalyptus [J]. Ceren 2013 19(3):473-479.
- [13] 王俭 孙铁珩 李培军 等. 环境承载力研究进展 [J]. 应用生态学报 2005 16(4):768-772.
WANG Jian ,SUN Tieheng ,LI Peijun ,*et al.* Research progress on environmental carrying capacity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2005 16(4):768-772.
- [14] SHE Dongli ,LIU Dongdong ,XIA Yongqiu ,*et al.* Modeling effects of land use and vegetation density on soil water dynamics: implications on water resource management [J]. Water Resources Management , 2014 28(7):2063-2076.
- [15] PAEANE C. Leaf area index , leaf transpiration and stomatal conductance as affected by soil water deficit and VPD in processing tomato in semiarid mediterranean climate [J]. Journal of Agronomy and Crop Science 2011 197(3):165-176.
- [16] PATANE C ,COSENTINO S L. Yield ,water use and radiation use efficiencies of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) under reduced water and nitrogen soil availability in a semi-arid Mediterranean area [J]. European Journal of Agronomy 2013 46:53-62.
- [17] ZEIDE B. Optimal stand density: a solution [J]. Canadian Journal of Forest Research 2004 34(4):846-854.
- [18] XIA Yongqiu ,SHAO Ming'an. Soil water carrying capacity for vegetation: a hydrologic and biogeochemical process model solution [J]. Ecological Modelling 2008 214(2/3/4):112-124.
- [19] 张建军 李慧敏 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响 [J]. 生态学报 2011 31(23):7056-7066.
ZHANG Jianjun ,LI Huimin ,XU Jiajia. Soil moisture dynamics of water and soil conservation on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica 2011 31(23):7056-7066.
- [20] 郭忠升 邵明安. 土壤水分植被承载力数学模型的初步研究 [J]. 水利学报 2004 35(10):95-99.
GUO Zhongsheng , SHAO Ming'an. Mathematical model for determining vegetation carrying capacity of soil water [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2004 35(10):95-99.
- [21] BELLOT J ,CHIRINO E. Hydrobal: an eco-hydrological modelling approach for assessing water balances in different vegetation types in semi-arid areas [J]. Ecological Modelling 2013 266:30-41.
- [22] ZHANG Chaobo , CHEN Lihua , JIANG Jing. Vertical root distribution and root cohesion of typical tree species on the Loess Plateau ,China [J]. Journal of Arid Land 2014 6(5):601-611.
- [23] 李笑吟 毕华兴 李俊 等. 晋西黄土区土壤剖面水分动态研究 [J]. 中国水土保持科学 2006 4(4):72-77.
LI Xiaoyin ,BI Huaxing ,LI Jun ,*et al.* Dynamics of moisture of soil profile in Loess area of western Shanxi [J]. Science of Soil and Water Conservation 2006 4(4):72-77.
- [24] GRANIER A , LOUSTAU D. Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data [J]. Agricultural and Forest Meteorology 1994 71(1/2):61-81.
- [25] 隋旭红 张建军 文万荣. 晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究 [J]. 生态学报 2011 31(16):4791-4798.
SUI Xuhong ,ZHANG Jianjun ,WEN Wanrong. Study on sap flow in forest of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* by using TDP method [J]. Acta Ecologica Sinica 2011 31(16):4791-4798.
- [26] 马李一 孙鹏森 马履一. 油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换 [J]. 北京林业大学学报 2001 23(4):1-5.
MA Liyi ,SUN Pengsen ,MA Livi. Sapwood area calculation and water use scaling up from individual trees to stands of Chinese Pine and black locust [J]. Journal of Beijing Forestry University 2001 , 23(4):1-5.
- [27] 刘秀萍 陈丽华 陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究 [J]. 干旱区研究 2007 24(5):647-651.
LIU Xiuping ,CHEN Lihua ,CHEN Jihu. Study on the distribution of root density of *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis* Carr. [J]. Arid Zone Research 2007 24(5):647-651.
- [28] 李军 陈兵 李小芳 等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应 [J]. 生态学报 2007 28(4):1429-1445.
LI Jun ,CHEN Bing ,LI Xiaofang ,*et al.* Effects of deep soil desiccation on artificial forestland in different vegetation zones on the Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica 2007 28(4):1429-1445.
- [29] ZENG Chen ,SHAO Ming'an ,WANG Quanjiu ,*et al.* Effects of land use on temporal-spatial variability of soil water and soil-water conservation [J]. Acta Agriculture Scandinavica Section B: Soil and Plant Science 2011 61(1):1-13.
- [30] 郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度 [J]. 应用生态学报 2010 21(12):3029-3035.
GUO Zhongsheng. Soil water resource use limit in semi-arid loess hilly area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology 2010 21(12):3029-3035.
- [31] 张建军 贺维 纳磊 等. 黄土区刺槐和油松水土保持林合理密度的研究 [J]. 中国水土保持科学 2007 5(2):55-59.
ZHANG Jianjun ,HE Wei ,NA Lei ,*et al.* Study on appropriate density of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* for soil and water conservation forests in Loess area [J]. Science of Soil and Water Conservation 2007 5(2):55-59.
- [32] 刘向东 吴钦孝 赵鸿雁. 黄土丘陵油松人工林地土壤水分特征的研究 [J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊 , 1991(14):71-78.
LIU Xiangdong ,WU Qinxiao ,ZHAO Hongyan. Studies on soil moisture characteristics in plantation of Chinese Pine in loess hilly region [J]. Memoir of NISWC ,Academia Sinica & Ministry of Water Conservancy 1991(14):71-78.

(责任编辑:周巧富)