

# 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征

王进鑫<sup>1</sup>, 黄宝龙<sup>2</sup>, 罗伟祥<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:**采用单株平衡法,通过定位监测与对比分析,对黄土高原半湿润落叶阔叶林区,持续干旱期末人工林地土壤水分亏缺度、雨季末降雨补偿深度及土壤贮水亏缺补偿度的时空分布进行了研究。结果表明,在水分条件较为优越的半湿润落叶阔叶林带,丰水年雨季过后的土壤贮水亏缺补偿深度不超过 280cm,平水年 240cm,枯水年仅 40cm,而耗水深度超过 320cm。丰水年 0~320cm 土层,土壤贮水亏缺补偿度仅 14.53%。自然状况下,单纯依赖天然降水,人工林地土壤水分亏缺状况将难以恢复。人工林地土壤贮水亏缺补偿度具有极为明显的空间分布规律。其中,水平方向土壤贮水亏缺补偿度与距主干距离成反相关,垂直方向因林分类型不同而异。林木根系的存在,削弱了天然降雨对土壤水分亏缺的补偿作用。在黄土高原南部半湿润落叶阔叶林带,仅采用传统的一维垂向土壤水分观测结果,或以 3m 以上土层的土壤水分动态监测资料为基础,进行有关土壤水量平衡及蒸散量的计算,其计算结果的准确性和科学性将难以保证。

**关键词:**人工林;土壤水分亏缺;降雨补偿;时空分布;黄土高原

## Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of the drought-prone Loess Plateau

WANG Jin-Xin<sup>1</sup>, HUANG Bao-Long<sup>2</sup>, LUO Wei-Xiang<sup>1</sup> (1. Northwest Sci-Tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2395~2401.

**Abstract:** The dried soil layer at a forest plantation site of the drought-prone Loess Plateau in China has threatened the survival and sustainability of the existent plantation, and also hindered the restoration and rebuilding of artificial forest vegetation. There have been numerous studies on the location and depth of dried soil layer's, and the influence of species composition. However, studies on root functions under soil water deficit, compensation and rehabilitation characteristics after rainy seasons in different precipitation years have been sparse. In this paper, the temporal and spatial distributions of compensation degree of soil water storage deficit in a plantation site of black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.), Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carr.), and oriental arborvitae (*Platycladus orientalis* Franco) were studied using the method of single-tree water balance. Field experiment plot was divided into two zones, root zone and non-root zone, and soil water measurements were made every 5 days from the beginning of June to the end of November by a soil moisture meter of neutron scattering. The monitoring period covered continental-climate wet periods in dry years, normal years and rainy years, respectively. The root zones were divided into 3 or 4 sections from the tree's root crown to 1/2 spacing in the row at an interval of 30 cm to characterize the horizontal distribution of soil water content, and 16 layers from the surface to 320 cm depth at an interval of 20 cm to characterize the vertical distribution of soil water content. The non-root zone, 1.0 m×1.0 m on the surface, was at the same

**基金项目:**国家“九五”重点科技攻关资助项目(96-007-01-01-02);国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999043602);西北农林科技大学回国人员科研启动基金资助项目(080804)

**收稿日期:**2003-10-31;**修订日期:**2004-06-26

**作者简介:**王进鑫(1962~),男,甘肃镇原县人,博士,副教授,主要从事旱区人工林生态系统水分运移调控与生物节水理论技术研究。E-mail: jwang118@tom.com

**Foundation item:** the Key Project of Ninth Five-year Plan of China (No. 96-007-01-01-02); the National Key Project for Basic Research in China (No. G1999043602); the Scientific Research Foundation of NWSUAF for Returned Oversea Scholar (No. 080804)

**Received date:**2003-10-31;**Accepted date:**2004-06-26

**Biography:** WANG Jin-Xin, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in regulative mechanism on water transport of planted forest ecosystem and the key technology of saving water in arid region. E-mail: jwang118@tom.com

site with and near the root zone, but the roots from the nearby trees were cut off by digging a ditch around their periphery, followed by wrapping the soil column of 2.5 m in depth with 4 layers plastic sheet to prevent from root penetration, water uptake and soil water transport between the root and non-root zones. The annular ditch was then re-filled and a tube was put into the central of non-root zone to determine the vertical distribution of soil water content in the non-root zone at an interval of 20 cm. At the same time, two new quantitative parameters and mathematical expression demonstrated the compensation and rehabilitation characteristics of soil water storage deficit. The results showed that soil water deficit of the plantation site cannot be restored by natural precipitations, even in the sub-humid vegetation zone of the region. The average compensation degree of soil water storage deficit is only 14.53 % at the root zone of 0~320 cm after rainy season in rainy year; and the compensation depth is less than 280 cm in the rainy year, 240 cm in the normal year, and only 40 cm in the dry year after rainy season. The compensation degree of soil water storage deficit in the root zone is less than that of the non-root zone, indicating that roots decrease the compensation of soil water storage deficit by natural rainfall. The soil depth, at which water may easily lose, is no less than 320 cm. The spatial distributions of compensation degree of soil water storage deficit at the root zone have an inverse relationship with the distance from the root crown, different from that of the non-root zone. Due to the root distribution and stem flow of tree species, it is not accurate for the calculation of water balance by measuring vertical soil water content of either one dimension traditionally or no more than 3 m in depth at plantation site in the sub-humid vegetation zone of Loess Plateau.

**Key words:**plantation; soil water deficit; compensation and rehabilitation; temporal and spatial distribution; Loess Plateau  
文章编号:1000-0933(2004)11-2395-07 中图分类号:S152.7,Q945.11 文献标识码:A

20 世纪 80 年代末,以林地地力衰退为代表的人工林地土壤退化问题,引起了林学界的普遍关注。1991 年我国首次召开了“人工林土壤退化及防治技术学术讨论会”。但其重点主要集中在我国南方多雨地区、以杉木为代表的林地土壤肥力衰退问题上。对广泛发生于北方少雨地区、以“小老树”为特征的人工植被土壤退化——“土壤干化”问题,尽管许多学者已敏锐地认识到这一问题的严重性<sup>[1~3]</sup>,但并未引起足够的重视。然而,正是这种以土壤水分持续性严重亏缺为特征的人工植被土壤干化,却在日益严峻地威胁着我国北方广大地区人工林的生存和持续发展,成为这一地区人工植被建设的严重隐患。近年来,有关人工林土壤干化问题的研究已日益引起人们的重视。杨维西、侯庆春、王力、穆兴民等对我国北方地区人工植被的土壤干化现状、成因与防治对策等问题进行了剖析<sup>[4~7]</sup>;王克勤等对集水造林在防止土壤干化中的作用进行了研究<sup>[8]</sup>;杨文治对黄土高原地区造林土壤水分生态分区进行了研究<sup>[9]</sup>;吴钦孝对人工植被土壤干化的形成机制进行了划分<sup>[10]</sup>。此外,许多学者也对森林生态系统水分环境<sup>[11~17]</sup>以及根区土壤水分分布进行过研究<sup>[18~25]</sup>。然而,有关根区土壤水分亏缺补偿的时、空分布问题,特别是二维分布研究罕见报道。本文通过引入两个新的指标,对黄土高原人工林地,不同降水年份土壤贮水亏缺的补偿与恢复能力及其时、空分布作了分析,为探讨实施人工林系统水分调控提供理论依据。

## 1 研究区概况

定位观测区位于黄土高原南部的陕西省淳化县泥河沟、祁家沟流域,海拔 712~1193m。土壤为黄土、质地中壤。多年平均降雨量 600.6mm,最多 832.0mm,最少 376.0mm,降水年变率 14%,6~11 月份降水占全年降水的 75%,有 50% 的年份降水量在 520mm 以上,多年平均气温 9.8℃,属于暖温带半湿润落叶阔叶林带,地下水埋深 35~60m,含水层富水性弱,林木难以直接吸收利用。该区人工林多分布在沟坡上部,其中定位观测区侧柏(*Platycladus orientalis* (Linn.) Franco)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)人工林均位于阴坡,坡度 20~23°,林龄 13a,密度 2000 株/hm<sup>2</sup>;刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)人工林位于阳坡,坡度 5~28°,林龄 13~15a,密度 1333~2500 株/hm<sup>2</sup>。初植时均曾采用反坡梯田整地。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤水分动态监测

以黄土高原降水量较大,土壤水分条件较为优越的半湿润落叶阔叶林带淳化县为研究基地,采用单株平衡法<sup>[26]</sup>对侧柏、油松、刺槐人工林地土壤水分的时、空分布进行动态监测。每一林地设测区两处,分别称之为有根区和无根区。有根区以标准株树干基部为中心,沿水平方向每 30cm 设水分观测点一处,直至 1/2 株距处。其中侧柏、油松有根区各为 3 个测点,刺槐 4 个测点。每一测点钻孔并设置中子仪土壤水分测定套管一根,深度 3.5m。无根区与有根区处于同一标准地,面积 1m×1m。从区域外围开沟,深 2.5m,切断周围树木根系,然后用 4 层塑料薄膜紧裹原状土柱,再将沟槽回填、分层踏实,直至与地面平齐。土柱中央设中子仪水分测定管一根,深度 3.5m。各测点沿垂向每 20cm 为一层,共 16 层(测定深度 320cm)。除表层 0~20cm 土壤含水量用烘干法测定外,其余各层点均用 DR-503 型中子土壤水分测定仪测定(图 1)。每一层位平行测定 3 次,取平均值。

2.2 气象资料的观测

林外降雨采用20cm口径标准雨量筒与虹吸式自记雨量计按常规方法测定。林内降雨采用口径20cm承雨筒,以树干为中心按等间距机械布点测定,每一标准地设置测点10处。其余气象、水文要素因本文尚未涉及,故从略。

2.3 土壤贮水亏缺状况与补偿恢复的度量指标

黄土高原土层厚度高达50~150m,地下水位通常很低,不仅树木难以吸收利用,而且也无助于人工林地土壤干层的恢复。由于降水是黄土高原人工林地土壤水分的唯一来源,因此在自然状况下,人工林地土壤干层的补偿与恢复,则更多地与降水及土壤水分的蒸散消耗相联系。

关于降水对土壤贮水亏缺的补偿与恢复问题,是近年来水循环与转换及土壤水分生态研究中的热点问题之一。其重点是研究天然降水对土壤贮水亏缺的补给作用,以及补给后包气带土壤贮水接近田间持水量的程度。然而,如何既简明、确切,又能定量地反映与描述这一问题,尚无统一而规范化的度量指标。在水量转换的水文学研究中,衡量降水对地下水补给的关系常用降水入渗补给系数 $\alpha$ 表示,即 $\alpha=P_r/P$ 。其中, $P$ 为次降雨量(mm); $P_r$ 为地下水因降雨 $P$ 而获得的补给量(mm)<sup>[27]</sup>。吴钦孝、杨文治在分析土壤水分年际补偿与恢复时就借用了 $P_r$ 和 $\alpha$ 两个指标<sup>[10]</sup>。其中降雨补给量 $P_r$ =降雨量-蒸散量。由于这两个指标是基于水文学中有关大气降水与地下水的转换关系而提出的,特别是降雨补给系数含有降水转换效率的涵义,而且并未与土壤贮水的亏缺程度相联系;同时,用 $P-ET$ 求 $P_r$ 也未考虑地表径流对入渗补给的影响。因而,难以准确反映天然降水对土壤贮水亏缺的补偿与恢复程度。

基于这一情况,现定义下列两个指标,以便于准确分析降水对土壤贮水亏缺的补偿与恢复情况:

土壤贮水亏缺度

$$DSW(\%) = \frac{Da}{F_c} \times 100\%$$

式中, $Da$ 为土壤贮水亏缺量(mm), $Da=F_c-W_c$ ;  $F_c$ 为土壤田间持水量(mm); $W_c$ 为土壤实际贮水量(mm)。

土壤贮水亏缺补偿度

$$CSW(\%) = \frac{\Delta W}{Dac} \times 100\%$$

式中, $\Delta W$ 为雨季末土壤贮水增量(mm), $\Delta W=W_{cm}-W_{cc}$ ;  $W_{cc}$ 为雨季初土壤实际贮水量(mm); $W_{cm}$ 为雨季末土壤实际贮水量(mm); $Dac$ 为雨季初土壤贮水亏缺量(mm), $Dac=F_c-W_{cc}$ 。

(1)式既可以用来反映雨季前土壤贮水的亏缺程度,又可反映雨季末土壤贮水亏缺的恢复程度(亏缺度为0,则表明土壤水分亏缺得以完全恢复)。(2)式则主要用来反映降雨对土壤水分亏缺的补偿程度,如果雨季末土壤水分增量 $\Delta W \leq 0$ ,则亏缺补偿度 $CSW \leq 0$ ,此时表示土壤水分亏缺在雨季后并未得到补偿,甚至亏缺进一步加剧;同时,如果亏缺补偿度 $CSW$ 等于100%,则表明土壤水分亏缺得以完全补偿与恢复。因此,在分析降雨对土壤贮水亏缺的补偿与恢复问题时,(1)、(2)两式与单纯的降雨入渗补给量 $P_r$ 及降雨入渗补给系数 $\alpha$ 相比,其物理意义将更为明确。

3 结果与分析

3.1 自然状况下人工林地土壤贮水亏缺的补偿与恢复

3.1.1 不同降水年份人工林地土壤贮水亏缺补偿量与补偿度 图2是不同水文年刺槐人工林地土壤贮水亏缺的补偿与恢复情况。从图中可以看出,在树种相同的情况下,雨季过后土壤贮水增量、降水补偿深度与土壤贮水亏缺的补偿、恢复程度,因雨季降水量的不同而异。在丰水年和平水年,刺槐人工林地主要根系分布层土壤贮水增量较大,而下层则急剧减少、甚至出现负补偿。其中丰水年(年降水量达840.5mm,略高于当地历史最高降水量,6~10月降水量575.6mm)土壤贮水补偿深度仅280cm,贮水亏缺补偿度 $CSW$ 在0.66%~72.11%之间,0~320cm土层平均补偿度只有14.53%,即土壤贮水亏缺量的85.47%仍未得到补偿恢复;平水年(年降水量593.5mm,6~11月份降水量390.6mm)土壤贮水补偿深度只有240cm,贮水亏缺补偿度 $CSW$ 在4.89%~58.51%之间,240cm以下土层出现负补偿,即深层贮水有明显上移现象,以弥补生长期树木对水分的消耗需要。0~320cm土层雨季土壤贮水增量略小于丰水年,但平水年雨季初土壤贮水亏缺量小,故平均亏缺补偿度略大于丰水年,然而土壤贮水亏缺量的82.84%仍无法得以补偿恢复。枯水年(年降水量513.0mm,6~11月份降水量326.7mm)雨季过后,除0~40cm土层贮水略有增加外,40~320cm土层从上到下贮水增量均为负值,贮水亏缺补偿度在-0.67%~-9.35%之间,说明在枯水年刺槐人工林地土壤贮水不仅未能得到补偿与恢复,而且土壤贮水亏缺度进一步增大。0~320cm土层总贮水量减少

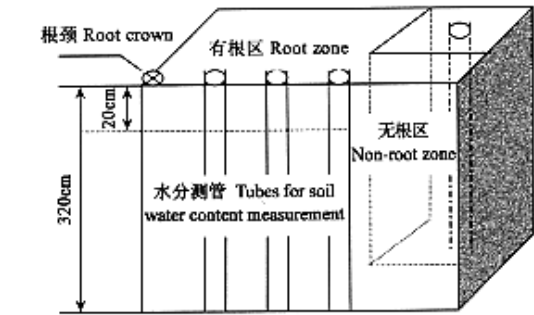


图1 人工林根区土壤水分动态定位监测点布设示意图  
Fig. 1 Schematic drawing of a cross section for measuring soil water dynamic distribution in planted forest site

17.09mm,出现负补偿。经成对数据比较统计检验<sup>[28]</sup>,除平水年与丰水年土壤贮水增量和贮水亏缺补偿度均无显著差异外( $P>0.05$ ),枯水年与平水年、枯水年与丰水年均有显著差异。

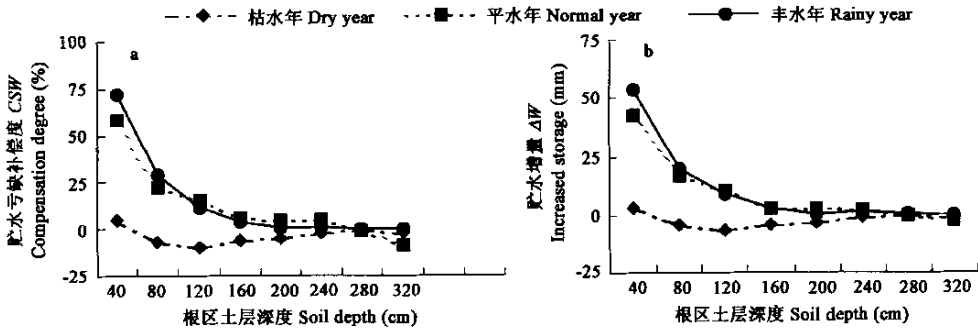


图2 不同降水年份人工林地土壤贮水亏缺补偿量与补偿度

Fig. 2 Compensation and rehabilitation of soil water storage deficit of plantation site at the end of rainy season in dry, normal and rainy years in sub-humid region

a 土壤贮水亏缺补偿度随土层深度变化 Relationship between CSW and soil depth; b 土壤贮水增量随土层深度的变化 Relationship between  $\Delta W$  and soil depth

从上述不同水文年雨季过后刺槐人工林地土壤贮水的补偿与恢复情况可以看出,在黄土高原降水条件较为优越的半湿润地区,雨季降水对土壤水分亏缺的补偿深度不超过 280cm,而土壤深层贮水的上移运行范围则超过 320cm。说明在自然条件下,人工林地土壤贮水亏缺将难以恢复。落叶阔叶林带尚且如此,森林草原和典型草原地带就可想而知。因此,单纯依赖天然降水,将难以使人工林地土壤水分亏缺状况得到改善,土壤干化现象也不可能有所缓解。

3.1.2 相同水文年不同树种人工林地土壤贮水亏缺的补偿与恢复 对 13 龄侧柏、油松、刺槐林分,平水年 0~320cm 土层贮水亏缺的补偿与恢复情况进行了测定(图 3)。从图中可以看出,平水年侧柏和刺槐林地土壤贮水亏缺的补偿深度相同,为 240cm,油松林地则在 200~240cm 之间。雨季过后土壤贮水亏缺补偿度因人工林树种和雨季初土壤贮水亏缺量的不同,而有较大差异。0~320cm 土层刺槐人工林地贮水亏缺补偿度 CSW 最高,为 17.16%;油松林地次之,为 14.57%;而侧柏林地则出现负补偿,其值 -6.32%。特别是 240~320cm 土层,尽管雨季末并未得到降水补偿,但其雨季初土壤深层贮水亏缺度相对较小,贮水量较大,因而在林木生长季节土壤水分大量向上运移,以补充其上部土层土壤贮水的消耗,致使雨季末贮水量大幅减少,贮水亏缺补偿度以侧柏最小,达 -55.71%~-103.92%;油松次之,在 19.76%~-29.87%之间;刺槐相对较大,其亏缺补偿度为 -0.43%~-8.05%。经成对数据比较检验,除油松与刺槐林地之间土壤贮水增量和贮水亏缺补偿度均无显著差异外( $P>0.05$ ),侧柏与油松、侧柏与刺槐林地之间均有显著差异。

3.2 人工林地土壤水分亏缺补偿的空间分布与根系对补偿的作用

土壤水分亏缺补偿是降雨入渗补给与系统耗水共同作用的结果。由于林内降水分布和土壤中有效根系分布的不均匀性,根区土壤水分的空间分布必然存在差异。弄清根区土壤水分补偿的空间分布特点及根系在土壤水分补偿与恢复中的作用,有助于采取合理的措施,促进根区土壤干层的恢复。

表 1 是 2000 年雨季初(6 月 1 日)和雨季末(11 月 30 日)各林分有根区和无根区土壤水分增量与降雨补偿度的空间分布状况。从表 1 可以看出,林地土壤水分亏缺补偿在空间上具有不均匀性。从水平方向看,无论是刺槐、侧柏、还是油松,距树干基部 30cm 处水分增量和亏缺补偿度均最高。特别是上部 0~200cm 土层内,随着离树干距离的加大,补偿度逐渐降低。其中刺槐、侧柏、油松均以 90cm 处最低。其原因可能与树干茎流在根茎附近汇集有关。有根区水分亏缺补偿度与无根区相比,除刺槐 30cm 处显著高于无根区外( $P<0.05$ ),其余各水平位点补偿度之间虽有显著差异,且多数低于无根区,但与无根区之间并无显著差异( $P>0.05$ );而侧柏、油松、有根区水分亏缺补偿度则显著小于无根区( $P<0.05$ )。说明由于根系吸收和蒸发,使有根区土壤水分亏缺度增大,从而降低了天然降水对土壤水分亏缺的补偿作用,补偿度相应降低。

从垂直方向来看,刺槐林地土壤水分亏缺补偿度从上到下迅速减小,到 280cm 以下则出现负补偿;侧柏水分亏缺补偿度峰值出现在 120~240cm 之间,240cm 以下土层出现严重的负补偿现象,特别是 280~320cm 土层,负补偿度高达 -103.92%~-121.4%,说明尽管雨季侧柏林地 240cm 以上土层、土壤贮水亏缺得到不同程度补偿,但深层土壤贮水的上行运移非常活跃,其上移补给量超过数据土层本身的亏缺量。据分析,造成这一现象的原因,主要是林地下部土层(280~320cm)雨季初土壤贮水亏缺度较低,刺槐 26.9%~29%,侧柏 23.78%~26.51%,油松 38.34%~39.21%,而上部土层土壤贮水亏缺度 DSW 却很高,刺



槐达67.5%~68.3%,侧柏为55.91%~58.69%,油松60.42%~61.74%,进入雨季后林木根系吸水及蒸腾耗水加剧,而天然降水在补偿上部土层贮水亏缺后,尚无富余水分继续向下运移补偿,土层中、下部出现一个相对干燥(水势较低)层次,从而下部土层水分不断向这一水势相对较低的层次移动。其结果是下部土层土壤贮水亏缺量进一步加大,出现较高的负补偿现象。由此可以看出,在黄土高原南部降水量相对较高的半湿润落叶阔叶林地带,进行有关土壤水量平衡及蒸散量的计算,仅以3m以上土层的土壤水分动态监测资料为基础,其计算结果的精确度将难以保证。同时,由于林分内不同水平位点土壤贮水亏缺度及亏缺补偿度存在较大差异。因此,传统的一维垂向土壤水分观测结果,同样难以保证研究结果的准确性和科学性。

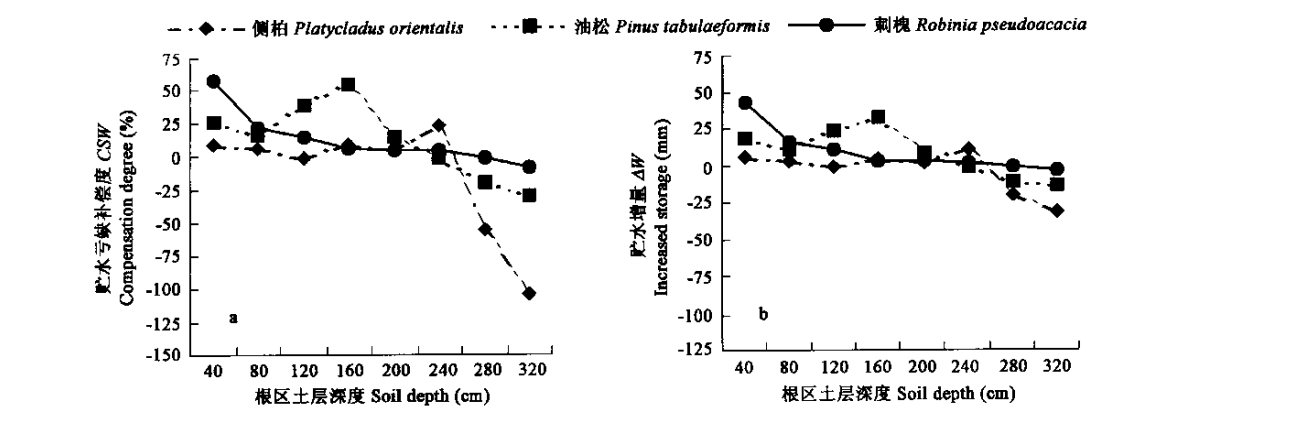


图3 相同降水年份不同人工林地土壤贮水亏缺补偿量与补偿度

Fig. 3 Compensation and rehabilitation of soil water storage deficit of different plantation site at the end of rainy season in sub-humid region

a 土壤贮水亏缺补偿度随土层深度变化 Relationship between CSW and soil depth; b 土壤贮水增量随土层深度的变化 Relationship between  $\Delta W$  and soil depth

表1 雨季末人工林地土壤水分增量与亏缺补偿度的空间分布

Table 1 The spatial distribution on increment and compensation degree of soil water storage deficit at different plantation site after the rainy season in sub-humid region of Loess Plateau

土层厚度(cm) Depth of soil	水分增量/亏缺补偿度	刺槐有根区				无根区	侧柏有根区			无根区	油松有根区			无根区
	Soil water recruitment and compensation degree	Root zone of <i>Robinia pseudoacacia</i>				Non-root zone	Root zone of <i>Platycladus orientalis</i>			Non-root zone	Root zone of <i>Pinus tabulaeformis</i>			Non-root zone
		30cm <sup>#</sup>	60cm	90cm	120cm		30cm	60cm	90cm		30cm	60cm	90cm	
0~40	$\Delta W$ (mm)	55.96	47.6	42.76	46.86	49.1	6.90	5.88	5.86	8.32	18.90	18.30	18.58	32.26
	CSW(%)	74.25	65.66	58.51	64.89	65.31	11.0	9.26	8.90	13.74	27.17	25.75	26.31	43.90
40~80	$\Delta W$ (mm)	40.32	20.08	16.60	17.0	25.34	2.82	0.20	3.58	6.08	15.26	15.22	10.62	21.22
	CSW(%)	56.57	27.87	22.48	23.86	34.66	4.69	0.34	5.92	10.63	24.19	24.38	16.70	35.10
80~120	$\Delta W$ (mm)	19.24	12.34	10.90	10.14	11.54	3.92	2.16	-0.32	4.12	26.48	24.58	23.90	27.02
	CSW(%)	26.41	17.32	15.42	14.56	15.92	6.99	3.83	-0.57	7.72	42.79	40.71	38.67	45.02
120~160	$\Delta W$ (mm)	5.88	5.34	3.18	4.18	4.94	13.20	14.12	5.0	11.86	35.36	33.31	32.70	35.64
	CSW(%)	10.83	9.73	6.21	7.89	8.88	25.66	25.17	9.52	24.24	60.91	57.25	54.98	60.18
160~200	$\Delta W$ (mm)	2.80	2.18	2.64	2.84	2.16	3.44	4.78	2.16	8.52	17.82	16.64	8.26	18.44
	CSW(%)	5.68	4.42	5.41	5.52	4.35	7.23	9.72	4.37	20.43	31.19	28.80	14.10	32.99
200~240	$\Delta W$ (mm)	2.74	2.82	2.30	3.60	1.52	-3.16	3.62	11.06	23.98	24.88	16.36	-0.76	25.62
	CSW(%)	5.46	5.71	4.89	7.14	2.99	-7.27	8.39	23.13	62.81	45.04	29.35	-1.39	48.80
240~280	$\Delta W$ (mm)	2.50	1.30	-0.18	3.02	3.28	-28.34	-20.40	-20.40	6.96	-3.74	-8.96	-10.88	3.16
	CSW(%)	5.71	2.86	-0.43	5.99	7.10	-80.65	-55.71	-55.71	20.86	-7.13	-16.48	-19.76	-6.11
280~320	$\Delta W$ (mm)	-3.04	-1.88	-2.68	0.36	-4.28	-33.36	-32.9	-31.84	-12.14	-15.02	-19.82	-13.90	-8.82
	CSW(%)	-9.85	-6.10	-8.05	0.91	-14.54	-121.40	-119.12	-103.92	-41.38	-33.01	-43.26	-29.87	-19.30

<sup>#</sup> 距树干水平距离 Horizontal distance far away stem

4 结论与讨论

4.1 通过定位观测并引入土壤水分亏缺补偿度指标,对黄土高原半湿润落叶阔叶林带不同水文年、不同林分种类人工林地,雨季过后土壤贮水的补偿与恢复情况进行了分析。结果表明,即使在水分环境较好的落叶阔叶林带,丰水年土壤贮水亏缺补偿深

度仅 280cm,而深层贮水上移范围超过 320cm,0~320cm 土层雨季平均土壤贮水亏缺补偿度只有 14.53%;平水年土壤贮水亏缺补偿深度仅 220~240cm;枯水年补偿深度仅 40cm,0~320cm 土层贮水量减少 17.09mm,水分亏缺程度加剧。在自然条件下,单纯依赖于天然降水,人工林地土壤贮水亏缺状况将难以恢复。

**4.2 雨季人工林地土壤贮水亏缺的补偿与恢复具有明显的空间分布规律。**垂直方向土壤贮水亏缺补偿度因林分类型不同而异,但水平方向均随着距主干距离的增加而减小。无根区与有根区相比,平水年补偿深度增加 40cm 左右,补偿度因林分类型而异。其中侧柏、油松有根区贮水亏缺补偿度均小于无根区,而刺槐除距离树干 30cm 处大于无根区外,其余各位点大多小于无根区。表明林木根系的存在,削弱了天然降雨对土壤水分亏缺的补偿作用。

**4.3 在黄土高原南部降水量相对较高的半湿润落叶阔叶林地带,进行有关土壤水量平衡及蒸散量的计算,仅以 3m 以上土层的土壤水分动态监测资料为基础,其计算结果的精确度将难以保证。同时,由于林分内不同水平位点土壤贮水亏缺度及亏缺补偿度存在较大差异。因此,传统的一维垂向土壤水分观测结果,同样难以保证研究结果的准确性和科学性。**

## References:

- [1] Yang W Z. A trial zonation of soil water regime in the Loess Plateau and problems of forestation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1981, **1** (2): 13~19.
- [2] Yang X M, Yang W Z. A preliminary study on the soil water balance of artificial forestland in loess-hilly region. *Scientia Silvae Sinicae*, 1989, **25**(6): 549~553.
- [3] Li Y S. The properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the Loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, **3** (2): 91~101.
- [4] Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern region of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, **32**(1): 78~84.
- [5] Wang L, Shao M A, Hou Q C, *et al.* The analysis to dried soil layer of artificial *Robinia pseudacacia* forestry land in the Yanan Experimental Area. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2001, **21**(1): 101~106.
- [6] Hou Q C, Han R L. A preliminary study on dried soil layer problem of plantation site and grassland in Loess Plateau. *Water and Soil Conservation of China*, 1999, (5): 26~29.
- [7] Mu X M, Xu X X, Wang W L, *et al.* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on loess plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(2): 211~217.
- [8] Wang K Q, Wang B R. The initial studies on afforestation by water-harvesting to prevent soil desiccation of artificial plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 1998, **34**(4): 14~21.
- [9] Yang W Z, Ma Y X, Han S F, *et al.* Soil water ecological regionalization of afforestation in Loess Plateau. *J. of Water and Soil Conservation*, 1994, **8**(1): 1~9.
- [10] Wu Q X, Yang W Z. *Forest and grassland vegetation construction and its sustainable development in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1998.
- [11] Sun C Z, Huang B L. A study on the available water potertialities'Brought by stand itself" in the loess plateau forest land——A new hypothesis developed. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, **19**(5): 614~621.
- [12] Wang M B, Li H J. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantation in the loess plateau region in northwestern Shanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(2): 178~184.
- [13] Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest ecosystem in Loess area. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, **32**(4): 289~296.
- [14] Yu X X, Chen L H. A study on water balance of protective forest ecosystem in loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(3): 238~245.
- [15] Liu Z W, Yu Q Z and Wang J X. Water trends of young regenerated forestlands of black locust on gully slop. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(3): 234~238.
- [16] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Studies on hydro-ecological effects of artificial Chinese pine stand in loess plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(2): 376~379.
- [17] Huang M B, Kang S Z, Li Y S. Evolution of moisture environment of small watershed in gully region of Loess Plateau. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, **10**(4): 411~414.
- [18] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 741~747.
- [19] Crave A, Gascuel-odux C. The influence of topography on the time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological*

*Processes*,1997,**11**:203~210.

[20] Wullschlegler S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiol.* , 1998,**18**: 499~512.

[21] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, *et al.* The redistribution of soil water by tree root systems. *Oecologia*,1998,**115**: 306~311.

[22] Le R X, Bariac T, Mariotti A. Spatial partitioning of the soil water resources between grass and shrub components in a West African humid savanna. *Oecologia* , 1995,**104**: 147~155.

[23] Moreira M A, Sternberg L S L, Nepstad D C. Vertical patterns of soil water uptake by plants in a primary forest and an abandoned pasture in the eastern Amazon: an isotopic approach. *Plant and Soil* , 2000,**222**: 95~107.

[24] Stratton L C, Goldstein G, Meinzer F C. Temporal and spatial partitioning of water resources among eight woody species in a Hawaiian dry forest. *Oecologia* , 2000,**124**: 309~317.

[25] Teskey R O, Sheriff D W. Water use by *Pinus radiata* trees in a plantation. *Tree Physiol.* , 1996,**16**: 273~279.

[26] Sun C Z, Huang B L. The establishment of a single-tree water balance measurement method. *Scientia Silvae Sinicae*,1996,**32**(4):378~381.

[27] Zhang Y Z, Li B Q. Influence of soil water content on replenishing soil moisture reserve of rainfall infiltration. In: Liu C M, Ren H Z. *Air, surface, soil and ground water interactions—Experiment and calculation analysis*. Beijing: Science Press, 1988. 260~274.

[28] Bai H Y, Xiao J Z. *Experimental design and statistical analysis*. Xi'an: Xi'an Sub-branch of World Publish House, 1998. 101~107.

参考文献:

[ 1 ] 杨文治. 黄土高原土壤水分状况分区(试拟)与造林问题. 水土保持通报,1981,**1**(2):13~19.

[ 2 ] 杨新民,杨文治. 黄土丘陵区人工林地土壤水分平衡初探. 林业科学,1989,**25**(6):549~553.

[ 3 ] 李玉山. 黄土区土壤水分循环及其对陆地水分循环的影响. 生态学报,1983,**3**(2):91~101.

[ 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 ] 王力,邵明安,侯庆春,等. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析. 西北植物学报,2001,**21**(1):101~106.

[ 6 ] 侯庆春,韩蕊莲. 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):26~29.

[ 7 ] 穆兴民,徐学选,王文龙,等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报,2003,**40**(2):211~217.

[ 8 ] 王克勤,王斌瑞. 集水造林防止人工林植被土壤干化的初步研究. 林业科学,1998,**34**(4):14~21.

[ 9 ] 杨文治,马玉玺,韩仕峰,等. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究. 水土保持学报,1994,**8**(1):1~9.

[10] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原人工植被建设与持续发展. 北京:科学出版社,1998.

[11] 孙长忠,黄宝龙. 黄土高原“林分自创性”有效水分供给体系的研究. 生态学报,1999,**19**(5):614~621.

[12] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究. 生态学报,1995,**15**(2):178~184.

[13] 余新晓,张建军,朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学,1996,**32**(4):289~296.

[14] 余新晓,陈丽华. 黄土地区防护林生态系统水量平衡研究. 生态学报,1996,**16**(3):238~245.

[15] 刘增文,余清珠,王进鑫. 黄土高原残塬沟壑区坡地刺槐不同皆伐更新幼林地土壤水分动态. 生态学报,1997,**17**(3):234~238.

[16] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应. 生态学报,1996,**23**(2):376~379.

[17] 黄明斌,康绍忠,李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究. 应用生态学报,1999,**10**(4):411~414.

[18] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析. 生态学报,2000,**20**(5):741~747.

[26] 孙长忠,黄宝龙. 单株平衡法的建立. 林业科学,1996,**32**(4):378~381.

[27] 张永忠,李宝庆. 土壤水分含量对降雨入渗补给系数的影响. 见:刘昌明,任鸿遵主编. 水量转换实验与计算分析. 北京:科学出版社, 1988. 260~274.

[28] 白厚义,肖俊璋. 试验研究及统计分析. 西安:世界图书出版西安公司,1998. 101~107.