

DOI: 10.5846/stxb201306101568

陈金平, 兰再平, 杨慎骄, 张笑培, 孙尚伟, 武鹏举. 黄河故道不同灌水方式刺槐人工林幼树水分利用效率和生长特性. 生态学报, 2015, 35(8): 2529-2536.

Chen J P, Lan Z P, Yang S J, Zhang X P, Sun S W, Wu P J. Water use efficiency and growth characteristics of young trees of *Robinia pseudoacacia* plantation forest under different irrigation methods in old course of Yellow river area. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2529-2536.

黄河故道不同灌水方式刺槐人工林幼树水分利用效率和生长特性

陈金平^{1,2,*}, 兰再平³, 杨慎骄^{1,2}, 张笑培^{1,2}, 孙尚伟³, 武鹏举^{1,2}

1 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002

2 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站, 商丘 476000

3 中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300

摘要: 干旱一直是限制黄河故道沙区树木生长的重要因素之一, 而刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 以其较强的耐旱性、较高的成活率在造林时备受重视。适宜的灌水方式不但可以提高当地水资源的高效利用, 而且可以促进刺槐迅速生长, 改善当地环境生态。因此, 在 2011 至 2012 年间, 对黄河故道沙地进行刺槐人工林的建设与培育, 开展滴灌 (DI)、沟灌 (FI) 和软管喷灌 (HSI) 3 种灌水方式对刺槐人工林幼树水分利用效率 (WUE) 和生长特性影响的研究。结果表明, 在不同的水文年份, 滴灌刺槐的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 高于软管喷灌, 软管喷灌高于沟灌。水分利用效率受年份影响较大, 但均表现为前期下降, 8 月份前后降到最低值, 随后缓慢回升。不同灌水方式叶绿素含量 (CC) 差异显著, 滴灌条件下刺槐叶绿素含量最高, 其次为软管喷灌, 沟灌最低。不同树龄, 不同灌水方式刺槐株高、地径和胸径差异显著。一年生林, 滴灌刺槐的株高、地径和胸径分别比软管喷灌高出 23.4、0.27 cm 和 0.14 cm; 二年生林, 滴灌刺槐的株高、地径和胸径分别比软管喷灌高 53.7 cm、0.61 cm 和 0.54 cm。滴灌刺槐的株高、地径和胸径的年度生长量分别为软管喷灌的 112.1%、107.1% 和 111.8%, 同时分别为沟灌的 121.8%、191.8% 和 343.6%。不同灌水方式刺槐幼树水分利用效率受年间气象因素影响较大, 滴灌可以显著地改善刺槐幼树的光合生理特性, 促进其快速生长。

关键词: 刺槐; 灌水方式; 水分利用效率; 生长特性; 黄河故道

Water use efficiency and growth characteristics of young trees of *Robinia pseudoacacia* plantation forest under different irrigation methods in old course of Yellow river area

CHEN Jinping^{1,2,*}, LAN Zaiping³, YANG Shenjiao^{1,2}, ZHANG Xiaopei^{1,2}, SUN Shangwei³, WU Pengju^{1,2}

1 Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China

2 National Research and Observation Station of Shangqiu Agro-ecology System, Shangqiu 476000, China

3 Forestry Experiment Center of North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China

Abstract: Drought is one of the important factors that limits the growth of trees in the sand of old course of Yellow river area, so the black locust (*Robinia pseudoacacia*) has been getting attention in the last several years, for its stronger drought resistance and higher survival rate in forestation. Appropriate irrigation methods not only can promote the efficient utilization of local water resource and the growth of plants quickly, but also improve the local ecological environment. This project was

基金项目: 国家公益性行业(林业)科研专项经费项目(201104018)

收稿日期: 2013-06-10; 网络出版日期: 2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenjp72@126.com

held in 2012 and 2013 years, in order to find the optimal irrigation method for black locust young trees. Plants were subjected to three irrigation methods: drip irrigation (DI), furrow irrigation (FI) and hose sprinkler irrigation (HSI). The plot area of each treatment was 1334 m², and the plant spacing was 3 m×4 m. The results showed that in different hydrological years, the net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (Tr) of plants under DI both higher than that under HSI, as well as that under HSI than FI. Water use efficiency (WUE) was greatly influenced by the different hydrological years, characterized by early fall, down to the lowest in August and then slowly rose again. There were significant differences in the chlorophyll content (CC) of young trees between different treatments. The CC of plants under DI was highest, followed by which under HSI, and which under FI was minimal. For different ages, there were significant differences in plant height, ground diameter and diameter breast height of young trees between different irrigation methods. In 2011, the plant height, ground diameter and diameter breast height of young trees under DI were 23.4 cm, 0.27 cm and 0.14 cm higher than that under HSI, respectively. In 2012, the plant height, ground diameter and diameter breast height of young trees under DI were 53.7 cm, 0.61 cm and 0.54 cm separately higher than that under HSI. The annual growth of plant height, ground diameter and diameter breast height of young trees under DI were 112.1%, 107.1% and 111.8% of that under HSI, at the same time were 121.8%, 191.8% and 343.6% of that under FI, respectively. The WUE of young trees under different irrigation methods was greatly influenced by the meteorological factors of different years. DI can significantly improve photosynthetic physiological characteristics of black locust sapling, and promote the rapid growth of them.

Key Words: *Robinia pseudoacacia*; irrigation method; water use efficiency; growth characteristics; old course of Yellow river

刺槐为豆科蝶形花亚科刺槐属木本植物。在我国,目前刺槐的人工栽培面积已达 150 万 hm² 以上,是深受喜爱的“乡土化”树种,并出现了很多栽培类型。作为水土治理的优良树种,具有生长迅速、耐旱性强和氮库增容的特性^[1-3],更具生态意义的是其强大的碳汇作用^[4]。刺槐同时也是很好的绿化苗木品种、良好的蜜源植物、优良材源的重要补充,其种籽资源、生态生理特性等的研究,一直受到国内外学者的重视^[5-15]。

黄河故道处于黄、淮之间,由西向东绵延数百公里,故道两侧十余公里,主要为高滩沙地、中低产盐碱地和低洼积水易涝渍地 3 种土地类型。多年以来,随着国家的大力治理与开发,故道环境生态已经得到了显著的改善,并产生了重要的社会和经济价值。刺槐作为水土保持、改良土壤环境的主要种植树种,被广泛地栽培在故道区域,形成了面积大小不一、林农交错的刺槐林带。目前成林、出材的刺槐多为二、三十年前种植,品种老化、生长势弱,甚至停止生长。近年来,随着我国经济、社会现代化的迅速发展,以及人们生活、居住环境的提高,对于各种优质木材的需求有着显著的增加,而国际上东南亚、日本、印度等对我国优质木材的出口限制,以及国内优质树种材源的枯竭,都对国内优质良材树种的栽培提出了迫切的要求。刺槐从材质、用途等方面均是我国优质材源的重要补充,同时对于黄河故道区域的社会、经济发展以及环境生态的进一步改善都具有重要的作用。

但是,干旱一直是限制刺槐生长的重要因素之一,年平均蒸散量远远大于降雨量,水资源短缺的问题日益突出。因此,灌溉成为保证刺槐人工林栽培的必要措施。采取适宜的灌水方式,提高水分利用效率,促进水资源高效利用和刺槐迅速生长,成为当地急需解决的问题。本研究以黄河故道区域为地理背景,开展了不同灌水方式对刺槐人工林幼树水分利用效率和生长特性的影响研究,旨在为相关区域刺槐人工林建设和培育过程中的灌水技术应用提供必要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区自然条件

试验区位于河南省民权县黄河故道北侧高滩沙地申甘林带(115°06'34"E,34°42'46"N),海拔 68 m,属暖

温带季风气候。年平均气温 14.1 °C,无霜期 213 d,全年太阳辐射量为 4727.92—5104.18 MJ/m²,有效辐射量为 2301.20—2510.40 MJ/m²,年平均降水量为 652—874 mm,雨日 27—34 d,年平均蒸发量 1800 mm 左右,干旱指数 1.43。2011 年和 2012 年刺槐主要生育期的日平均气温、平均地表温度、日光合有效辐射和降雨量见图 1。

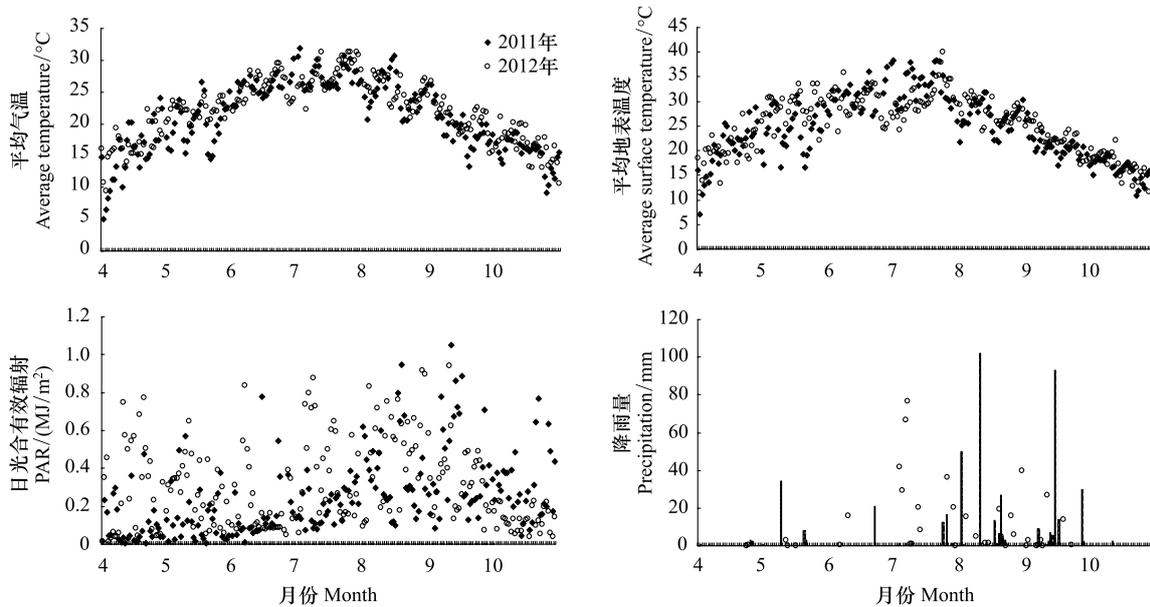


图 1 试验区刺槐生长期平均气温、平均地表温度、日光合有效辐射和降雨量变化特征

Fig.1 Variation characteristics of daily mean temperature, daily mean surface temperature, daily photosynthetic active radiation and precipitation during growth period of black locust

1.2 试验材料和试验设计

试验于 2011 年 4 月上旬进行土地整理,4 月中、下旬开展项目区 20 hm²刺槐造林工作,刺槐品种选择窄冠刺槐,采取截干造林的方法,种植前刺槐苗木留干 15 cm。靠近井部水源处,分别建设滴灌区、沟灌区和软管喷灌区,每个灌溉试验区均为 1334 m²,株行距为 3 m×4 m。根据试验区土壤水分条件,连续 2a,分别于 5 月上旬、6 月中旬、7 月上旬和 8 月上旬进行灌水试验,灌水定额均为 80 mm。

1.3 测定方法

于刺槐生长期的不同月份,使用 LI-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)测定不同灌水方式区刺槐冠层中部南侧功能叶片的净光合速率(P_n , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),并据此计算瞬时水分利用效率, $\text{WUE} = P_n/T_r$ 。

同时使用 TYS-A 叶绿素测定仪(浙江 TOP 公司)测定叶绿素含量,叶片选取位置与光合相同。并于每年刺槐生长结束后(11 月中、下旬)使用折尺测量株高,游标卡尺测量地径、胸径,每个处理小区测量株数为 120 株。年度生长量为当年的株高、地径和胸径与上一年度株高、地径和胸径的差值。

1.4 数据分析

用 SPSS Statistics 17.0(SPSS for Windows, version 17.0, Chicago, Illinois)进行方差分析,比较各参数在不同灌水方式下的差异,具有显著差异的进行多重比较并进行字母标记。用 Microsoft Excel 2003 软件进行制表和绘图,图、表中的数据均以平均值±标准偏差(mean±SD)表示。

2 结果与分析

2.1 不同灌水方式刺槐幼树水分利用效率

刺槐叶片水平瞬时水分利用效率不仅受到林地土壤水分条件的影响,还受到林间冠层气象要素的限制。

图 2 为 2011、2012 年 6—10 月间,滴灌、沟灌和软管喷灌刺槐的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率。可以看出,对于不同的水文年份,3 种不同灌水方式刺槐的净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率,在年度内生育期的变化趋势基本保持一致。其中净光合速率、蒸腾速率表现为逐步增加,8—10 月份达到最大值,随后下降。水分利用效率则表现为逐步下降,8 月份前后降到最低值,随后缓慢回升。这说明,虽然不同年份水文条件有所差异,但总体年内气候变化趋势相似,因此决定了 3 种不同灌水方式刺槐不同年份间瞬时水分利用效率变化趋势的一致性。

2011 年生育期内,滴灌刺槐净光合速率、蒸腾速率明显高于沟灌和软管喷灌,具体表现为滴灌>软管喷灌>沟灌,但软管喷灌与沟灌之间差别较小,同时 3 种灌水方式的水分利用效率差别不明显。2012 年度生育期内,3 种灌水方式的净光合速率、蒸腾速率大小表现规律与 2011 年保持一致,但从数值上看,软管喷灌的净光合速率、蒸腾速率更接近于滴灌,并明显大于沟灌。8 月份以前,3 种灌水方式的水分利用效率随着生育进程迅速下降,具体表现为滴灌>软管喷灌>沟灌,8 月份以后,不同灌水方式的水分利用效率缓慢回升,并最终表现为软管喷灌和沟灌的水分利用效率略高于滴灌。可见,在相对少雨偏旱的春末夏初时段,不同灌水方式的刺槐水分利用效率均表现较高,但随着雨水的逐步增多,则呈下降趋势;越是在缺雨偏旱的时期,滴灌刺槐越表现为较高的水分利用效率,随着雨水的增多和根区土层贮水量的增加,其水分利用效率反而不及软管喷灌和沟灌刺槐。

2.2 不同灌水方式刺槐幼树叶绿素含量

叶绿素含量是绿色植物生长状况的指标性参数,适宜的生长环境、高效的水肥管理措施均能促进叶绿素含量的提高。表 1 显示,不同灌水方式显著影响了刺槐叶绿素含量。在 6、8 月份,滴灌刺槐叶绿素含量显著高于沟灌和软管喷灌,沟灌和软管喷灌之间差异不显著;在 9、10 月份,滴灌和软管喷灌刺槐叶绿素含量显著高于沟灌,但滴灌和软管喷灌刺槐叶绿素含量之间的差异不显著。由此说明,在年度内刺槐生长的不同阶段,气候因素、水文条件和叶龄影响了叶绿素的变化趋势,同时不同的灌水方式则影响了叶绿素含量的高低。滴灌和软管喷灌能够在较长的生育阶段,使刺槐叶片的叶绿素含量维持在较高的水平,从而更有利于树木快速生长。

对于年度内不同生育期,3 种灌水方式刺槐叶绿素含量均表现为随着生育进程逐步升高,9 月份达到一年中的最大值,随后明显下降。

表 1 不同灌水方式对刺槐幼树叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of different irrigation methods on the chlorophyll content of black locust young trees

灌溉方式 Irrigation methods	月份 Months				
	6	7	8	9	10
滴灌 Drip irrigation	36.9±3.3aA	37.4±2.5aA	38.7±1.6aA	41.2±3.2aA	38.5±1.7aA
沟灌 Furrow irrigation	34.5±2.7bA	36.2±3.0aA	36.3±4.1bA	38.3±1.9bB	36.3±2.1bA
软管喷灌 Hose sprinkler irrigation	34.7±2.4bA	36.7±4.2aA	36.9±2.3bA	39.8±2.8aA	37.2±3.5aA

表中数据后不同小写字母表示不同灌水方式间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)

2.3 不同灌水方式刺槐幼树生长量

刺槐幼树的生长势,是苗木质量、环境因素和后期水肥管理水平的综合体现。表 2 表明,在不同年份,滴灌、沟灌和软管喷灌刺槐的株高、地径和胸径均有显著差异。具体表现为滴灌刺槐的株高、地径和胸径显著高于软管喷灌,软管喷灌显著高于沟灌。2011 年,滴灌刺槐的株高、地径和胸径分别比软管喷灌高出 23.4、0.27 cm 和 0.14 cm;2012 年,滴灌刺槐的株高、地径和胸径分别比软管喷灌高 53.7、0.61 cm 和 0.54 cm。刺槐幼树的年度生长量,则更多表现为后期水肥管理水平的高低。3 种不同灌水方式刺槐年度生长量也具有显著差异。不同灌水方式下,刺槐株高、地径和胸径的年度生长量均表现为滴灌显著大于软管喷灌,软管喷灌显著大于沟灌。具体表现为滴灌刺槐的株高、地径和胸径的年度生长量分别为软管喷灌的 112.1%、107.1% 和 111.8%,同时分别为沟灌的 121.8%、191.8% 和 343.6%。由此可见,试验中在肥料水平保持一致的条件下,刺

槐幼树的年度生长量差异主要是因为灌水方式的不同。在 3 种不同的灌水方式中,滴灌显著地促进了刺槐的年度生长量。

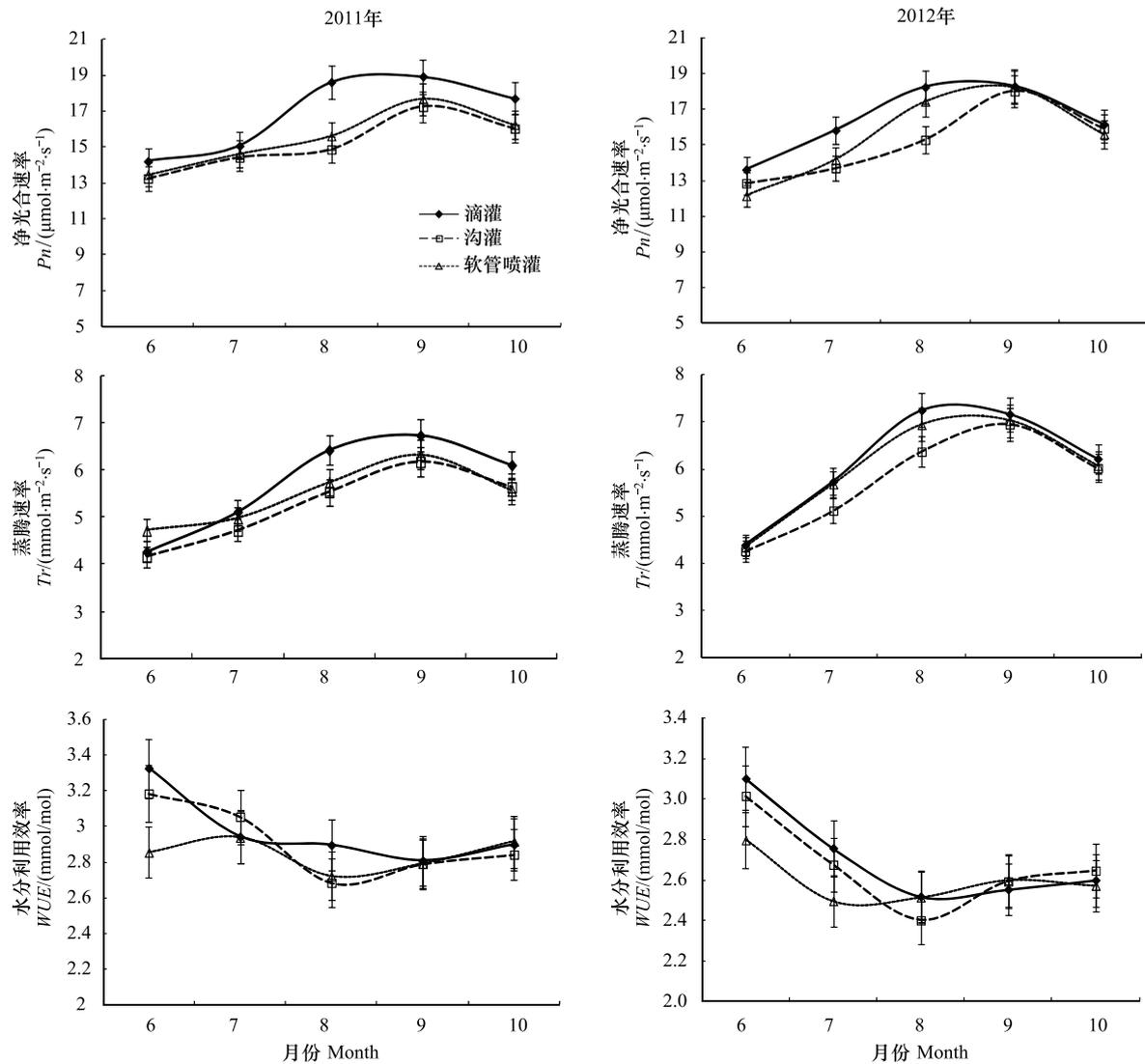


图 2 不同年份不同灌水方式对刺槐幼树水分利用效率的影响

Fig.2 Effects of different irrigation methods on the water use efficiency of young trees of black locust in different years

表 2 不同灌水方式对刺槐幼树生长和年度生长量的影响

Table 2 Effects of different irrigation methods on the growth and annual growth of black locust young trees

年份 Years	灌溉方式 Irrigation methods	株高 Plant height/cm	地径 Ground diameter/cm	胸径 Chest height diameter/cm
2011	滴灌	193.3±8.4aA	2.79±0.47aA	1.48±0.26aA
	沟灌	111.4±12.7cB	1.57±0.34cB	1.03±0.17cC
	软管喷灌	169.9±7.6bA	2.52±0.41bA	1.34±0.11bA
2012	滴灌	474.3±19.2aA	7.93±0.66aA	5.26±0.22aA
	沟灌	342.1±14.9cB	4.25±0.53cB	2.13±0.31cB
	软管喷灌	420.6±13.4bA	7.32±0.21bA	4.72±0.34bA
年度生长量 Annual growth/cm	滴灌	281.0±10.8aA	5.14±0.58aA	3.78±0.15aA
	沟灌	230.7±11.2cB	2.68±0.44cB	1.10±0.21cB
	软管喷灌	250.7±9.7bA	4.80±0.16bA	3.38±0.35bA

3 讨论

不同的灌水方式,对刺槐幼树的光合、蒸腾、水分利用效率、叶绿素含量以及生长量产生显著的差异。究其原因,在于不同的灌水系统首先影响了水分在树木根区的分布与再分布。滴灌、沟灌和软管喷灌的水分入土方式不同^[16-20],因此营造了不同的根区土壤水分环境,并从而影响了根系的吸水与运输效率。如郑强卿^[16]研究指出,滴灌条件下沙地 20 cm 以上土层含水率受到降雨和灌水量的影响,因此变化幅度最大。停止灌水后水分发生再分布,水平方向水分主要分布在 0—30 cm 土壤。这样的水分再分布特性,有利于植物根系的吸收与利用。软管喷灌是更接近于刺槐种植行向的改良的喷灌方法,本项试验研究中,采用的是多孔出流软管置于两行刺槐中间的喷灌方式。有研究指出,在喷灌条件下,0—40 cm 土层土壤含水率明显受到灌水量的影响,植物耗水量也随着灌水量增加而增加。同时棵间蒸发量随着灌水量的增大而增大,但棵间累积蒸发与耗水量之比则呈下降趋势^[17]。目前,在刺槐林木栽培的生产实践中,大多还是采用茎部地表沟灌的方式。吕殿青^[20]研究了沟灌条件下的水分再分布,指出在相同的土层,沟内的含水率要大于平地畦灌;在相同的入渗水量时,沟内的含水率也大于平地畦灌。本试验中,每次沟灌水分均从茎部地表条形沟的小范围区域快速下渗,而刺槐根系分布较广,吸水功能较强的毛根等多分布于根区外侧 30—40 cm 深的土层中,这可能是影响刺槐对沟灌水分利用的主要原因之一。另外,不同灌水方式的灌溉水在地表的初次分布差异,直接形成了树木冠层温度、湿度等小气候的不同,并进一步影响到叶片气孔的气体交换行为和对光合同化能力的差异。

相对于叶片水平的瞬时水分利用效率,以产量和耗水量计算得出的水分利用效率更能体现出不同灌水方式对促进植物高效用水的作用,因为光合同化的产物在很大程度上并不能全部作为生长量的积累而存在,相当一部分在呼吸作用和对衰老器官的补偿中消耗掉。但是叶片水平瞬时水分利用效率很大程度上体现了植物对碳源的同化潜力,也从侧面说明了植物生长环境的优劣^[21]。本试验结果,充分证明了滴灌对刺槐幼树光合潜力的促进作用,而滴灌条件下叶绿素含量的增加,也证明了滴灌对刺槐幼树生长的促进作用。本试验也同时说明,刺槐叶片水平的瞬时水分利用效率受年际间气象因素的影响较大。目前,对于叶片水平瞬时水分利用效率的研究,更多的集中于对植物生理生态特性的研究中^[21-24]。Gerampinis^[21]指出,适度的水分胁迫,降低了叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量,但增加了叶片磷、钙、镁、锌等离子的浓度,瞬时水分利用效率有所提高。而对于产量水平水分利用效率的研究,则主要是集中在栽培因素对作物产量的影响方面^[25-28]。Veeraputhiran^[28]研究指出,地下滴灌灌溉施肥的甘蔗栽培措施,取得节水 30.7% 的试验结果,同时产量水平水分利用效率为每公顷 65.8 kg/mm,比传统栽培水平的每公顷 34.8 kg/mm 具有显著的提高。在本试验中,由于刺槐正处于前 2a 的幼树生长阶段,因此采用了叶片瞬时水分利用效率指标来进行研究。

累积生长量是苗木质量、土壤环境、水肥条件、气候因素等对树木生长的综合反映,而年度生长量,则更多表现为后期栽培管理水平对树木的影响。试验中,滴灌刺槐的株高、地径和胸径的年度生长量分别为软管喷灌的 112.1%、107.1% 和 111.8%,同时分别为沟灌的 121.8%、191.8% 和 343.6%,表明在其它栽培要素保持一致的情况下,滴灌显著地促进了刺槐幼树的生长。因此,选择适宜的灌水方式,对于刺槐生态林和刺槐用材林的快速建设与培育而言,均具有重要的促进作用。

参考文献 (References):

- [1] Burner D M, Pote H, Ares A. Management effects on biomass and foliar nutritive value of *Robinia pseudoacacia* and *Gleditsia triacanthos* f. *inermis* in Arkansas, USA. *Agroforest Systems*, 2005, 65(3):207-214.
- [2] Wei G H, Chen W M, Zhu W F, Chen C, Young J P W, Bontemps C. Invasive *Robinia pseudoacacia* in China is nodulated by *Mesorhizobium* and *Sinorhizobium* species that share similar nodulation genes with native American symbionts. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, 68(3):320-328.
- [3] Dini-Papanastasi O. Effects of clonal selection on biomass production and quality in *Robinia pseudoacacia* var. *monophylla* Carr. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(4):849-854.
- [4] Zheng Y, Zhao Z, Zhou J J, Zhou H, Liang Z S, Luo Z B. The importance of slope aspect and stand age on the photosynthetic carbon fixation

- capacity of forest: a case study with black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011, 33(2):419-429.
- [5] Morimoto J, Kominami R, Koike T. Distribution and characteristics of the soil seed bank of the black locust (*Robinia pseudoacacia*) in a headwater basin in northern Japan. *Landscape and Ecological Engineering*, 2010, 6(2):193-199.
- [6] Ntayombya P, Gordon A M. Effects of black locust on productivity and nitrogen nutrition of intercropped barley. *Agroforestry Systems*, 1995, 29(3):239-254.
- [7] 贺康宁, 田阳, 张光灿. 刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟. *生态学报*, 2003, 23(2):251-258.
- [8] 郑元, 赵忠, 周慧, 周靖靖. 刺槐树冠光合作用的空间异质性. *生态学报*, 2010, 30(23):6399-6408.
- [9] 谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 彭祚登, 贾忠奎, 江丽媛, 王爽, 王璞. 豫西刺槐能源林的热值动态. *生态学报*, 2012, 32(8):2483-2490.
- [10] 徐飞, 郭卫华, 徐伟红, 王仁卿. 不同光环境对麻栎和刺槐幼苗生长和光合特征的影响. *生态学报*, 2010, 30(12):3098-3107.
- [11] Bond B J. Age-related changes in photosynthesis of woody plants. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(8):349-353.
- [12] Kolb T E, Stone J E. Differences in leaf gas exchange and water relations among species and tree sizes in an Arizona pine-oak forest. *Tree Physiology*, 2000, 20(1):1-12.
- [13] Yoshid M, Ohta H, Okuyama T. Tensile growth stress and lignin distribution in the cell walls of black locust (*Robinia pseudoacacia*). *Journal of Wood Science*, 2002, 48(2):99-105.
- [14] Xu F, Guo W H, Wang R Q, Xu W H, Du N, Wang Y F. Leaf movement and photosynthetic plasticity of black locust (*Robinia pseudoacacia*) alleviate stress under different light and water conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2009, 31(3):553-563.
- [15] 王艳萍, 王力, 卫三平. Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用. *生态学报*, 2012, 32(17):5445-5453.
- [16] 郑强卿, 李铭, 李鹏程, 姜继元, 王晶晶. 滴灌条件下沙地肉苁蓉土壤水分空间分布特性研究. *安徽农业科学*, 2011, 39(30):18548-18550.
- [17] 王琦, 张恩和, 龙瑞军, 赵桂琴, 孙永胜. 不同灌溉方式对紫花苜蓿生长性能及水分利用效率的影响. *草业科学*, 2006, 23(9):75-78.
- [18] 刘海军, 龚时宏. 喷灌条件下土壤水分入渗的数学模拟. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2):15-19.
- [19] 于利鹏, 黄冠华, 刘海军, 王相平, 王明强. 喷灌冬小麦耗水与棵间蒸发试验. *中国农业科学*, 2009, 42(9):3179-3186.
- [20] 吕殿青, 邵明安, 王全九. 垄沟耕作条件下的土壤水分分布试验研究. *土壤学报*, 2003, 40(1):147-150.
- [21] Gerampinis K, Therios I, Molassiotis A, Tsabarducas V, Patakas A. Response of three olive cultivars to water deficit conditions: photosynthesis, water use efficiency and mineral nutrient imbalance. *Acta Horticulturae*, 2012, 949:165-170.
- [22] Cao X, Jia J B, Li H, Li M C, Luo J, Liang Z S, Liu T X, Liu W G, Peng C H, Luo Z B. Photosynthesis, water use efficiency and stable carbon isotope composition are associated with anatomical properties of leaf and xylem in six poplar species. *Plant Biology*, 2012, 14(4):612-620.
- [23] Garland K F, Burnett S E, Day M E, van Iersel M W. Influence of substrate water content and daily light integral on photosynthesis, water use efficiency, and morphology of *Heuchera americana*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2012, 137(1):57-67.
- [24] Allen L H, Kakani V G, Vu J C, Boote K J. Elevated CO₂ increases water use efficiency by sustaining photosynthesis of water-limited maize and sorghum. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(16):1909-1918.
- [25] Mojid M A, Wyseure G C L, Mustafa S M T. Water use efficiency and productivity of wheat as a function of clay amendment. *Environment Control in Biology*, 2012, 50(4):347-362.
- [26] Shekinah D E, Gupta C, Sundara B, Rakkiyappan P. Effect of drip irrigation, planting methods and fertigation on yield, quality and water use efficiency of sugarcane (*saccharum* species hybrid). *International Journal of Agricultural and Statistical Sciences*, 2012, 8(2):691-696.
- [27] Martiniello P, Annichiarico G, Claps S. Irrigation treatments, water use efficiency and crop sustainability in cereal-forage rotations in Mediterranean environment. *Italian Journal of Agronomy*, 2012, 7(4):312-322.
- [28] Veeraputhiran R, Balasubramanian R, Pandian B J, Chelladurai M, Tamilselvi R, Renganathan V G. Effect of subsurface drip fertigation on cane yield, water use efficiency and economics of sugarcane. *The Madras Agricultural Journal*, 2012, 99(4/6):255-258.

DOI: 10.5846/stxb201306101560

顾翠花, 王懿祥, 白尚斌, 吴建强, 杨一. 四种园林植物对土壤镉污染的耐受性. 生态学报, 2015, 35(8): 2536-2544.

Gu C H, Wang Y X, Bai S B, Wu J Q, Yang Y. Tolerance and accumulation of four ornamental species seedlings to soil cadmium contamination. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2536-2544.

四种园林植物对土壤镉污染的耐受性

顾翠花¹, 王懿祥^{2,*}, 白尚斌², 吴建强², 杨一²

¹ 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 临安 311300

² 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300

摘要:采用模拟 Cd 污染土壤培养法,测定了 Cd 胁迫下山矾、桑树、绣线菊、山茶 4 种园林植物幼苗的生长、生物量变化,根茎叶的 Cd 含量,光合色素含量与 MDA 含量,对耐性指数(T_i)、转移系数(TF)、生物富集系数(BCF)进行了评价。结果表明:(1)山矾、桑树、绣线菊和山茶的平均耐性指数分别为 93.99、82.33、82.10 和 87.25;(2)4 个树种幼苗根茎叶的 Cd 含量都随着 Cd 处理浓度的增加而增加,转移系数值(TF)都小于 1,转移能力为山矾>山茶>绣线菊>桑树。对 Cd 累积能力为山矾>山茶>桑树>绣线菊;山矾和山茶生物量吸收的 Cd 总量显著高于绣线菊和桑树。(3)Cd 处理浓度的不断增加,叶绿素 a/叶绿素 b 比值与对照相比变化不显著,类胡萝卜素的含量持续增加;桑树、山茶、山矾和绣线菊 MDA 含量分别平均上升为 15%、10.17%、9.69%、12.86%。不同 Cd 浓度下,MDA 上升幅度顺序为桑树>绣线菊>山茶>山矾。研究表明山矾具有很高的 Cd 耐性、转移能力、以及地上部分积累镉的能力,是一种抗 Cd 污染较好的园林绿化树种。

关键词:镉; 园林植物; 耐受性; 积累

Tolerance and accumulation of four ornamental species seedlings to soil cadmium contamination

GU Cuihua¹, WANG Yixiang^{2,*}, BAI Shangbin², WU Jianqiang², YANG Yi²

¹ College of Landscape and Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China

² Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

Abstract: Four kinds of ornamental plants, *Symplocos caudate*, *Morus alba*, *Spiraea salicifolia*, and *Camellia japonica* were tested under five cadmium (Cd) application rate levels that range from 0mg/kg to 100mg/kg in a greenhouse pot experiment. Effects of Cd stress on growth indexes, biomass increment, Cd content of root, stem, leaf, content of photosynthetic pigment, and content of MDA in them were investigated after one year growth. Tolerance index (T_i), Translocation factor(TF) and bio concentration factor(BCF) of 4 species are evaluated. The results showed that (1) Cd had distinct inhibition on the growth of plant, the average tolerance index of *S. caudate*, *M. alba*, *S. salicifolia*, and *C. japonica* were 93.99, 82.33, 82.10 and 87.25 separately. (2) With increasing soil Cd content, the 4 species seedlings had a increase of Cd content of root, stem and leaf. The Translocation factor of these tree species to soil Cd contamination are all lower than 1 and followed the order of *S. caudate* > *C. japonica* > *S. salicifolia* > *M. alba*. BCF values of these tree species to soil Cd contamination followed the order of *S. caudate* > *C. japonica* > *M. alba* > *S. salicifolia*; The total contents of Cd absorbed in *S. caudate* and *C. japonica* are significantly higher than in *S. salicifolia* and *M. alba*. (3) Chlorophyll a/b values of them were not obviously changed compared with CK, but the contents of carotenoid of them increased with the increasing Cd concentration. The average content of MDA in *M. alba*, *S. salicifolia*, *C. japonica* and *S. caudate* increased 15%,

基金项目:国家自然科学基金项目(31300581); 国家“十二五”科技支撑项目(2012BAD22B0503); 浙江省重大科技专项重点项目(2012C12909-5)

收稿日期:2013-06-10; **网络出版日期:**2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: w_yixiang@126.com