

樟子松固沙林土壤水分动态对降雨入渗的响应

闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 袁立敏

(内蒙古林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 分析樟子松固沙林土壤水分动态对降雨入渗过程的响应, 为深入研究沙地人工林土壤水分管理提供科学依据。[方法] 采用 Watchdog 土壤水分自动监测系统测定了浑善达克沙地 2 个生长周期内沙地樟子松林和流动沙丘 0—120 cm 土层水份含量的动态, 并选择 3 种降雨事件探讨樟子松林土壤水分对降雨入渗的响应过程。[结果] 在降雨量 19.4 mm 时, 樟子松林地降雨入渗到达 20 cm 所需要时间为 4 h, 而流动沙丘为 5 h; 降雨量 30.2 mm 时, 樟子松林地降雨入渗到达 40 cm 所需要时间为 13 h, 而流动沙丘为 9 h; 降雨量 47.1 mm 时, 樟子松林地降雨入渗到达 80 cm 所需要时间为 27 h, 而流动沙丘为 24 h。降雨 19.4~47.1 mm 时樟子松林地降雨入渗深度可达 80 cm, 而流动沙丘在降雨 19.4 mm 时降雨入渗深度则超过 80 cm, 降雨 30.2 mm 或 47.1 mm 时, 降雨入渗深度则超过 120 cm。[结论] 不同降雨事件对樟子松林不同土层降水入渗进程和降水入渗深度有明显影响。

关键词: 浑善达克沙地; 樟子松固沙林; 降雨事件; 降雨入渗深度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)06-0328-06

中图分类号: S152.7

文献参数: 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 等. 樟子松固沙林土壤水分动态对降雨入渗的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 328-333. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.053; Yan Deren, Huang Haiguang, Hu Xiaolong, et al. Response of soil water dynamics in Scotch pine sand-fixation forest to rainfall infiltration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 328-333. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.053

Response of Soil Water Dynamics in Scotch Pine Sand-fixation Forest to Rainfall Infiltration

YAN Deren, HUANG Haiguang, HU Xiaolong, YUAN Limin

(Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: [Objective] The response of soil water dynamics in Scotch pine sand-fixation forest to rainfall infiltration was analyzed to provide basis for further studying sand soil water management. [Methods] Watchdog soil moisture automatic monitoring system were used to record soil water content of 0—120 cm soil layers in Scotch pine (*Pinus sylvestris*) sand-fixation forest in Hunshandake sandland, from June 20 to October 31 year 2014, and from May 1 to September 30 year 2015, respectively. And at the same time, we selected the 3 kinds of rainfall events to study soil moisture content variation with respect to rainfall infiltration under different influence processes in different depth soil layers of Scotch pine sand-fixation forest. [Results] In 19.4 mm rainfall event, it took 4 h for the rainfall infiltration reached to 20 cm soil layers in Scotch pine sand-fixation forest, it took 5 h in moving sanddunes; in 30.2 mm rainfall event, 13 h and 9 h elapsed when the rainfall infiltrations reached to 40 cm soil layers in Scotch pine sand-fixation forest and in moving sanddunes; in 47.1 mm rainfall events, 27 h and 24 h elapsed when the rainfall infiltrations reached to 80 cm soil layers in Scotch pine sand-fixation forest and in moving sanddunes. Depth of rainfall infiltration in Scotch pine sand-fixation forest reached to 80 cm soil layers in 19.4~30.2 mm rainfall events comparatively, depth of rainfall infiltration in moving sanddunes was more than 80 cm soil layers even in 19.4 mm rainfall events.

收稿日期: 2016-06-07

修回日期: 2017-06-12

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划“浑善达克沙化土地治理与沙产业技术研发及示范”(2016YFC0500803-01); 多伦生态站项目(2015-LYPT-DW-025)

第一作者: 闫德仁(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 研究员, 主要从事沙漠治理方面的研究。E-mail: nmglkyydr@163.com。

it was more than 120 cm soil layers in 30.2 mm or 47.1 mm rainfall events. [Conclusion] Different rainfall events significantly affected on rainfall infiltration process and depth of rainfall infiltration in Scotch pine forest.

Keywords: Hunshandake sandland; Scotch pine sand-fixation forest; rainfall events; infiltration depth.

水在植物生长和生态系统功能方面具有重要作用,而干旱、半干旱区植物群落常处于水分胁迫状态。水是沙地系统中最重要生态因子^[1],而降水又是影响流动沙丘浅层水分变化的主要因素^[2]。因此,沙地生态系统中降雨和土壤水分变化的关系引起研究者的广泛关注^[3]。植物固沙是荒漠化防治过程中的重要技术措施之一,但由于人工固沙林造林密度大、土壤水分亏缺等一系列问题在沙地人工生态系统中表现的尤为突出,特别是在流动沙地建立固沙植被后最显著的生态问题是土壤水分逐渐恶化,严重地影响了沙漠化土地现有植被建设的成效和效果。在中国北方普遍存在着人工植被土壤干化问题^[4],从某种程度看都是土壤水分亏缺的直接结果。在沙漠地区,天然降水是沙丘水资源的主要来源,并且降水后在表层土壤一定深度下的整个土壤剖面为入渗剖面。因此,土壤水分具有明显的时间变化规律^[5],即春季沙地弱失水阶段,夏季降水补给阶段,秋季沙地失水阶段以及冬季沙地水分调整阶段,并且由于冬季干沙层存在,对土壤保墒有明显作用。所以,研究自然降水条件下人工固沙林土壤水分的运移和分配,是有效提高植物生产力的关键^[6],根据沙地土壤水分的入参与再分配过程,确定沙地土壤水分变化与降水过程的关系具有重要意义。本文采用 Watchdog 土壤水分自动监测系统,定位观测了浑善达克沙地樟子松固沙林土壤水分的动态变化,并结合 CR-1000 型自动气象站记录的降水量数据,研究了3种降雨事件与不同土层水分的动态关系,分析了2014年和2015年2个生长周期内樟子松固沙林土壤水分对降雨入渗过程的响应,希望能够为深入研究沙地人工林土壤水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地点选择在内蒙古多伦浑善达克沙地生态系统国家定位观测研究站,即内蒙古多伦县南沙梁国营林场。地理坐标为 116°29′33.28″E,42°08′37.85″N,海拔1 277 m。该区气候属半干旱向半湿润过渡区的大陆性气候。多年(1953—2010年)平均气温 1.6℃,年极端最高气温 35.4℃,年极端最低气温 -39.8℃;≥10℃的有效积温 1 970℃,无霜期 95 d。年平均降水量为 386.2 mm,最高年降水量(1973年)为 511.7 mm,最低年降水量(1980年)为

257.2 mm。年平均相对湿度为 62%;年平均蒸发量为 1 761.0 mm。年平均风速为 3.6 m/s,年大风日数为 69.8 d。该区天然植被建群种主要有羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、克氏针茅(*Stipa sareptana*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等,研究地土壤为流动风沙土,地下水埋深5~6 m。

1.2 研究方法

本研究选择的沙丘高度为 4~5 m,沙丘土壤水分主要来源于降雨。2003年在选择的流动沙丘设置机械沙障,并营造樟子松固沙林,造林密度 3 m×3 m。研究样地樟子松树高 2~2.5 m,胸径 5~7 cm。目测法测定的植被盖度 60%~70%,主要植物种有油蒿、杨柴、黄柳。对照样地为流动沙丘,植被盖度小于 1%,距离樟子松样地直线距离 1 km。2014年6月20日在选定的样地内安装 Watchdog 土壤水分自动监测系统,水分传感器为 SM100 型,传感器分辨率为 0.001 m³/m³(0.1% VWC),土壤水分单位为体积含水量。Watchdog 土壤水分自动监测系统由土壤水分传感器和数据采集器组成,土壤水分传感器连接到数据采集器的通道接口上,并按照设定的时间将土壤水分数据存储于记录仪上实现自动监测。土壤水分传感器安装到不同的土层深度,即将水分传感器分别以水平状态插入 20 cm 土层、40 cm 土层、80 cm 土层和 120 cm 土层处,相邻的 2 个水分传感器间的距离分别为 20 和 40 cm,其测定的数据分别代表 0—20 cm,20—40 cm,40—80 cm 和 80—120 cm 土层的土壤水分含量。数据采集时间设置为 1 h 自动记录一次,每天记录 24 个数据。在研究地点安置 CR-1000 型自动气象站。雨量传感器为 TR525 M 型,测量精度 0.1 mm,数据采集设定时间为 10 min。自动气象站 2014年6月20日至10月31日记录的累计降水量为 156.7 mm;2015年5月1日至9月30日记录的累计降水量为 273.4 mm。

本研究选择 3 种降雨量事件,且降雨前 1 周内没有降雨。根据不同深度土层水分传感器土壤水分含量增加的数据变化,研究降雨入渗对不同深度土壤水分含量变化的影响。第 1 种降雨事件总降雨量为 19.4 mm,降雨时间为 2014 年 8 月 9 日 15:00—20:00,平均降雨强度为 3.23 mm/h。第 2 种降雨事

件总降雨量为 30.2 mm,降雨时间为 2015 年 6 月 18 日 20:00 至 19 日 6:00,平均降雨强度为 2.74 mm/h。第 3 种降雨事件总降雨量为 47.1 mm,降雨时间为 2015 年 7 月 15 日 14:00 至 16 日 11:00,平均降雨强度为 2.14 mm/h。

2 结果与分析

2.1 降雨 19.4 mm 事件对土壤水分入渗进程的影响

降雨入渗过程和降雨量、降雨强度以及初始土壤含水量有密切关系,且降雨和土壤水分有显著相互作用^[7]。因为干沙层首先大量吸存降雨水分,并通过雨水下渗使干沙层消失,才能形成流动沙丘水分入渗过程。而在 19.4 mm 降雨事件下(开始降雨时间 2014 年 8 月 9 日 15:00),到 8 月 9 日 19:00(累计降雨 18.9 mm),樟子松林 20 cm 土层水分含量从 2.2% 上升到 2.6%,并持续增加到 3.9%后,土壤水分含量开始下降(图 1)。而对照流动沙丘,在 8 月 9 日 18:00(累计降雨 17.2 mm),20 cm 土层水分含量从 2.2% 上升到 2.4%,并持续增加到 3.6%以后开始下降(图 2)。到 8 月 10 日 01:00,樟子松林 40 cm 土层水分含量从 2.6% 上升到 2.7%,并持续增加到 3.1% (图 1)。而流动沙丘,8 月 9 日 20:00(累计降雨 19.4 mm),40 cm 土层水分含量从 2.6% 上升到 2.8%,持续增加到 3.5%以后开始下降(图 2)。到 8 月 10 日 10:00,樟子松林 80 cm 土层水分含量从 3.1% 上升到 3.3%,并持续增加到 3.5%(图 1)。而流动沙丘(图 2),到 8 月 10 日 5:00,80 cm 土层水分含量从 2.2% 上升到 2.4%,持续增加到 3.0%后开始下降。而樟子松林地和流动沙丘 120 cm 土层水分含量分别维持在 2.8% 和 3.7% 水平,并没有随降雨入渗过程而增加 120 cm 土层土壤水分含量,根据不同土层水分含量增加值($\geq 0.1\%$,传感器分辨率)判断,19.4 mm 降雨入渗深度大于 80 cm 土层,并且土壤水分还会继续下渗,但达不到 120 cm 土层深度。

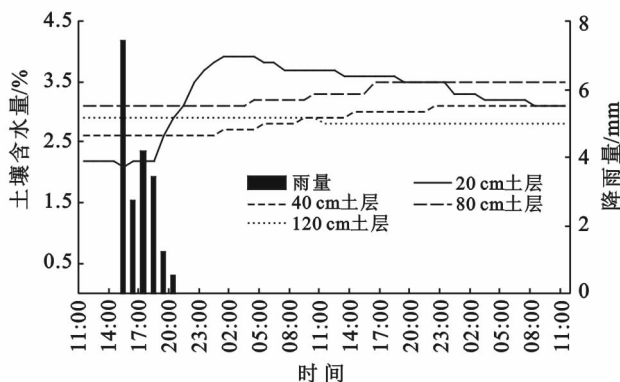


图 1 降雨事件(19.4 mm)樟子松林土壤水分含量变化趋势

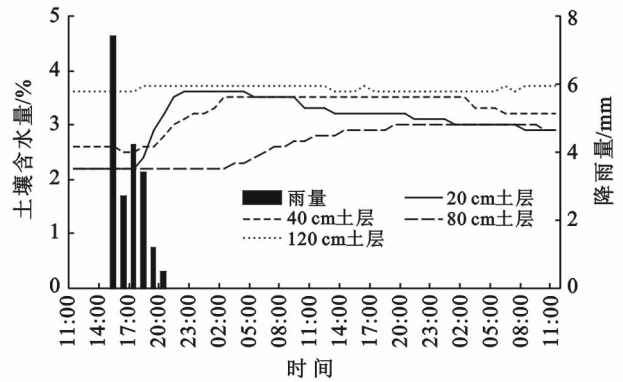


图 2 降雨事件(19.4 mm)流动沙地土壤水分含量变化趋势

2.2 降雨 30.2 mm 事件对土壤水分入渗进程的影响

在 30.2 mm 降雨事件下(开始降雨时间 2015 年 6 月 18 日 20:00),6 月 19 日上午 04:00(累计降雨 25.4 mm),樟子松林 20 cm 土层水分含量从 1.1% 急剧上升到 2.8%(图 3),6 时水分含量上升到 4.7%,以后随着时间延长,水分含量持续下降,到 6 月 22 日上午 07:00,水分含量下降到 2.8%。而对照流动沙丘,6 月 19 日上午 05:00(累计降雨 29.0 mm),流动沙丘 20 cm 土层水分含量从 2.3% 急剧上升到 3.7%(图 4),06:00 水分含量上升到 4.5%,以后随着时间延长,水分含量持续下降,到 6 月 22 日 04:00,水分含量下降到 2.7%。到 6 月 19 日 11:00,樟子松林 40 cm 土层水分含量从 1.1% 上升到 1.3%(图 3),以后土壤水分含量持续增加,到 20 日 02:00 土壤水分增加到 2.9%,以后开始缓慢下降。而对照流动沙丘(图 4),到 6 月 19 日 07:00,40 cm 土层水分含量从 2.3% 上升到 2.6%,以后土壤水分含量持续增加,到 19 日 16:00,土壤水分增加到 3.8%并保持到 20 时后土壤水分含量持续缓慢下降。到 6 月 21 日 02:00,樟子松林 80 cm 土层水分含量从 1.6% 上升到 1.8%(图 3),以后土壤水分含量持续增加,到 22 日 13:00,增加到最大值 3.1%。而对照流动沙丘(图 4),到 6 月 19 日 22:00,80 cm 土层水分含量从 2.0% 上升到 2.3%,以后土壤水分含量持续增加,20 日 08:00,增加到最大值 3.1%,并保持 20 日 15:00 后土壤水分含量持续降低。在整个监测期内,樟子松林 120 cm 土层水分含量始终维持在 1.1% 水平(图 3)。而对照流动沙丘(图 4),到 6 月 22 日 24 时,120 cm 土层水分含量开始从 3.5% 上升到 3.7%,以后土壤水分含量持续增加到 4.2%,并保持 5 h 没有降低。说明,在降雨 30.2 mm 条件下,流动沙丘降雨入渗深度超过 120 cm,而在樟子松林地降雨入渗深度大于 80 cm,但达不到 120 cm 土层深度。

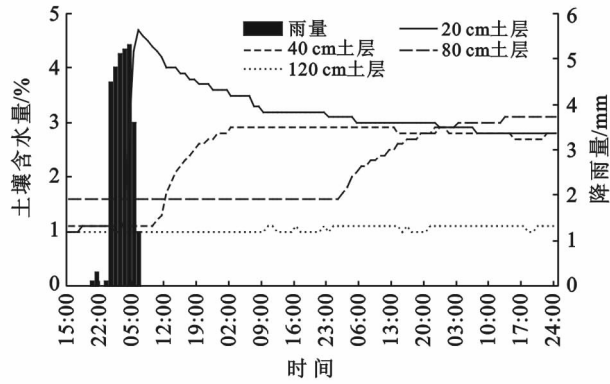


图3 降雨事件(30.2 mm)樟子松林土壤水分含量变化趋势

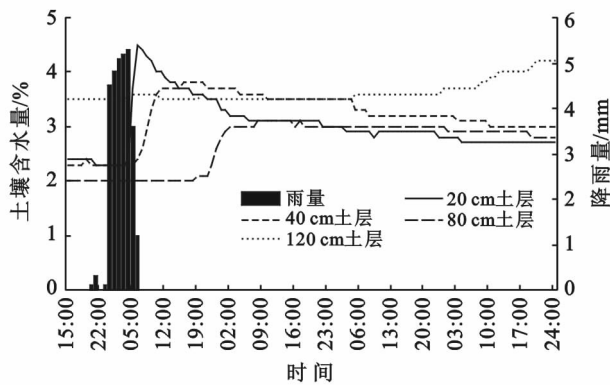


图4 降雨事件(30.2 mm)流动沙地土壤水分含量变化趋势

2.3 降雨 47.1 mm 事件对土壤水入渗进程的影响

在 47.1 mm 降雨事件下(开始降雨时间 2015 年 7 月 15 日 14:00),在 15 日 18:00(累计降雨 21.0 mm),樟子松林 20 cm 土层水分含量从 1.2% 急剧上升到 3.7%(图 5),19:00(累计降雨 23.9 mm)水分含量迅速上升到 5.9%,并在以后的 12 h(此时间内降雨 17.4 mm,其中,前 5 h 没降雨,)内,水分含量下降到 5.0%,但到 16 日 08:00,土壤水分含量又上升到 6.6%(二阶段累计降雨 21.1 mm),到 09:00 土壤水分含量上升到 7.4%。以后,随着降雨结束,土壤水分含量持续降低到到 3.0%。到 7 月 16 日 05:00,40 cm 土层水分含量从 1.4% 上升到 1.6%,以后土壤水分含量持续增加,到 11:00(降雨结束)土壤水分含量增加到 3.6%,14:00 增加到 3.8%,以后开始缓慢下降到 2.9%。到 7 月 16 日 17:00,80 cm 土层水分含量从 2.0% 上升到 2.4%,以后土壤水分含量持续增加到 5.0%(17 日 09:00),然后土壤水分含量开始缓慢下降到 4.2%。到 7 月 18 日 24:00,120 cm 土层水分含量从 1.1% 增加到 1.2%,以后土壤水分含量始终保持在 1.2% 水平不变。和樟子松林地相比(图 5),降雨 47.1 mm 事件对流动沙丘土壤水分含量变化进程的影响明显不同(图 6)。在 15 日 20:00(累计降雨 23.9 mm),流动沙丘 20 cm 土层水分含量从

2.2% 急剧上升到 3.0%(图 6),以后土壤水分含量持续增加到 4.9%(16 日 09:00),然后开始逐渐下降到 2.6%(18 日 6 时),并一直保持到 19 日 24:00 不降低。在 15 日 24:00,40 cm 土层水分含量从 2.2% 上升到 2.5%,以后土壤水分含量持续增加到 4.4%(16 日 12 时),然后土壤水分含量开始缓慢下降到 2.7%,并一直保持到 19 日 24:00 不降低。在 16 日 14:00,80 cm 土层水分含量从 2.2% 上升到 2.5%,到 18:00,土壤水分含量增加到 3.7%,并保持到 17 日 04:00 以后,土壤水分含量持续降低到 2.8%(19 日 12:00),并一直保持到 19 日 24:00 不降低。

在 17 日 9 时,120 cm 土层水分含量开始从 3.7% 上升到 3.8%,以后土壤水分含量持续增加到 4.9%(19 日 07:00),然后,土壤水分含量开始缓慢下降,到 19 日 24 时土壤水分含量仍然保持在 3.8% 水平。说明,在降雨 47.1 mm 条件下,流动沙丘降雨入渗深度明显超过 120 cm,而在樟子松林地下降雨入渗深度基本能够达到 120 cm 土层深度[水分含量增加值只有 0.1%,且持续 47 h(图 5)]。

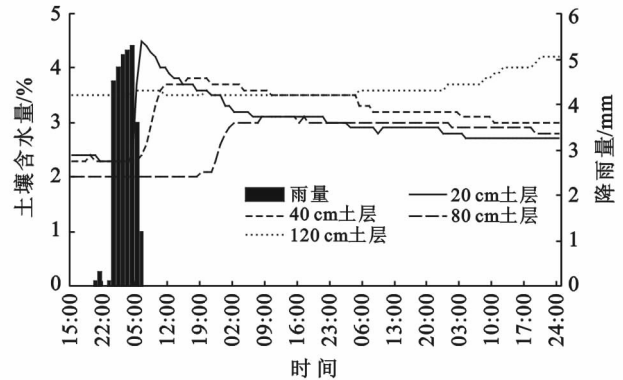


图5 降雨事件(47.1 mm)樟子松林土壤水分含量变化趋势

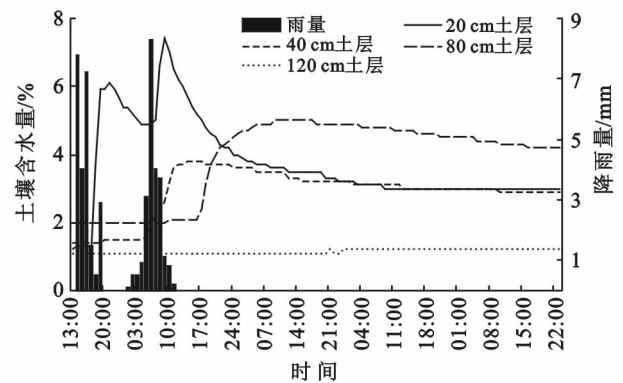


图6 降雨事件(47.1 mm)流动沙地土壤水分含量变化趋势

3 讨论与结论

3.1 讨论

降雨入渗过程和降雨量、降雨强度以及初始土壤

含水量有密切关系,且降雨和土壤水分有显著相互作用,并显著影响流动沙丘上层(0—40 cm)土壤水分,而对深层(大于 40 cm)土壤水分影响较小。同时流动沙丘缺乏细颗粒物质,质地均匀,透水性好,持水性差,降雨时很难形成积水现象,但是由于流动沙丘干沙层的存在影响着降雨的早期下渗过程。因为干沙层首先大量吸存降雨水分,并通过雨水下渗使干沙层消失,才能形成流动沙丘水分入渗过程。而降雨量小于 5 mm 时,能够增加表层(0—40 cm)流动沙丘水分含量,但降雨量大于 20 mm 时,则显著增加 0—100 cm 土层水分含量,并且降雨数量、强度和干旱周期和不同土层水分含量有显著关系^[8]。

在本研究中,根据土层水分含量增加值($\geq 0.1\%$, 传感器分辨率)判断降雨入渗深度进程的变化。在 30.2 mm 降雨(降雨强度 3.02 mm/h)事件中,樟子松林降雨入渗到达 20 cm 深度时所需要时间为 9 h,对照流动沙丘为 10 h;降雨入渗到达 40 cm 深度时,樟子松林所需要时间为 17 h,对照流动沙丘为 12 h;降雨入渗到达 80 cm 深度时樟子松林所需要时间是 57 h,对照流动沙丘为 50 h。说明流动沙丘干沙层的存在确实影响降雨的早期下渗过程,而一旦干沙层消失,降雨在流动沙丘中的入渗速度明显比樟子松林地快,体现出初始土壤含水量对入渗进程的影响。例如,降雨前,樟子松林地 20 cm,40 cm 和 80 cm 土层水分含量分别为 1.1%,1.1%和 1.6%,而流动沙地分别为 2.3%,2.3%和 2.3%(图 3—4)。其它研究者也发现降雨量、降雨次数、降雨强度影响土壤水分时间和空间的变化^[9-10]。原鹏飞^[11]认为 100 或 140 cm 土层水分变化不受降雨量多少的影响,对流动沙丘水分有补给作用的临界降雨量为 15 mm。冯伟等^[12]采用土壤水分传感器测定毛乌素沙地流动沙丘土壤水分含量变化,表明 53.8 mm 降雨影响土层深度达 200 cm。在科尔沁沙地,降雨 30—40 mm 时,水分再分配入渗深度达 100 cm 土层。赵兴梁^[13]根据长期的土壤水分监测结果认为流沙区每年有 16% 的降水(30 mm)可补给深层土壤,但如果考虑干沙层对降水入渗的影响,认为 9.9 mm 以下的降水为无效降水。同样,在 47.1 mm 降雨(降雨强度 2.77 mm/h)事件中,降雨开始后 82 h,樟子松林地 120 cm 土层水分含量从 1.1%增加到 1.2%,而流动沙丘降雨开始后 43 h,120 cm 土层水分含量从 3.7%上升到 4.9%。说明,在 47.1 mm 降雨事件中,樟子松林地降雨入渗深度可以达到 120 cm,对照流动沙丘降雨入渗深度则明显大于 120 cm。一方面说明,樟子松林地 120 cm 土层水分消耗大,靠降雨补给水分困难,

另一方面说明,只有超过 47 mm 以上降雨,才有可能补给樟子松林地 120 cm 土层的水分。事实上,在半干旱地区,每年这样的降雨事件很少,随着樟子松林生长时间的延长,林地 120 cm 土层水分消耗可能会导致土壤水分亏欠,影响樟子松林生长。在干旱半干旱区,沙漠植物能够利用的最重要的水源就是土壤水分,并吸取 80 cm 土层以下的土壤水^[14]。

对于乔灌木树种来说,20—300 cm 土层深度是大多数沙地植物根系分布的主要区域和主要的水分供应区域,而沙地樟子松林 300 cm 土层深度土壤水分在生长季持续减少,林木生长已受到土壤水分亏缺的严重制约^[15]。段民福等^[16]研究表明,樟子松固沙林 5 cm 土层水分含量高于流动沙丘,而 25 cm 土层和 50 cm 土层水分含量则低于流动沙丘。孙海红等^[17]研究表明小于 20 a 林龄的沙地樟子松土壤水分含量较高,而 20~27 年生林分林地土壤含水率为最低。

3.2 结论

(1) 不同降雨事件影响沙地降水入渗进程。在 19.4 mm 降雨事件中,樟子松固沙林地降雨入渗深度达 20 cm 土层所经历的时间比对照流动沙丘快 1 h;而 30.2 mm 降雨事件樟子松固沙林地降雨入渗深度达 40 cm 土层比对照流动沙丘分别慢 4 个小时;47.1 mm 降雨事件樟子松固沙林地降雨入渗深度达 80 cm 土层比对照流动沙丘分别慢 3 个小时,说明流动沙丘干沙层和不同土层的初始含水量对降雨入渗进程具有影响。

(2) 不同降雨事件影响沙地降水入渗深度。在樟子松固沙林地,不同降雨事件降雨入渗土层深度不同。在 19.4~30.2 mm 降雨事件中,樟子松林地降雨入渗深度可达 80 cm 土层,在 47.1 mm 降雨事件,降雨入渗深度可达 120 cm 土层;而流动沙丘在 19.4 mm 降雨事件降雨入渗深度则超过 80 cm 土层,30.2 或 47.1 mm 降雨事件,降雨入渗深度则超过 120 cm 土层,说明流动沙丘更有利于降雨向深层入渗,并使其保持较高的水分含量。

(3) 降雨入渗相同土层深度所经历的时间不同。19.4 mm 降雨事件,樟子松固沙林降雨入渗深度达 20,40,80 cm 分别为 4,11 和 14 h,而对照流动沙丘分别为 4,6 和 13 h;30.2 mm 降雨事件,樟子松固沙林降雨入渗深度达 20,40 和 80 cm 所经历的时间分别为 8,15 和 55 h,而对照流动沙丘分别为 9,11 和 24 h,并且入渗深度达 120 cm 所经历的时间为 58 h;47.1 mm 降雨事件,樟子松固沙林降雨入渗深度达 20,40,80,120 cm 所经历的时间分别为 5,7,21 和

56 h,而对照流动沙丘分别为 7,10,25,44 h。说明随着降雨量增加,流动沙丘有利水分向深层下渗,并使其保持较高的水分含量。

[参 考 文 献]

- [1] Chen C F, Son N T, Chang L Y, et al. Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data[J]. *Applied Geography*, 2011,31(2):463-475.
- [2] 刘新平,赵哈林,何玉惠,等. 生长季流动沙地水量平衡研究[J]. *中国沙漠*,2009,29(4):663-667.
- [3] 王新平,张志山,张景光. 荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J]. *中国沙漠*,2005,25(2):196-202.
- [4] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. *林业科学*,1996,32(1):78-85.
- [5] 冯起,程国栋. 我国沙地水分分布状况及其意义[J]. *土壤学报*,1999,36(5):225-236.
- [6] Tate R. L. The challenge of modeling soil water [J]. *Soil Science*, 1997,162(8):533.
- [7] Liu Xinping, He Yuhui, Zhao Xueyong, et al. Characteristics of deep drainage and soil water in the mobile sandy lands of Inner Mongolia, Northern China [J]. *Journal Arid Land*, 2015,7(2):238-250.
- [8] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, et al. Modifying the 'pulse-reserve' paradigm for deserts of North America;

Precipitation pulses, soil water, and plant responses [J]. *Oecologia*, 2004, 141(2):194-210.

- [9] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe[J]. *Ecology*, 1992,73(4):1175-1181.
- [10] Wilson D J, Western A W, Grayson R B. Identifying and quantifying sources of variability in temporal and spatial soil moisture observations[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(2):191-201.
- [11] 原鹏飞,丁国栋,王炜炜,等. 毛乌素沙地降雨入渗和蒸发特征[J]. *中国水土保持科学*,2008,6(4):23-27.
- [12] 冯伟,杨文斌,党宏忠,等. 毛乌素沙地流动沙丘土壤水分对降雨的响应[J]. *中国沙漠*,2015,35(2):400-406.
- [13] 赵兴梁. 沙坡头地区植物固沙问题的探讨[C]// 流沙治理研究(二). 宁夏 银川:宁夏人民出版社,1991.
- [14] 刘新平,张铜会,赵哈林,等. 流动沙丘降雨入渗和再分配过程[J]. *水利学报*,2006,37(2):166-171.
- [15] 张继义,赵哈林,崔建垣,等. 科尔沁沙地樟子松固沙林土壤水分动态的研究[J]. *林业科学*,2005,41(3):1-6.
- [16] 段民福,廖超英,孙长忠,等. 毛乌素沙地樟子松固沙林土壤物理性质的时空变异规律[J]. *西北农业学报*, 2012,21(3):188-192.
- [17] 孙海红,刘广,韩辉,等. 章古台地区樟子松固沙林土壤水分物理性质的研究[J]. *防护林科技*,2003,58(1):15-17.

(上接第 327 页)

[参 考 文 献]

- [1] 宋戈,王盼盼,王越,等. 黑龙江省巴彦县土地利用类型变化特征及其空间格局分异[J]. *经济地理*, 2015, 35(3):163-170.
- [2] 杨丽,谢高地,甄霖,等. 泾河流域土地利用格局的时空变化分析[J]. *资源科学*,2005,27(4):26-32.
- [3] 阳柏苏,何平,赵同谦. 张家界国家森林公园土地利用格局变化[J]. *生态学报*,2006,26(6):2027-2034.
- [4] 刘纪远,张增祥,徐新良,等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*,2009, 64(12):1411-1420.
- [5] 刘彦随,彭留英,王大伟. 东南沿海地区土地利用转换态势与机制分析[J]. *自然资源学报*,2005,20(3):333-339.
- [6] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等. 1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014,34(12):3234-3244.
- [7] 刘世梁,崔保山,杨志峰,等. 道路网络对澜沧江流域典型区土地利用变化的驱动分析[J]. *环境科学学报*, 2006,26(1):162-167.
- [8] 王学志,张正祥,盛连喜,等. 基于地貌特征的东北土地

利用格局[J]. *生态学杂志*,2010,29(12):2444-2451.

- [9] 龚文峰,孔达,范文义,等. 松花江流域哈尔滨段土地利用时空格局演变特征分析[J]. *农业工程学报*,2009, 25(8):249-255.
- [10] 杨鹏,陆宏芳,陈飞鹏,等. 1995 至 2004 年广州土地利用格局变化与驱动分析[J]. *生态环境*,2008, 17(3):1262-1267.
- [11] 朱恒峰,赵文武,康慕谊,等. 延河流域土地利用格局时空变化与驱动因子分析[J]. *干旱区资源与环境*,2008, 22(8):17-22.
- [12] 张荣天,焦华富. 长江经济带城市土地利用效率格局演变及驱动机制研究[J]. *长江流域资源与环境*,2015, 24(3):387-394.
- [13] 吴大放,刘艳艳,王朝晖. 基于 Logistic-CA 的珠海市耕地变化机理分析[J]. *经济地理*,2014, 34(1):140-147.
- [14] 任国平,刘黎明,付永虎,等. 都市郊区乡村聚落景观格局特征及影响因素分析[J]. *农业工程学报*,2016, 32(2):220-229.
- [15] 曹祺文,吴健生,仝德,等. 基于空间自相关的区域农地变化驱动力研究:以珠三角地区为例[J]. *资源科学*, 2016,38(4):714-727.