

DOI: 10.5846/stxb202008132114

李奕然, 马英, 宋献方, 杨丽虎, 刘恩民, 王胜宝, 王洁. 华北山区典型人工林土壤水势动态和水分运移规律. 生态学报, 2021, 41(14): 5622-5631.

Li Y R, Ma Y, Song X F, Yang L H, Liu E M, Wang S B, Wang J. Soil water potential dynamics and water utilization of typical planted forests in the mountain area of North China. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5622-5631.

华北山区典型人工林土壤水势动态和水分运移规律

李奕然^{1,2}, 马 英^{1,2}, 宋献方^{1,2}, 杨丽虎^{1,2,*}, 刘恩民¹, 王胜宝³, 王 洁³

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 资源与环境学院, 北京 100049

3 保定市水土保持试验站, 保定 071000

摘要:大规模植树造林工程有效缓解了我国北方水土流失等问题,但伴随植被生长和降水格局变化,水循环过程发生明显改变。土壤水分运动是水循环的关键过程,研究变化环境下人工林植被土壤水分运移规律,对植被生态恢复具有重要意义。基于 2014—2018 年多时间尺度(半小时、天、月和年)华北山区崇陵流域典型人工侧柏林和荒草土壤剖面水势监测数据,阐明不同植被覆盖下土壤水势动态变化规律,提出土壤水分运移和植被水分利用模式。研究结果表明:侧柏林土壤水势日变幅显著低于荒草植被,但土壤水势日变幅随土壤深度增加而减小的速率 90 a 侧柏依次大于 60 a 侧柏和荒草;月、年尺度侧柏林不同深度土壤水势变化对降水的响应大于荒草地,其中 60 a 侧柏林年均土壤水势与年降雨量显著线性相关($P < 0.05$)。由水势梯度和零通量面多年平均变化可知,90 a 侧柏林 0—50 cm 土壤水呈下渗趋势,根系水力提升促使 50—100 cm 土壤水向上蒸散;60 a 侧柏林 0—20 cm、70—100 cm 以及枯水年 30—70 cm 土壤水均以蒸散为主,根系可同时吸收利用表层和深层土壤水分;荒草地 0—20 cm 土壤水分蒸发强烈,且为根系主要吸水深度,20—100 cm 土壤水稳定下渗。相比 60 a 侧柏林和荒草,90 a 侧柏林的土壤调蓄能力增强,与荒草互被可减少植被间水分竞争,充分利用土壤水,从而减少流域内地表径流和土壤侵蚀量。

关键词:人工林;土壤水势;土壤水分利用;崇陵流域

Soil water potential dynamics and water utilization of typical planted forests in the mountain area of North China

LI Yiran^{1,2}, MA Ying^{1,2}, SONG Xianfang^{1,2}, YANG Lihu^{1,2,*}, LIU Enmin¹, WANG Shengbao³, WANG Jie³

1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Baoding Soil and Water Conservation Experimental Station, Baoding 071000, China

Abstract: Large scale afforestation alleviates soil erosion effectively in North China. The water cycle has been consequently modified under plant growth and changing precipitation regimes. Soil water dynamics is critical to investigate the water cycle of planted forests under changing environment for plant restoration. In this study, multi-time scale (i.e. half-hourly, daily, monthly, and annual scales) analysis of soil water potential (SWP) was conducted based on long-term measurement of the SWP between 2014 and 2018 under 60 a and 90 a arborvitae (*Platycladus orientalis*) planted forests as well as weeds as a reference in Chongling catchment in the mountain area of North China. The temporal variations in vertical gradients of SWP and zero flux planes (ZFPs) were analyzed to propose the patterns of soil water movement and plant water utilization for three representative vegetation types. Results showed that the diurnal variation of the SWP appeared as a unimodal curve

基金项目:国家自然科学基金项目(41671027)

收稿日期:2020-08-13; 网络出版日期:2021-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanglihu@igsnrr.ac.cn

with a peak occurring between 13:00 and 14:00. Daily variation in the SWP of arborvitae was significantly small compared to that of weeds. Daily changes of SWP decreased with the increase of soil depth, while the declining rate was larger under 90 a arborvitae than that under 60 a arborvitae and weeds. It was evident that the SWP decreased gradually from April to June, reaching a minimum value of -305.3 cm with the standard deviation (SD) of 58.3 cm. Nevertheless, the SWP increased rapidly from July to August (-215.7 ± 105.9) cm and then remained high during September to October (-210.6 ± 51.9) cm. The responses of SWP at different soil depths to precipitation under arborvitae at monthly and annual scale were greater than those under weeds. There was a significant linear relationship between the annual mean SWP and annual precipitation under 60 a arborvitae ($P < 0.05$). Based on the depth distributions of SWP gradients and ZFPs in the experimental years, soil water infiltration was estimated to mainly appear at upper 50 cm depth but root hydraulic lift facilitated soil moisture moving upwards in the 50—100 cm layer under 90 a arborvitae. The soil moisture in the 0—20 cm and 70—100 cm layers as well as that in the 30—70 cm layer in dry year mainly moved upwards and were taken up by plant roots under 60 a arborvitae. Strong evaporation and root water uptake primarily occurred at the top of 20 cm for weeds, while soil water infiltrated steadily in the 20—100 cm layer. It was found that soil water storage capacity under 90 a arborvitae was stronger than that under 60 a arborvitae and weeds, as it had smaller soil bulk density and increased the saturated soil water content. The planted forest of 90 a arborvitae coexisting with weeds could reduce water competition among different species and improve the water use efficiency. Surface runoff as well as soil erosion would be further reduced in the catchment. This study demonstrated the modifications of soil water dynamics and water utilization of the representative planted forests on the basis of long-term observations and multi-time scale analysis of SWP in Chongling catchment. It provided new insights into ecological restoration and water management in North China under changing environment.

Key Words: planted forest; soil water potential; soil water utilization; Chongling catchment

20 世纪 70 年代末以来,我国北方开展了大规模植树造林工程,在治理荒漠化^[1]、缓解水土流失^[2]、涵养水源^[3]等方面发挥了重要作用。但伴随人工林林龄的增加和气候变化(如降水格局变化)的加剧,森林植被水循环过程发生改变^[4-5],深层土壤水消耗等问题逐渐突显^[5-6]。地下水-土壤-植物-大气连续体(简称 GSPAC 系统)水循环过程中,土壤水分运动作为联系各界面水分转化过程的关键纽带^[7-8],是影响森林水源涵养^[3]、土壤保持功能^[9]和植被恢复^[6]的重要因素。因此,研究变化环境下的森林植被土壤水分运移规律,尤其是不同植被类型影响下土壤水分运移的差异,对指导植被生态恢复具有重要的科学意义和实用价值。

人工林植被可通过改变土壤容重、土壤孔隙度,从而增强土壤入渗性能^[10-11],使土壤储水能力增加。但另一方面,相对于造林前的荒草等植被,人工林冠层降水截留作用显著^[12],浅层土壤水补给减少,但蒸腾量增大,明显促进了深层土壤水分利用^[13];而林龄的增加可能在深层土壤水分有效性未降至某一阈值时进一步增加树木根系吸水深度^[5]。降水是直接影响土壤水分分布^[14]和植被水分利用规律^[15]的重要因素。次降雨后或者旱季转入雨季时,表层土壤水分增加,使得人工林(侧柏)根系吸水深度明显上移^[16];丰水年和枯水年相比,人工林(波西亚欧洲云杉和欧洲山毛榉)和天然草场之间土壤水分运移特征的差异明显减小^[17]。但人工林和天然植被对降水的响应仍需开展长时间序列、多时间尺度的对比监测研究。

太行山区是华北平原地下水的主要侧向补给区,其水量变化影响重大^[10]。崇陵流域位于太行山北部,流域内人工林植被分布广泛,研究该流域的土壤水分运移和植被水分利用规律对于深入认识变化环境下的华北平原水循环具有重要意义。水势梯度是土壤水分运动的驱动力^[18]。本研究基于崇陵流域近 5 年(2014—2018 年)土水势自动监测数据,研究了多时间尺度(半小时、天、月、年)典型人工侧柏林土壤水势对降水的响应过程,并以荒草植被为对照,对比分析了不同植被间水分利用特征的差异,可为北方人工林水源涵养、生态恢复和区域水资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室的崇陵流域实验基地(115°21' E, 39°23' N), 地处河北省易县境内、太行山脉北端、大清河水系白洋淀上游, 属北易水二级支流。崇陵流域总面积约 6 km², 长约 4.4 km, 平均宽 1.5 km。海拔高度 85—300 m, 地势西北高东南低, 为低山丘陵区。属温带大陆性季风气候, 年平均气温为 11.6 °C, 多年平均降水量为 641 mm, 年平均潜在蒸发量为 1906 mm, 无霜期约 210 d^[10]。流域内植被覆盖度较高, 主要包括 90 a 树龄和 60 a 树龄侧柏以及荒草等, 分别位于研究区内的成林沟、幼林沟和杨树沟(图 1)。研究区地表以下 100 cm 内土壤质地主要为砂壤土和壤土, 流域沟道内地下水埋深约为 2.5—4 m。

1.2 实验方法

本研究于 2014—2018 年 4—10 月对流域内典型人工林植被(90 a 树龄侧柏和 60 a 树龄侧柏)以及荒草开展土壤水势动态监测试验。90 a 侧柏、60 a 侧柏和荒草监测点平均海拔高度分别为 110 m、110 m 和 90 m, 平均坡度分别为 8°、9°和 8°。通过现场分层(10、20、30、50、70 和 100 cm)采集土壤样品以及室内测试分析可知, 各监测点 0—100 cm 深度内平均土壤容重分别为

1.33、1.62 和 1.44 g/cm³, 平均饱和含水量分别为 0.49、0.41 和 0.42 cm³/cm³。在三个监测点分别安装 DLS-3 型电测负压计(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 中国)自动监测土壤水基质势, 测定深度分别为 10、20、30、50、70 和 100 cm, 数据采集频率为 0.5 h。其中, 2017 年 90 a 侧柏林地基质势数据缺失。

在 60 a 侧柏和荒草分布区土水势监测点附近开阔区域分别安装 SL3 翻斗式雨量筒, 由 HOBO 数据采集器(Onset Computer Corporation, MA, USA)自动记录降雨量, 测量精度为 0.1 mm。90 a 侧柏分布区的降雨量采用临近的气象场降雨量观测数据, 观测仪器同上。降雨量与基质势观测基本同步。2014—2018 年 4—10 月典型植被生长季内降雨量平均为(463.3±100.7)mm, 其中 4—6、7—8 和 9—10 月份降雨量分别占降雨总量的(24.6±7.4)%、(53.4±16.7)%和(22.0±11.4)%。根据降雨量 P-III 型频率曲线分析可知, 2014 年植被生长季(4—10 月)为枯水年, 2015—2018 年为平水年。

1.3 计算方法与数据分析

研究区 0—100 cm 土壤非饱和带土水势仅考虑重力势和基质势, 且为两者之和。相邻两土层间的土水势梯度由式(1)计算得到:

$$\psi' = \frac{\psi_2 - \psi_1}{d_2 - d_1} \quad (1)$$

其中, ψ_1 、 ψ_2 分别为上、下两层土水势(以地表为基准, 向上为正), cm; d_1 、 d_2 分别为上、下层深度, cm; ψ' 为相邻两层间水势梯度, cm/cm, 正值代表下层土水势高于上层, 土壤水分向上运移, 负值相反。水势梯度为零即土壤水分通量为零的水平面称为零通量面。零通量面法是研究降雨、灌溉等入渗补给土壤水、潜水以及土壤蒸

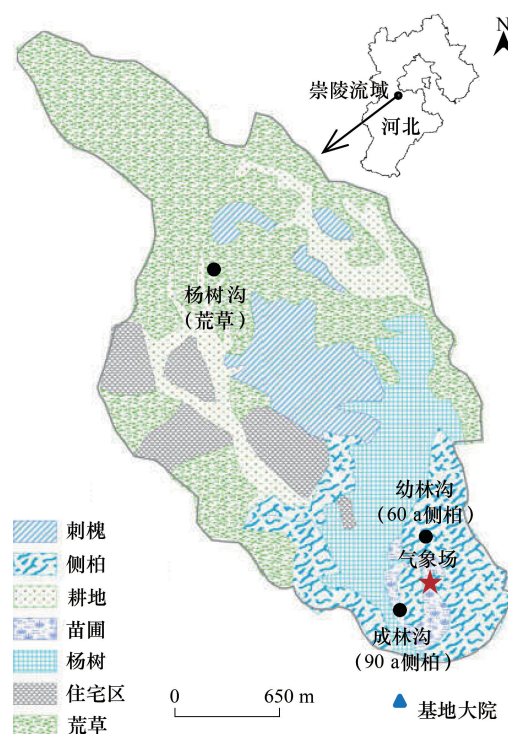


图 1 研究区植被及试验监测点分布示意图^[19]

Fig. 1 The schematic diagram of vegetation distribution and experimental plots in Chongling catchment^[19]

发、潜水消耗的一种重要方法^[18]。

降雨以及土水势半小时、天、月和年尺度变化规律的分析主要采用 Excel 2007 完成,用 SPSS 18.0 进行相关性分析和单因素方差分析。由结果分析提出不同植被类型覆盖下土壤水分运移和植被根系水分利用模式。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度土水势动态变化

基于 2014—2018 年 4—10 月三种典型植被覆盖下半小时尺度土水势监测数据分析可知,不同植被各深度土水势的日变化趋势基本一致,均呈单峰型(图 2),每日 13:00—14:00 左右达到峰值((-199.7 ± 58.2) cm),6:00 或 24:00 左右呈极小值((-256.6 ± 62.3) cm)。土水势日变化幅度随深度呈逐渐减弱趋势,日变差系数绝对值(0.11 ± 0.07)和极差((67.77 ± 36.89) cm)均随深度逐渐减小,且 0—50 cm 土水势的日波动范围明显大于 50—100 cm 土水势日波动范围。雨季及雨季后(7—10 月)不同植被覆盖下土水势日变化差异明显。土水势日绝对变幅(极差)由小到大依次为 60 a 侧柏(56.1 cm) $<$ 90 a 侧柏(62.2 cm) $<$ 荒草(85.4 cm),荒草地土水势日变幅明显大于人工林地,而土水势日变幅随土壤深度增加而逐渐减小的速率依次为 90 a 侧柏林地(1.0×10^{-1} cm/cm) $>$ 60 a 侧柏林地(7.2×10^{-2} cm/cm) $>$ 荒草地(4.4×10^{-2} cm/cm)。90 a 侧柏林地、60 a 侧柏林地和荒草地土水势日平均离散度(变差系数绝对值)依次增大($0.09 < 0.10 < 0.13$),但日离散度随土壤深度增加而逐渐减小的速率依次降低($(6.8 \times 10^{-4} > 5.2 \times 10^{-4} > 5.1 \times 10^{-4})$ cm⁻¹),荒草地土水势日离散度大于人工林地,且在 20 cm 处出现极大值(0.15)。

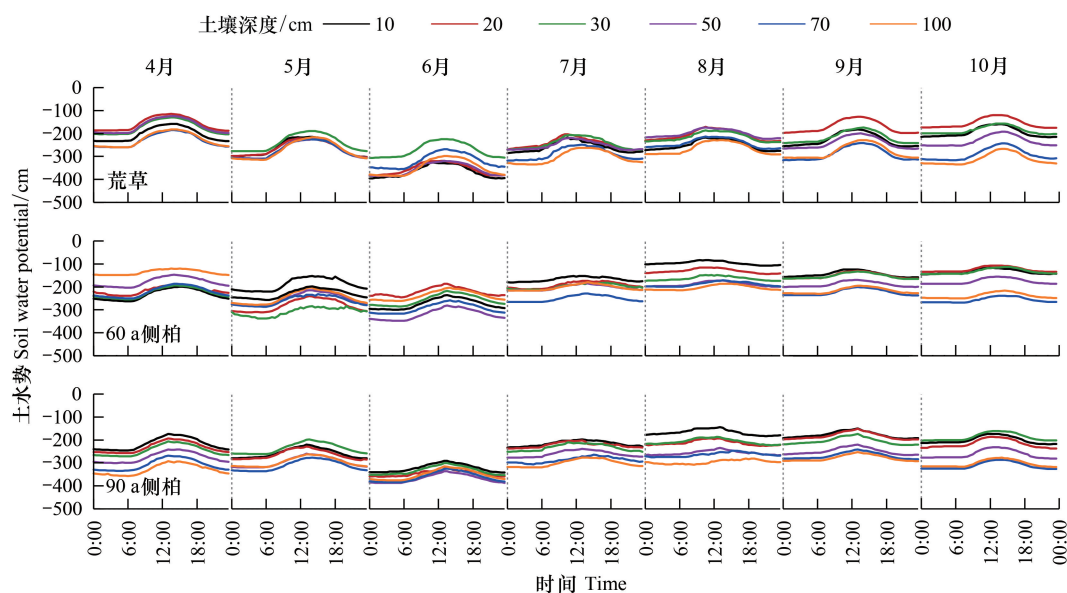


图 2 典型植被覆盖下不同月份各深度土水势日变化

Fig.2 Diurnal dynamics of soil water potential at each depth from April to October for representative vegetations

试验观测期内日平均土水势动态变化特征如图 3 所示。每年 4—6 月流域内干旱少雨,土水势较低((-263.7 ± 63.4) cm),各植被覆盖下土水势均呈减小趋势,在 6 月达到全年最低值((-305.2 ± 58.3) cm)。7—8 月进入雨季,土水势随降雨增加而迅速升高且波动幅度较大((-215.7 ± 105.9) cm)。9—10 月因植被生长耗水减少,虽降雨有所减少,土水势整体仍维持较高值((-210.6 ± 51.9) cm),该时段降雨较少时土水势呈小幅减小趋势。不同植被类型覆盖下土水势年内变化幅度差异较大,其中荒草地土水势年内波动幅度总体上小于侧柏林地。各植被类型土水势年内波动幅度总体上随深度的增加而减小,其中 10—20 cm 波动最强烈(变差系数 -0.70 ± 0.17),100 cm 处波动最小(变差系数 -0.52 ± 0.18)。

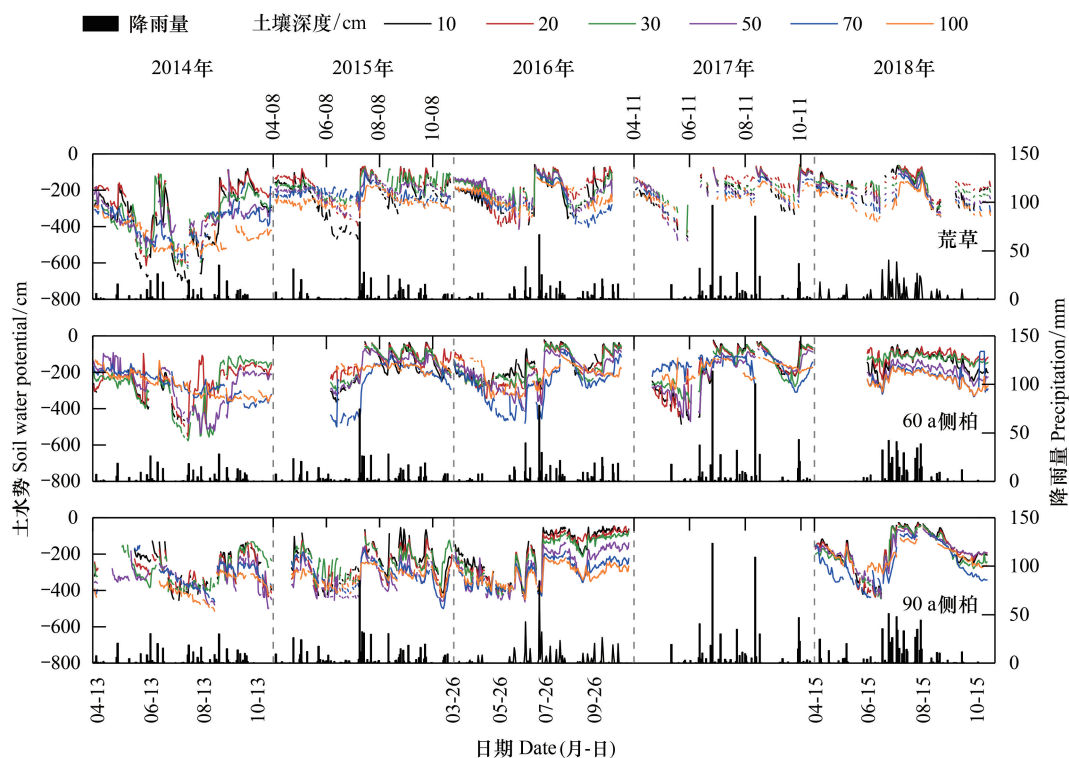


图3 不同植被覆盖下各深度土水势日均变化规律

Fig.3 Daily variations in soil water potential at each depth under different vegetation types

用年内各深度土水势平均值代表当年平均土水势(图4),结果显示年均土水势 90 a 侧柏林地<荒草地<60 a 侧柏林地,与年降雨量变化趋势相似,其中 60 a 侧柏林地年降雨量与年均土水势呈显著线性相关($P=0.0432$)。相同植被类型覆盖下枯水年与平水年的年内波动幅度无显著差异(图4)。不同年间 90 a 侧柏林地($P=0.0007$)、60 a 侧柏林地($P=0.0005$)和荒草地($P=0.0000$)各深度土水势均存在显著差异,土水势剖面分布特征年际变化较大,平水年和枯水年之间差异显著($P<0.05$),由此表明研究区人工林和荒草植被覆盖下土水势受降雨影响显著。

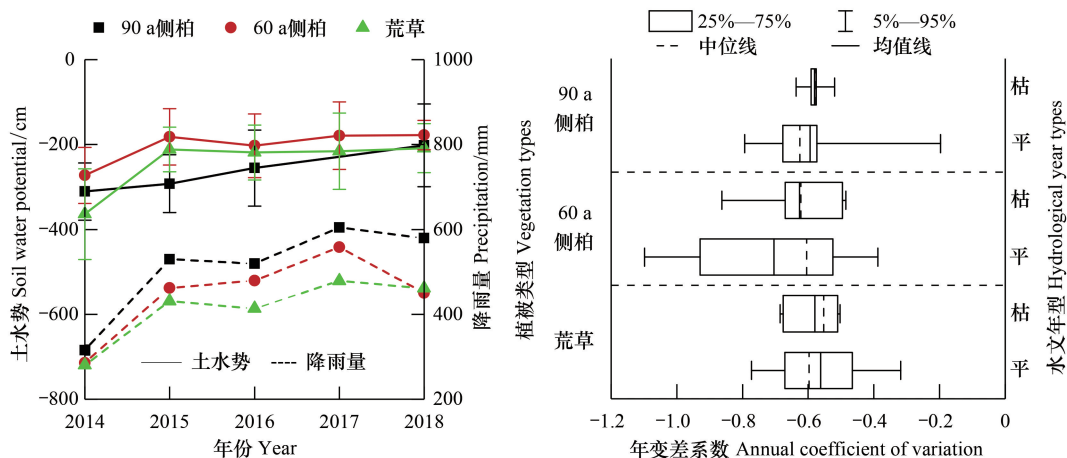


图4 不同植被类型土水势年际变化和枯、平水年差异

Fig.4 Dynamics of soil water potential among years and between dry year and normal years under different vegetation types

2.2 土水势梯度和零通量面时空变化特征

2014—2018 年不同植被监测点相邻观测深度的土水势梯度月平均变化值如图 5 所示,荒草地 10—20 cm 水势梯度正值较多且明显大于其他植被覆盖区,表明荒草地表层土壤水分主要向上运移;侧柏林地 30—70 cm 土水势梯度绝对值明显大于荒草地,且 60 a、90 a 侧柏林地分别在 50—70、30—50 cm 相对较大。不同月份之间 20—30 cm 土水势梯度变化最大,此外,侧柏林地 50—70 cm 土水势梯度变化也较为明显。平水年雨季(7—8 月)土壤水分平均运移趋势较非雨季弱。土壤水分运移方向变化基本集中在 7—9 月,约占 45%—65%。枯水年(2014 年)转为平水年(2015—2018 年)后,随年份的增加,土水势梯度总体呈减小趋势,即土壤水分平均运移趋势减弱。

根据零通量面发生位置变化分析可知,半小时和天尺度(图 6)三种典型植被覆盖下土壤剖面水分运移方向均变化频繁,水分运动强烈,各观测深度处均有持续性零通量面存在,其中聚合型零通量面深度随季节、年份的变化总体呈现雨季后(9—10 月)发生深度增大、枯水年较平水年发生深度波动大的特点。月尺度上,90 a 侧柏林土壤剖面上存在多个零通量面,主要为 20 cm 和 50 或 70 cm 左右的聚合型零通量面。60 a 侧柏林地剖面上存在 2 个主要零通量面,即 20 cm 的分散型零通量面和 70 cm 的聚合型零通量面。荒草地仅在 20—30 cm 处存在稳定的分散型零通量面。年尺度上,各植被类型不同年间零通量面位置和性质基本维持稳定,但人工林零通量面发生位置受降雨(水文年型)影响相对较大。

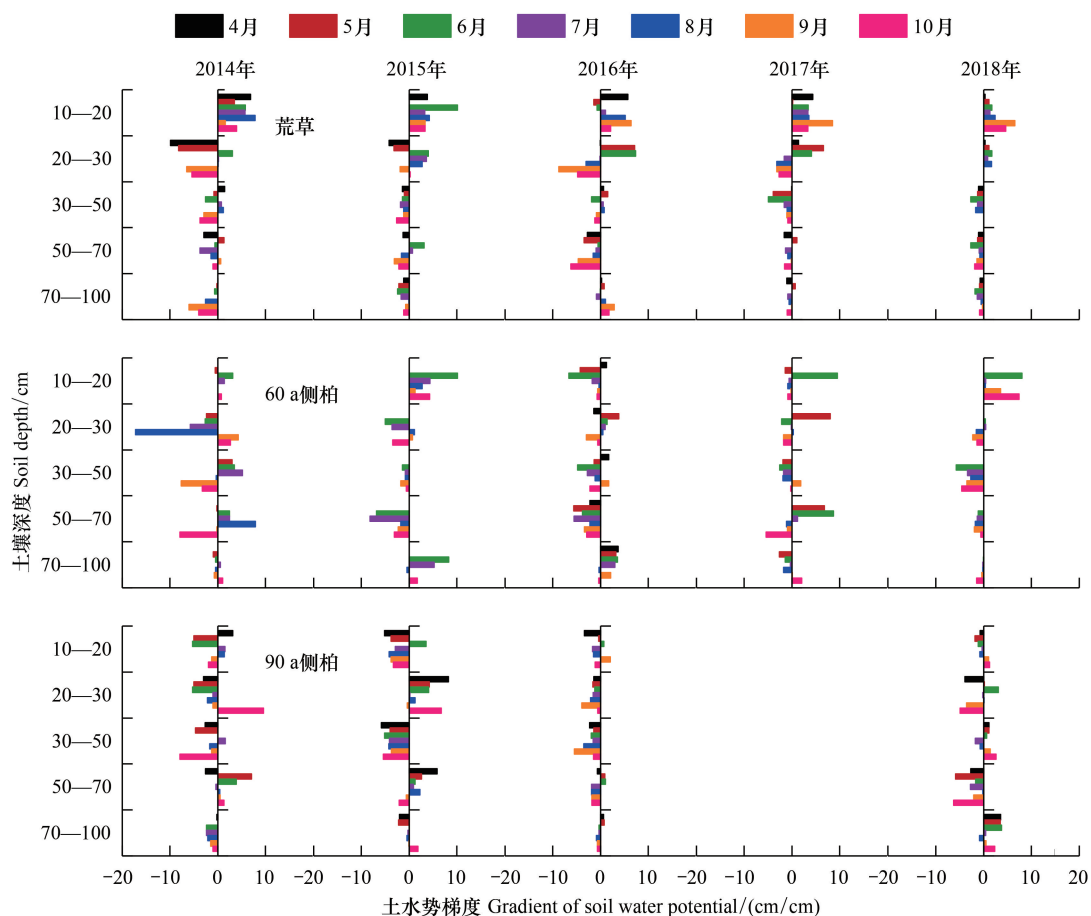


图 5 不同植被类型下土水势梯度变化

Fig.5 Variations in gradients of soil water potential under different vegetation types

2.3 不同植被类型土壤水分运移规律

根据试验期间不同深度土壤水势梯度变化和零通量面发生位置(图 5 和图 6)分析人工林和荒草植被覆

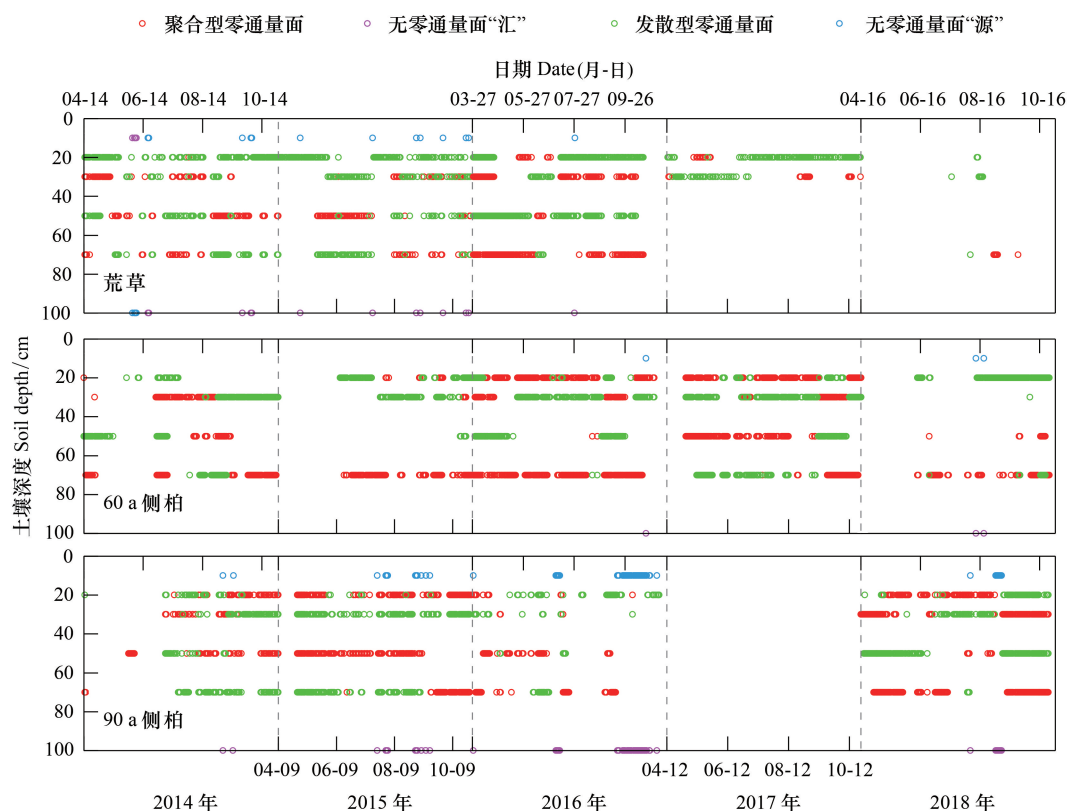


图6 不同植被类型下零通量面位置变化(“汇”、“源”分别指剖面上土壤水分移向、移出的土层)

Fig.6 Annual dynamics of depth of zero flux planes under different vegetation types (“sink” and “source” terms refer to the soil layers that soil moisture moves in and out of respectively)

盖下土壤水分运移类型。90 a 侧柏林地在 2014—2016 年土壤水分运移类型主要为下渗型,之后在 2018 年变为下渗—蒸散型。其中,0—50 cm 深度土壤水分以下渗为主;50—70 cm 从枯水年(2014 年)到平水年(2015—2018 年),由向上蒸散逐渐转变为下渗趋势;70—100 cm 土壤水分雨季呈下渗趋势,非雨季从枯水年到平水年由下渗逐渐转变为蒸散趋势(图 7)。由此分析可知,90 a 侧柏主要根系吸水深度枯水年为 50—70 cm;平水年降雨增多,入渗补给深度增加,其根系吸水深度范围为 50—100 cm。

60 a 侧柏林地土壤水蒸散、入渗交替频繁,存在多种水分运移形式,2014—2018 年依次为蒸散型、蒸散—下渗—蒸散型、下渗—蒸散型、下渗型和蒸散—下渗型。土壤表层 0—20 cm 年内不同月份之间水分运移方向基本一致,但不同年份呈蒸发或下渗趋势;20—30 cm 以下渗为主;30—70 cm 枯水年以向上蒸散为主,平水年以下渗为主;70—100 cm 土壤水分在枯水年内主要呈蒸散趋势,而后随年份的增加由强烈蒸散逐渐变为下渗趋势(图 7)。60 年侧柏林地表层(0—20 cm)根系吸水能力和土壤蒸发作用强烈,使得水分不断向上蒸散;而深层(70—100 cm)土壤水分一方面受根系吸水拉力作用向上运移(主要出现在 2015 和 2016 年),另一方面在 2017—2018 年受前期降水入渗补给影响,土壤储水量较大,土壤水分向下入渗。由此可知,60 a 侧柏主要根系吸水深度枯水年为 0—20 和 30—100 cm,平水年为 0—20 和 70—100 cm。

荒草地土壤水分运移类型各年均以蒸散—下渗型为主。其中 0—20 cm 呈稳定蒸散趋势;20—70 cm 以下渗为主;70—100 cm 雨季内下渗为主,非雨季枯水年呈下渗趋势,而平水年间随年份的增加土壤水分运移趋势由下渗到蒸散再变为下渗。试验期间(尤其是平水年)荒草地土水势不同月份间差异小于其他植被类型。由于荒草根系主要分布在表层,其吸水深度集中在 0—20 cm(图 7)。

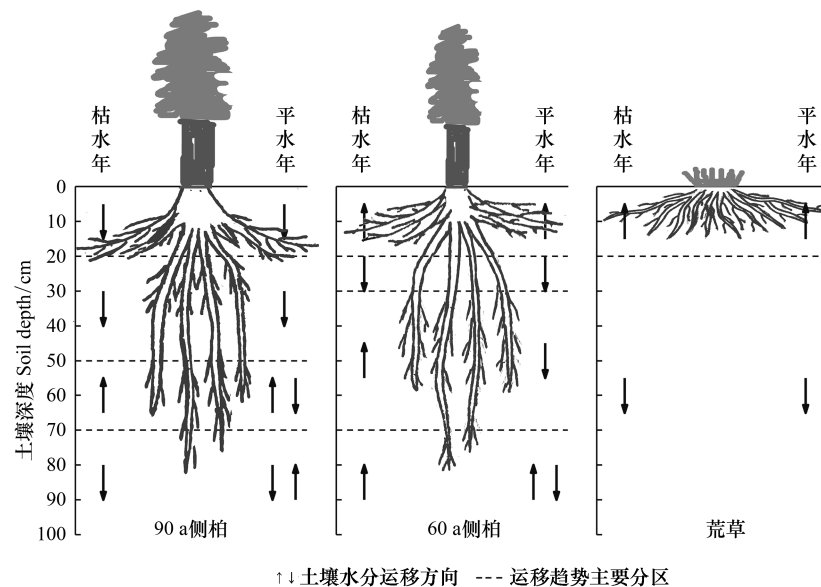


图7 不同植被类型覆盖下土壤水分运移模式

Fig.7 Soil water transport modes under different vegetation types

3 讨论

通过长序列多时间尺度土壤水势动态变化规律分析可知,次降雨(包括长历时小雨强和短历时大雨强两种降雨模式)对人工林土壤水分通量的影响较为明显。但与王鹏等^[20]在该流域内的早期研究结果不同,次降雨并未引起零通量面明显下移趋势,可能是由于植被经过十多年的生长,冠层和枯落物对降雨的拦截作用^[21-23]以及根系对土壤结构的影响^[22,24]在一定程度上改变了土壤水分运移机制,改变了原来的活塞流运移特征,优先流增加^[25],从而使得各深度土壤水均有不同程度的补给,水分运移方向相对稳定。但月和年尺度上,土壤水分运移趋势和通量受降雨的年季分布影响均较大。人工林整体上雨季后(9—10月)聚合型零通量面深度较雨季(7—8月)大,即月尺度降雨量增加使土壤水分消耗趋向浅层,这与郝玥^[16]的研究基本一致,而枯水年较平水年零通量面发生深度波动范围大,也表明植被会改变根系吸水深度以适应土壤干旱环境。由于本研究降雨量监测点均位于各植被覆盖区附近的开阔区域,虽然各植被分布区之间4—10月降雨量不同,但同时各植被冠层截留量亦存在一定差异^[26-27],从而使得不同植被覆盖下穿透雨量并无显著差异。不同时间尺度土壤水分运移规律的差异,主要是由于短时间尺度内对降水入渗的响应为主导,而长时间尺度上则是降水补给、土壤蒸发和植被蒸腾等多种因素共同作用的结果。

除降水外,植被根系是影响土壤水分分布的主要因素之一。根系分布可改变土壤的调蓄能力。90 a 侧柏根系促使土壤孔隙较为发达,土壤质地疏松,0—100 cm 深度内平均土壤容重(1.33 g/cm^3)明显低于 60 a 侧柏林地(1.62 g/cm^3)和荒草地(1.44 g/cm^3),平均饱和含水量($0.49 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)高于 60 a 侧柏林地($0.41 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)和荒草地($0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$),增加了土壤储水能力。虽然 90 a 侧柏覆盖区年降水量较大,但植被冠层截留量及蒸腾耗水亦增加,导致多年尺度上年均土水势相对较低;2014 年为枯水年,三种植被覆盖下降水量相近,而 90 a 侧柏土水势并未比 60 a 侧柏低,主要是由于浅层土壤水分下渗,深层根系水力提升作用明显,从而调节了整个土壤剖面的水量平衡;2018 年 90 a 侧柏降水量大,但其土水势并未显著增加,一方面是因为 90 a 侧柏冠层截流量较大,减少了穿透雨量,另一方面植被蒸腾耗水量较高,促使干旱少雨季节内根系吸水及土壤水分利用量增加,而雨季土水势则明显增加,土水势年内变幅在三种植被中最大,表明 90 a 侧柏覆盖下土壤调蓄能力增强(图 3 和图 4)。荒草覆盖下降降水入渗能力相对较低^[10],土水势对降水的响应较弱,因而土水势年

内波动幅度最小。90 a 侧柏林地土水势在水分补给增加时并非一次增大至某一稳定水平,而是逐渐增大(图 4),表明 90 a 侧柏林地土壤水分对降雨的缓冲能力强于 60 年侧柏林地和荒草地。

根系分布的不同直接导致了不同植被根系吸水深度的差异。人工侧柏林明显促进了 50 cm 以下深层土壤水分利用,而荒草则主要吸收利用表层 0—20 cm 的土壤水分(图 7),这与王进鑫等^[28]和侯士彬等^[29]的研究结果相近。由土水势日变差系数绝对值随深度减小速率、日极差随深度减小速率可知 90 a 侧柏消耗浅层土壤水分占总耗水的比例小于 60 a 侧柏和荒草;以往研究表明,随树龄的增加,侧柏浅层细根生物量呈减小趋势,而深层细根生物量则逐渐增加^[30-31],从而促进了深层土壤水分利用。浅层土壤水分运移还会受到地表枯落物覆盖的影响,野外调查发现 90 a 侧柏林地地表枯落物相对较多,可能抑制了表层土壤蒸发^[11],表层土壤水分以下渗为主。60 a 侧柏林地、荒草地枯落物覆盖较少,同时表层根系相对比较活跃,促使表层土壤水分以向上蒸散为主。

由上述分析可知,90 a 侧柏可增大土壤储水能力,与荒草互被可减少植被间水分竞争,可充分利用土壤水分,减小地表径流和土壤侵蚀量。由于侧柏和荒草互被在林龄较大时有利于土壤水分平衡和利用,因此,侧柏作为北方人工林的主要树种总体上是可持续的。

4 结论

基于崇陵流域典型人工林(90 a 侧柏和 60 a 侧柏)和荒草植被覆盖下近 5 年(2014—2018 年)土壤水势动态观测数据,分析了多时间尺度(半小时、天、月和年)土壤水分运移和植被水分利用特征,主要结论如下:

(1) 荒草地、60 a 和 90 a 侧柏林地土水势日离散度依次减小,荒草地不同深度间土水势日变化差异及年内变幅均最小。60 a 侧柏林地年均土水势与年降雨量显著线性相关($P < 0.05$),但荒草地土壤水分对降水的响应相对较弱。各植被覆盖下不同深度土水势的年际差异均显著($P < 0.01$)。

(2) 90 a 侧柏林土壤水分 0—50 cm 以下渗为主,50—70 cm 由蒸散(枯水年)逐渐转变为下渗(平水年),70—100 cm 雨季向下入渗,非雨季时由下渗(枯水年)逐渐转向蒸散(平水年)。60 a 侧柏林 0—20 cm 和 20—30 cm 土壤水分分别呈蒸散和下渗趋势,30—100 cm 枯水年内土壤水分蒸散而平水年以下渗为主。荒草地 0—20 cm 土壤水分蒸散强烈且蒸散强度明显大于侧柏林地,20—100 cm 土壤水分整体下渗。

(3) 90 a 侧柏林主要吸收利用 50 cm 以下土壤水分,60 a 侧柏林同时消耗了 0—20 cm 和 70—100 cm 土壤水,而荒草地的多年平均根系吸水深度则稳定在 0—20 cm。相比 60 a 侧柏林和荒草,90 a 侧柏林的土壤调蓄能力增强,与荒草互被可减少植被间水分竞争,充分利用土壤水,从而降低流域内地表径流和土壤侵蚀量。

参考文献(References):

- [1] Zastrow M. China's tree-planting drive could falter in a warming world. *Nature*, 2019, 573(7775): 474-475.
- [2] Ma L, Teng Y G, Shanguan Z P. Ecohydrological responses to secondary natural *Populus davidiana* and plantation *Pinus tabulaeformis* woodlands on the Loess Plateau of China. *Ecohydrology*, 2014, 7(2): 612-621.
- [3] 马维玲, 石培礼, 宗宁, 赵广帅, 柴曦, 耿守保. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力. *中国生态农业学报*, 2017, 25(4): 478-489.
- [4] Zhang X, Xing Y J, Wang Q G, Yan G Y, Wang M, Liu G C, Wang H L, Huang B B, Zhang J H. Effects of long-term nitrogen addition and decreased precipitation on the fine root morphology and anatomy of the main tree species in a temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 2020, 455: 117664.
- [5] Nan G W, Wang N, Jiao L, Zhu Y M, Sun H. A new exploration for accurately quantifying the effect of afforestation on soil moisture: A case study of artificial *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau (China). *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 459-466.
- [6] 杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望. *生态学报*, 2019, 39(20): 7382-7388.
- [7] 刘昌明. 土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究. *地理学报*, 1997, 52(4): 366-373.
- [8] Philip J R. Plant water relations: Some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, 1966, 17: 245-268.
- [9] Shen H O, He Y F, Hu W, Geng S B, Han X, Zhao Z J, Li H L. The temporal evolution of soil erosion for corn and fallow hillslopes in the typical Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 2019, 186: 200-205.

- [10] 胡珊珊. 变化环境下白洋淀流域水文循环机理及模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(中国科学院地理科学与资源研究所), 2012.
- [11] 王美莲, 王飞, 姚晓娟, 张秋良. 不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究. 生态环境学报, 2015, 24(6): 925-931.
- [12] 马建业, 李占斌, 马波, 李朝栋, 肖俊波, 张乐涛. 黄土区小流域植被类型对沟坡地土壤水分循环的影响. 生态学报, 2020, 40(8): 2698-2706.
- [13] Adane Z A, Nasta P, Zlotnik V, Wedin D. Impact of grassland conversion to forest on groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2018, 15: 171-183.
- [14] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, Shi W Y, Li G Q, Du S. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: A multi-year study in the loess hilly region in China. *Ecohydrology*, 2020, 13(3): e2196.
- [15] 刘自强, 余新晓, 娄源海, 李瀚之, 贾国栋, 路伟伟. 北京山区侧柏水分利用策略. 生态学报, 2017, 37(11): 3697-3705.
- [16] 郝玥. 基于稳定同位素的北京山区典型树种水分利用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [17] Šípek V, Hnilica J, Vlček L, Hnilicová S, Tesař M. Influence of vegetation type and soil properties on soil water dynamics in the Šumava Mountains (Southern Bohemia). *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124285.
- [18] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988: 51-55.
- [19] Song X F, Wang P, Yu J J, Liu X, Liu J R, Yuan R Q. Relationships between precipitation, soil water and groundwater at Chongling catchment with the typical vegetation cover in the Taihang mountainous region, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(4): 787-796.
- [20] 王鹏, 宋献方, 侯士彬. 太行山区典型植被对土壤水势动态的影响研究. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1467-1476.
- [21] 朱海, 胡顺军, 刘翔, 李浩, 李宜科. 不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征. 生态学报, 2017, 37(3): 860-867.
- [22] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 张海林, 李向富, 杨叶, 王秋月, 黄建武. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响. 生态学报, 2019, 39(13): 4844-4854.
- [23] 邓文平. 北京山区典型树种水分利用机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [24] 刘栋, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区人工刺槐林恢复过程中土壤氮素与微生物活性的变化. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 322-329.
- [25] Li S L, Liang W L. Spatial-temporal soil water dynamics beneath a tree monitored by tensiometer-time domain reflectometry probes. *Water*, 2019, 11(8): 1662.
- [26] 史宇. 北京山区主要优势树种森林生态系统生态水文过程分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [27] 钱金平, 王仁德, 白洁, 张广英. 太行山区不同人工林林冠截留降水的比较研究. 水土保持通报, 2012, 32(4): 164-167.
- [28] 王进鑫, 王迪海, 刘广全. 刺槐和侧柏人工林有效根系密度分布规律研究. 西北植物学报, 2004, 24(12): 2208-2214.
- [29] 侯士彬, 宋献方, 于静洁, 刘鑫, 张广英. 太行山区典型植被下降水入渗的稳定同位素特征分析. 资源科学, 2008, 30(1): 86-92.
- [30] 张晓, 黄晓强, 信忠保, 孔庆仙, 夏晓平, 蒋秋玲. 北京山区不同林分林下植被根系分布特征及其影响因素. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 51-57.
- [31] 刘梦颖. 黄帝陵古侧柏细根特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.