

坝上地区人工林和草地生长季土壤水势动态

张 益^{1,2}, 王渝淞^{1,2}, 武昱鑫^{1,2}, 余新晓^{1,2}, 樊登星^{1,2}, 贾国栋^{1,2}, 王春华³

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学国家林业和草原局水土保持重点实验室,
北京 100083;3.北京市河湖流域管理事务中心,北京 100083)

摘要: 为研究坝上地区人工林土壤水势动态,以结缕草(*Zoysia japonica*)为对照,选取坝上地区典型人工林小叶杨(*Populus simonii* Carr.)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*),研究其生长季不同时间、空间土壤水势和变异系数及晴天和降雨下土壤水势变化。结果表明:(1)人工林和草地土壤水势变化趋势相同,在生长季前期和后期土壤水势较高,中期土壤水势进入波动下降期,但不同植被进入波动期时间不同,樟子松晚于小叶杨和结缕草。小叶杨、樟子松、结缕草土壤水势最低值分别出现在 70,10,30 cm 处,最低值分别为-1 257.24,-747.97,-830.11 kPa。小叶杨、樟子松和结缕草土壤水势变异系数最大值分别在 9 月 10 cm、7 月 10 cm、7 月 30 cm 处,其值分别为-155.9%,-208.0%,-183.6%。总体上,变异系数生长季中期大于前期和后期,表层大于深层。(2)晴天人工林和草地土壤水势差的最大值与日均温度之间存在显著的相关关系,随着日均温度升高,水势差最大值也增大。典型晴天大气温度在日内上下波动,土壤水势呈现滞后波动,在生长季浅层土壤最为明显。(3)不同降雨量与土壤水势差呈现相关关系,随着降雨量升高,土壤水势差也随之升高。典型降雨事件下,中雨和大雨剖面土壤水势迅速上升,小雨事件下主要呈现波动变化。从不同植被来看,草地土壤水势较人工林波动更为剧烈。综上,生长季樟子松土壤水势进入波动期最晚,波动幅度最大。而土壤水势对于大气温度和降雨的响应方面,结缕草最为敏感。研究结果对于指导当地人工林建设与水资源高效管理具有重要意义。

关键词: 坝上; 土壤水势; 人工林; 大气温度; 降雨

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0181-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.024

Dynamics of Soil Water Potential in Growing Season of Plantation and Grassland in Bashang Area

ZHANG Yi^{1,2}, WANG Yusong^{1,2}, WU Yuxin^{1,2}, YU Xinxiao^{1,2},

FAN Dengxing^{1,2}, JIA Guodong^{1,2}, WANG Chunhua³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing
Forestry University, Beijing 100083; 3.Beijing Hehu Basin Management Center, Beijing 100083)

Abstract: In order to study the dynamics of soil water potential of plantations in Bashang area, in this experiment, *Zoysia japonica* was taken as control, *Populus simonii* Carr. and *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, which were typical plantations in Bashang area, were selected to study the soil water potential value and variation coefficient in different time and space in growing season, and the soil water potential variation under sunny days and rainfall in growing season. The results showed that: (1) The change trend of the soil water potential of plantation and grass was the same, the soil water potential was higher at the early and late stages of growing season, and the soil water potential entered the fluctuating and declining period at the middle stage, but different vegetation entered the fluctuating period at different time, and that of *P. sylvestris* var. *mongolica* was later than that of *P. simonii* Carr. and *Z. japonica*. In addition, the lowest soil water potential of *P. simonii* Carr. was -1 257.24 kPa at 70 cm, that of *P. sylvestris* var. *mongolica* was -747.97 kPa at 10 cm, and that of *Z. japonica* was -830.11 kPa at 30 cm. The maximum variation coefficient of soil water potential of *P. simonii* Carr., *P. sylvestris* var. *mongolica* and *Z. japonica* appeared at 10 cm in September, 10 cm in

收稿日期:2022-09-27

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC05008)

第一作者:张益(1998—),男,硕士研究生,主要从事土壤水文、水土保持研究。E-mail:1491329925@qq.com

通信作者:贾国栋(1986—),男,博士,副教授,主要从事水土保持、生态水文研究。E-mail:jgd123@126.com

July and 30 cm in July, with values of -155.9% , -208.0% and -183.6% , respectively. On the whole, the variation coefficient was greater in the middle of growing season than that at early and late stages, and that in surface layer was greater than that in deep layer. (2) In sunny days, there was a significant correlation between the maximum value of soil water potential difference of plantations and grasslands and the daily mean temperature. With the increasing of daily mean temperature, the maximum of soil water potential difference also increased. In typical sunny days, the atmospheric temperature fluctuated up and down in the day, and the soil water potential fluctuated with a lag, which was most obvious in the shallow soil during the growing season. (3) There was a correlation between different rainfall and soil water potential difference. With the increasing of rainfall, the soil water potential difference also increased. Under typical rainfall events, the soil water potential of moderate and heavy rainfall profiles rose rapidly, and fluctuated under light rainfall events. From the perspective of different vegetation, grass was more intense than artificial forest. To sum up, the soil water potential of *P. sylvestris* var. *mongolica* in the growing season entered into the fluctuating period at the latest, with the largest fluctuating range. The response of soil water potential of *Z. japonica* was the most sensitive to atmospheric temperature and rainfall. The results were of great significance for guiding the construction of local plantations and efficient management of water resources.

Keywords: Bashang area; soil water potential; plantation; atmospheric temperature; rainfall

20 世纪,能量学观点被引入土壤水分的研究,并首次提出土壤水势的概念^[1]。土壤水势是指土壤水所拥有的势能,表示在标准状况下,将单位数量的土壤水移动到指定位置或状态时,环境对土壤水所做的功^[2]。土壤水势作为表征植被吸收土壤水分有效性和判断土壤干旱程度的重要指标,其值与土壤含水率密切相关,但与土壤含水率不同,其解决土壤含水率受质地影响不能真实表达土壤水分有效性的问题^[3]。因此,土壤水势经常与土壤含水率一起作为研究土壤水文过程的重要参数^[4],在研究植被水分利用与水资源管理方面发挥重要作用。

近年来,学者们对土壤水势进行许多研究,李奕然等^[5]研究华北地区人工林不同时间尺度下的土壤水势变化;袁佳丽等^[6]研究土壤水势与叶片、大气水势之间的梯度,并分析三者之间的关系;杨湘等^[7]研究不同覆盖物对夏黑葡萄不同生育期土壤水势的影响;任涛等^[8]研究地膜—地布覆盖下的土壤水势变化。已有研究多是对于土壤水势值在时间或空间上的变化进行分析,缺乏指标定量说明时间和空间上土壤水势的变异。同时,大气温度和降雨都能改变土壤水势^[9],但其如何作用于土壤水势,不同深度处的土壤水势在这种作用下如何变化,变化在不同植被下具有何差异研究得较少。此外,现有研究^[10]多集中于西北内陆河流域和黄土区,对于华北地区的研究较少。坝上作为华北地区的重要组成部分,位于我国北方农牧交错带,海拔高,平均气温低,降雨稀少,是典型的生态脆弱区,当前对坝上地区土壤水势方面的研究鲜有报道。同时,坝上地区也是京津冀风沙源的主要策源地,是三北防护林建设的重点地带,已进行了

大规模的人工林建设^[11]。但是,许多人工林发生退化现象,水分亏缺是重要原因,其中的机理尚未阐明,而研究此地植被的土壤水势为解决人工林退化问题提供一定的依据。

生长季拥有良好的水热条件,植物在生长季生长迅速,是植物生长发育的关键时期,也是一直以来土壤水势方面研究的重点。因此,本研究通过选取小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)2 种坝上地区典型人工林,并选择结缕草(*Zoysia japonica*)作为对照,通过 2019 年 5 月 1 日至 10 月 31 日长时间序列、高分辨率监测人工林和草地生长季水势值时空变化及其变异程度,以及土壤水势对大气温度和降雨的响应,以期为当地人工林建设与水资源管理提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北省张家口市张北县二台镇林场($114^{\circ}52'$ — $114^{\circ}53'E$, $41^{\circ}20'$ — $41^{\circ}21'N$),属于坝上地区,海拔为 1 370~1 390 m,地势平缓且无陡坡。气候为温带大陆性季风气候,整体寒冷干燥,多冰雹、霜冻等自然灾害。年均气温 $3\sim 4^{\circ}C$,历史极端低温为 $-34.8^{\circ}C$,极端高温为 $33.4^{\circ}C$ 。年均降水量不足 400 mm,降雨分布少且不均,集中在 6—9 月,多为小雨、中雨。蒸发量较大,年蒸发量可达 1 700 mm。土壤上呈现弱酸性或中性,母质多为玄武岩、花岗岩,土壤中砂粒含量较高,土壤种类以沙土和栗钙土为主。研究区土壤较为贫瘠,退化程度较高。土壤经历季节性冻结,土壤中有机质以及氮磷钾等含量不高。研究区在植被上属于林草过渡带,同时存在乔木、灌木、草

地等多种植被类型。乔木主要源于20世纪大规模的人工林建设,小叶杨与樟子松是主要的造林树种;灌木以荆条、柠条、沙棘为主;草本植物种类丰富且分布广泛,主要为结缕草。

1.2 试验设计

2018年8月选择坝上地区栽植面积最大的人工林小叶杨和樟子松,在当地分布广泛的牧场选用结缕草进行对照,开挖1 m剖面,剖面内在10,30,50,70,90 cm分别布设土壤水势探头(MPS-6探头,美国),测量土壤水势,水势测量范围为 $-9 \sim -100\ 000$ kPa,分辨率为0.1 kPa,布设完毕回填土壤,并等待土壤沉降8个月。监测时间范围为2019年5月1日至2019年10月31日,数据通过EM50收集,时间间隔为15 min。同时布设HOBO小型气象站(U30,美国),采用气象数据,包括降雨量(分辨率0.2 mm)、温度(分辨率0.1 $^{\circ}\text{C}$),气象数据每5 min记录1次。

1.3 数据处理

因土壤处于非饱和状态,研究的土壤水势为重力势和基质势之和,不含压力势,剔除土壤水势检测过程中的异常值。实际上,土壤水势对水分的响应呈指数形式,在统计降雨和晴天水势差与降雨、大气温度的关系时,将土壤水势换成以10为底的log函数进行计算。采用Excel 2010软件进行数据的整理,采用SPSS 22.0软件进行数据分析,采用Origin 2021软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 温度与降雨特征

由图1可知,在5月大气温度波动升高,中间经历数个升温—降温过程。6—9月呈现先缓慢上升,而后缓慢下降。日均温最高时段位于7月15—28日,日均气温超过 $20\ ^{\circ}\text{C}$ 。10月日均气温快速波动下降,也经历数个降温—升温过程。在13,14,15,25,28日,日均温度低于 $0\ ^{\circ}\text{C}$ 。从变异程度来看,5月、10月变异十分剧烈,变异系数分别为36.6%,113.0%。而5—9月变异较小,变异系数为13.7%~21.5%。

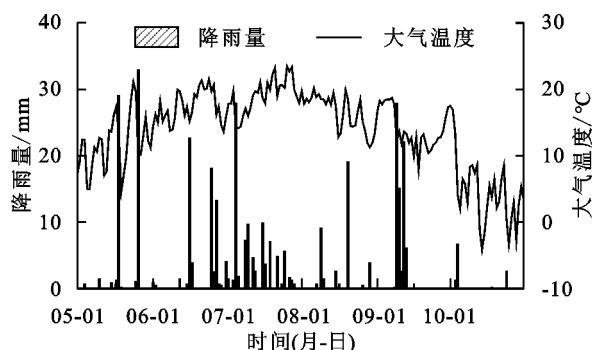


图1 监测期大气温度与降雨量

监测期总降雨量为347.4 mm,占当年总降雨量

(415.6 mm)的83.6%。监测期降雨主要发生在5—9月,合计299.8 mm,占年降雨量的72.1%。按照20 h为间隔将降雨事件进行划分^[12],共发生降雨事件38场,其中 ≤ 5 mm的降雨22场,降雨量总计41.2 mm。5~15 mm的降雨5场,降雨量总计34.8 mm, >15 mm的降雨11场,降雨量总计271.4 mm。 >10 mm的降雨场次少,但单场降雨量高,因此,合计降雨量高,占监测期总降雨量的比例高。

2.2 监测期人工林和草地土壤水势时空变化与变异

由图2、图3可知人工林和草地在监测期内不同时间土壤水势的变化。3种植被的土壤水势都呈现剧烈波动,5月、6月和10月土壤水势较高,而在生长季盛期(7月、8月)较低且处于剧烈波动状态,小叶杨在5月、7月的平均水势分别为 -28.01 , -743.53 kPa。3种植被土壤水势变化趋势存在明显差异,不同植被进入土壤水势剧烈变化的时间点不同,结缕草最早,5月中旬出现短暂的水势降低,小叶杨其次,出现在6月中旬,樟子松最晚,直到7月下旬。在生长季结束后,小叶杨10 cm保持稳定且较高的土壤水势值,为 $-24.05 \sim -32.56$ kPa,但樟子松和结缕草,在表层(10 cm)出现土壤水势的下降,例如结缕草,由10月1日的 -68.84 kPa下降到10月31日的 -886.82 kPa。此外,樟子松和结缕草都出现双峰现象,即出现2个明显的水势下降,但是小叶杨只有1个。以不同深度处的土壤水势进行比较,监测期内小叶杨、樟子松、结缕草土壤水势最低值出现在70,10,50 cm土层,其值分别为 $-1\ 257.24$, -747.97 , -830.11 kPa。由表层向深层变化趋势不同,小叶杨和结缕草为先减后增,而樟子松表现为先减后保持平稳。3种植被的土壤水势最高值都出现在深层,小叶杨和结缕草为90 cm,樟子松最高值虽然出现在70 cm土层,但与90 cm的土壤水势值非常接近。以监测期不同植被在不同土层的土壤水势进行比较,小叶杨和结缕草在10,30,50 cm,小叶杨和樟子松在10 cm无显著差异($p>0.05$),其他均存在显著差异($p<0.05$)。

小叶杨、樟子松和结缕草土壤水势变异系数最大值分别出现在9月10 cm、7月10 cm、7月30 cm处,其值分别为 -155.9% , -208.0% , -183.6% 。从不同时间土壤水势的变异系数(图4)来看,在监测期的前期和后期(5月、10月),土壤水势的变异最小,小叶杨10月在不同土层的变异系数为 $-2.8\% \sim -7.5\%$,在7月和9月,土壤水势的变异较大,9月不同土层的变异系数为 $-67.1\% \sim -155.9\%$ 。从空间来看,土壤水势的变异随着土层深度加大,土壤变异系数逐渐减小。樟子松7月各土层土壤水势变异系数逐渐减小,分别为 -208.0% , -152.0% , -12.0% , -1.9% , -1.2% 。但樟子松8月30 cm变异系数 <50 cm,总体趋势保持

土层加深变异系数减小。

当土壤水势低于 $-1\ 500\ \text{kPa}$ 时,植物很难从土壤中吸收水分^[13]。草地和人工林在 8 月、9 月均出现长时间的土壤水势低于 $-1\ 500\ \text{kPa}$ 。草地(结缕草)主要出

现在 30,50 cm,樟子松出现在 10,30,50 cm,而小叶杨各土层都出现长时间的土壤水势低于 $-1\ 500\ \text{kPa}$ 。从最低值来看,小叶杨和樟子松的最低值分别为 $-5\ 573.45$, $-5\ 320.35\ \text{kPa}$,低于结缕草的 $-4\ 317.12\ \text{kPa}$ 。

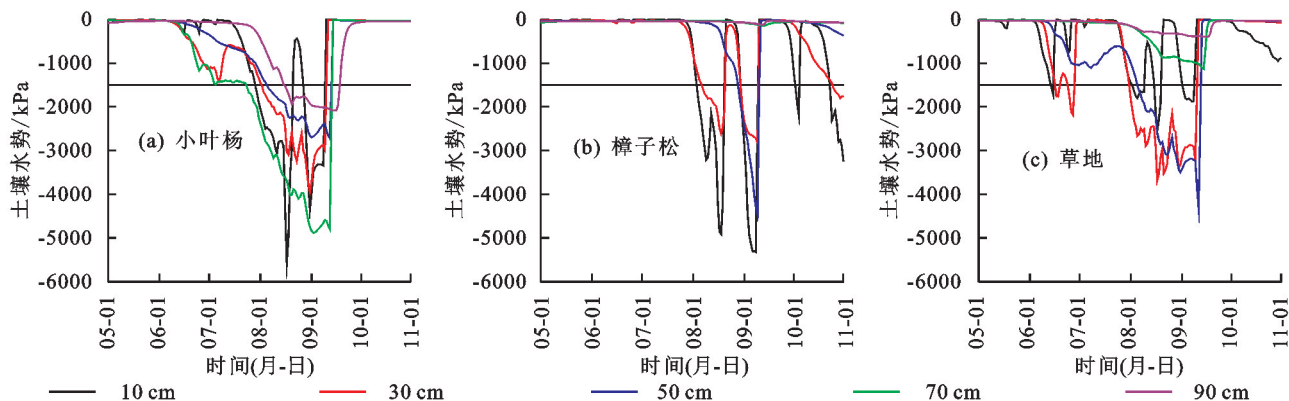


图 2 人工林和草地生长季土壤水势随时间变化

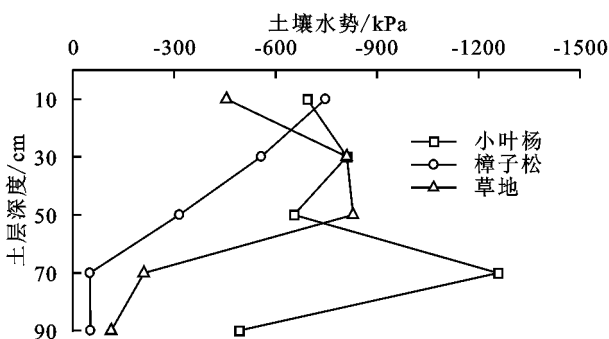


图 3 人工林和草地生长季土壤水势随空间变化

2.3 人工林和草地土壤水势对晴天的响应

在监测期每月选取 3 个典型晴天,共计 18 个,找

到每个典型晴天的水势最高值与最低值,经过标准化处理后,将土壤水势差值与日平均气温进行相关分析。水势差的最大值与日平均气温之间存在显著的相关关系($p < 0.05$)。

不同植被土壤水势对日均温度的响应存在差异,但并未达到显著相关($p > 0.05$)。通过回归分析,小叶杨的回归方程为 $Y = AX^2 + BX + C$, $R^2 = 0.560$,樟子松和结缕草的回归方程为 $Y = Ae^{BX}$, $R^2 \geq 0.498$ 。由图 5 可知,随着日均温度升高,日均温度与水势差之间的斜率逐渐增大,即单位温度对土壤水势差的改变作用更加明显。

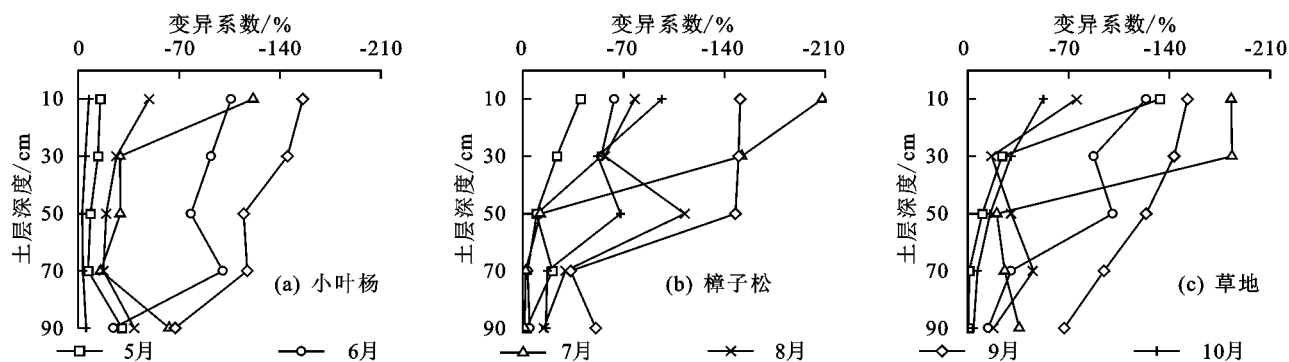


图 4 人工林和草地生长季土壤水势变异系数

选择 5 个典型晴天,分别为生长季前、生长季前期、生长季中期、生长季后期、生长季后,其平均温度分别为 $7.43, 20.53, 18.56, 17.73, 5.11\ ^\circ\text{C}$ 。由图 6 可知,生长季前,土壤水势值均 $> -80\ \text{kPa}$,此过程仅有少数几个探头监测到水势发生变化且变化较小。小叶杨在 90 cm 的水势从 $-74.06\ \text{kPa}$ 上升到 $-60.01\ \text{kPa}$,樟子松在 70 cm 也发生类似的水势缓慢上升,不同于小叶杨和樟子松,结缕草 10 cm 的水势从 $-15.68\ \text{kPa}$ 下降到 $-20.78\ \text{kPa}$ 。水势探头监测到小叶杨 10 cm 处水势变化最大,其变化值为 $14.05\ \text{kPa}$ 。生长季后不同植被土壤水势变

化差异明显,小叶杨在生长季后各层均无显著变化,樟子松在 10 cm 发生迅速下降,在 4 天内累计下降 $1\ 274.07\ \text{kPa}$ 。而结缕草表层发生周期性的波动,4 天内无显著下降。相较于生长季前和生长季后,生长季土壤水势变化明显,生长季前期,小叶杨和结缕草均发生水势的显著下降,其中小叶杨水势下降出现在 30, 70 cm 土层,结缕草主要发生在 10, 50 cm。以结缕草 50 cm 为例,在此过程中,其水势下降 $627.49\ \text{kPa}$,樟子松没有发生显著变化。生长季中期,3 种植被在 10, 30 cm 均出现周期性波动下降,同时 10 cm 的波

动幅度均显著 >30 cm。生长季后期,3种植被均出现周期性波动,但具体情况不同,小叶杨为10 cm波

动上升,樟子松为波动下降,结缕草在10,30 cm都出现波动,在10 cm波动下降,30 cm波动上升。

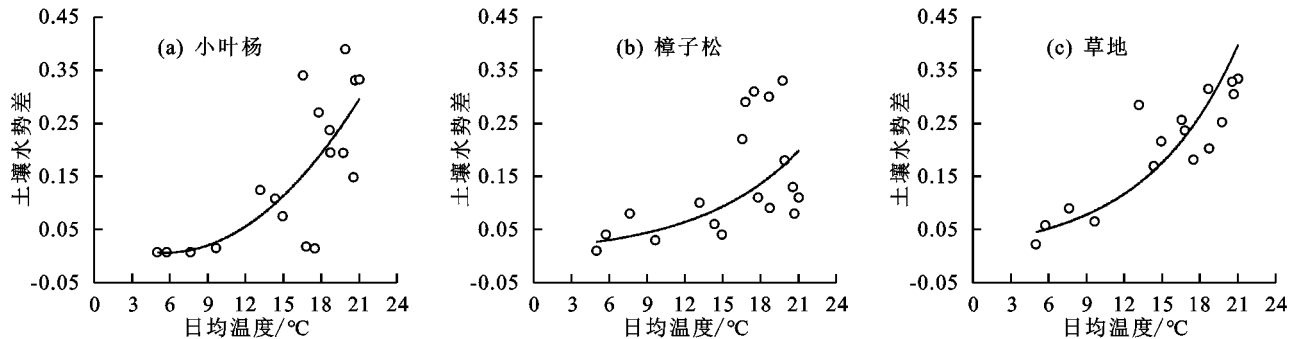


图5 人工林和草地土壤水势差与日均温度关系

2.4 人工林和草地植被土壤水势对降雨的响应

选取12场经过冠层或草本层截留到达土壤层并明显触发响应的降雨事件,降雨量为7~43 mm,合计259.4 mm。降雨结束1天后,降雨充分深入土壤并完成再分布,因此,选取此时土壤水势数据作为降雨响应后的土壤水势,同时收集降雨前的初始土壤水势。同样经过标准化处理,计算标准化后的降雨前后土壤水势差。将土壤水势差与降雨量进行相关分析,两者之间存在显著相关关系($p<0.05$)。不同植被土壤水势对降雨的响应存在差异,但并未达到显著相关($p>0.05$)。通过回归分析,在降雨量与土壤水势差之间构建函数,函数为开口向上的抛物线。函数形式为 $Y=AX^2+BX+C$, $R^2\geq 0.583$ 。由图7可知,随着降雨量增大,对于某特定降雨事件前后土壤水势差也随之增大。

根据中国气象局降雨等级分类,选取小雨(9.0 mm)、中雨(23.2 mm)、大雨(43.0 mm)事件各1场,分析剖面土壤水势对不同降雨量的响应。由图8可知,小雨量状况下,土壤水势的变化程度较小,降雨后小叶杨10 cm土壤水势呈现周期性波动,深层水势无显著变化。樟子松为表层阶梯式上升,深层无响应。结缕草变化最为剧烈,由降雨前的一1 824.99 kPa上升到-422.80 kPa,并在稳定维持一段时间后开始下降,同时30 cm土壤水势呈现周期性波动。在中雨的作用下,3种植被在降雨后10 cm水势均迅速上升,并在较长时间内维持在较高值,在30 cm处,3种植被水势变化有差异,小叶杨为缓慢下降,樟子松为迅速上升,并达到较高值,而结缕草呈现不规则波动趋势,水势维持稳定。大雨事件下,3种植被水势均呈现剧烈响应,樟子松降雨前期10,30,50 cm土壤水势分别为-4 656.05, -2 712.67, -4 359.28 kPa,降雨后,土壤水势快速上升到-100 kPa以上。从响应深度来看,各植被响应深度均大于中雨、小雨事件,小叶杨在10,30 cm水势发生变化,而在樟子松和结缕草,10,30,50 cm发生变化。

3 讨论

人工林和草地均出现土壤水势波动且进入波动的时间点不同,5月3种植被的水势值均较高,因为5月大气温度较低因而蒸发较弱,同时植被还未进入生长发育盛期,进入6月后,小叶杨和结缕草的水势开始波动下降,可能因为6月大气温度升高,水分蒸发,结缕草没有冠层,热量相对于其他植被更多地进入土壤,热量促使土壤水分蒸发,导致结缕草的土壤水势降低,小叶杨因为进入生长期,对于水分的需求增加,水分通过蒸腾作用进入到空气中,导致土壤水势下降,樟子松直到7月下旬,水势才发生显著的变化,可能与樟子松本身的生长特性有关^[14]。从生长季结束时的水势可知,9月下旬开始,降雨减少,温度降低,植被的生长发育减缓,植被对于水分的需求减少,小叶杨和结缕草在9月下旬开始土壤水势均处于高位,9月下旬樟子松在10,30 cm的土壤水势有明显的下降。说明樟子松的生长期相对于小叶杨和结缕草靠后。同时,在生长季盛期,人工林和草地均呈现反复水势上升一下降过程,是土壤蒸发、植被蒸腾、降雨补充等过程相互影响所导致的。90 cm土层土壤水势在整个监测期都处在较高值,主要原因为:一是深层与大气隔绝,传导到深层的热量较少^[15],而温度梯度又是水分向上运动的驱动力;二是土层越深,植被根系有限,吸水能力降低;三是深层土壤离地下水较近,含水量较高使得土壤水势较高^[16]。从变异系数来看,表层(10 cm)的土壤水势变异系数最大,是因为表层是大气对土壤的直接作用层,同时植被根系在表层分布最密,根系吸水从而降低土壤水势,降雨输入土壤时,中小降雨被表层吸收,无法到达深层。因此,在蒸腾、降雨输入、根系吸水的多重作用下,表层土壤水势的变异最为剧烈。7月和9月变异系数最大,经过研究降雨量可发现,7月和9月的降雨量分别达95.0,73.6 mm,远高于其他月份,说明降雨是直接影

响土壤水势变异的主要因素。大气温度对土壤水势存在明显的作用,主要有 2 种趋势;第 1 种是土壤水

势随着大气温度做周期性运动;第 2 种是土壤水势随着大气温度变化均匀地升高或下降。

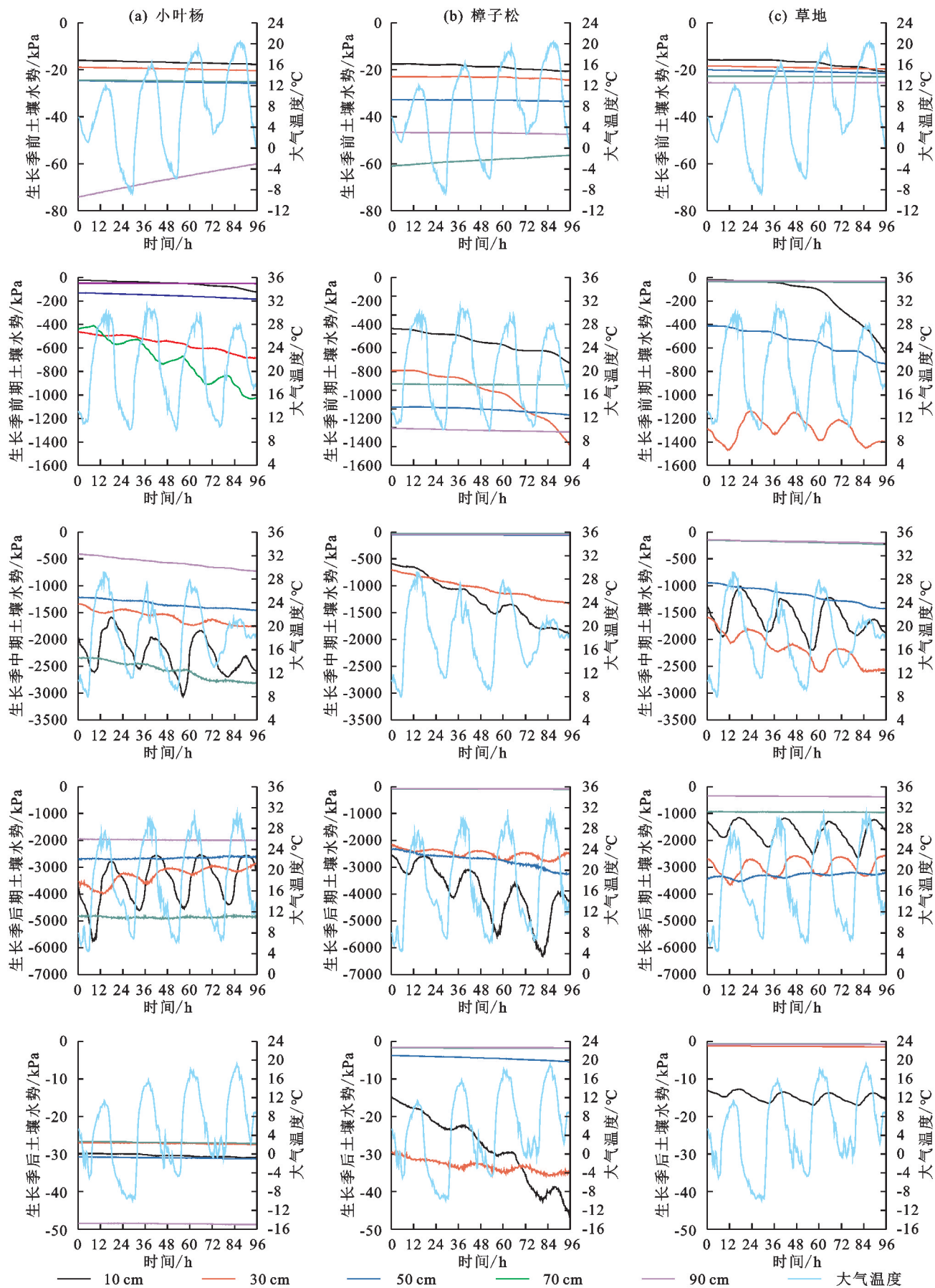


图 6 不同时期典型晴天剖面土壤水势动态

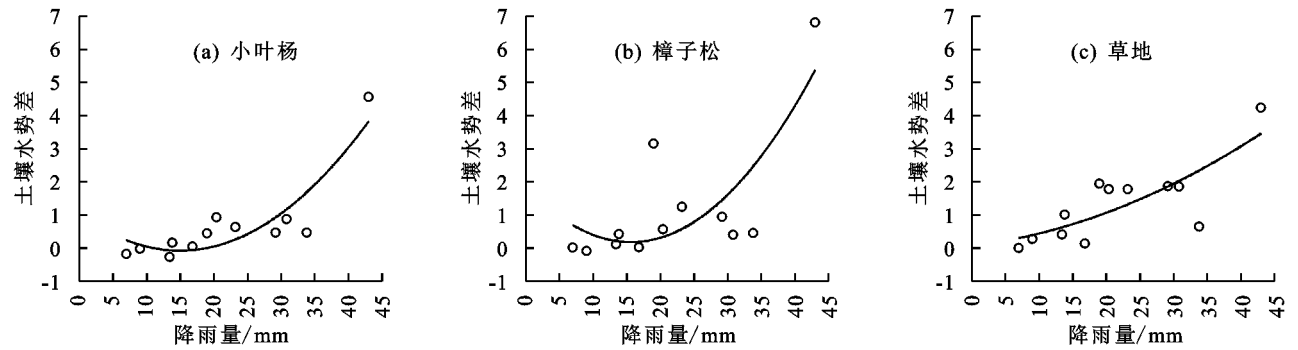


图 7 人工林和草地土壤水势差与降雨量关系

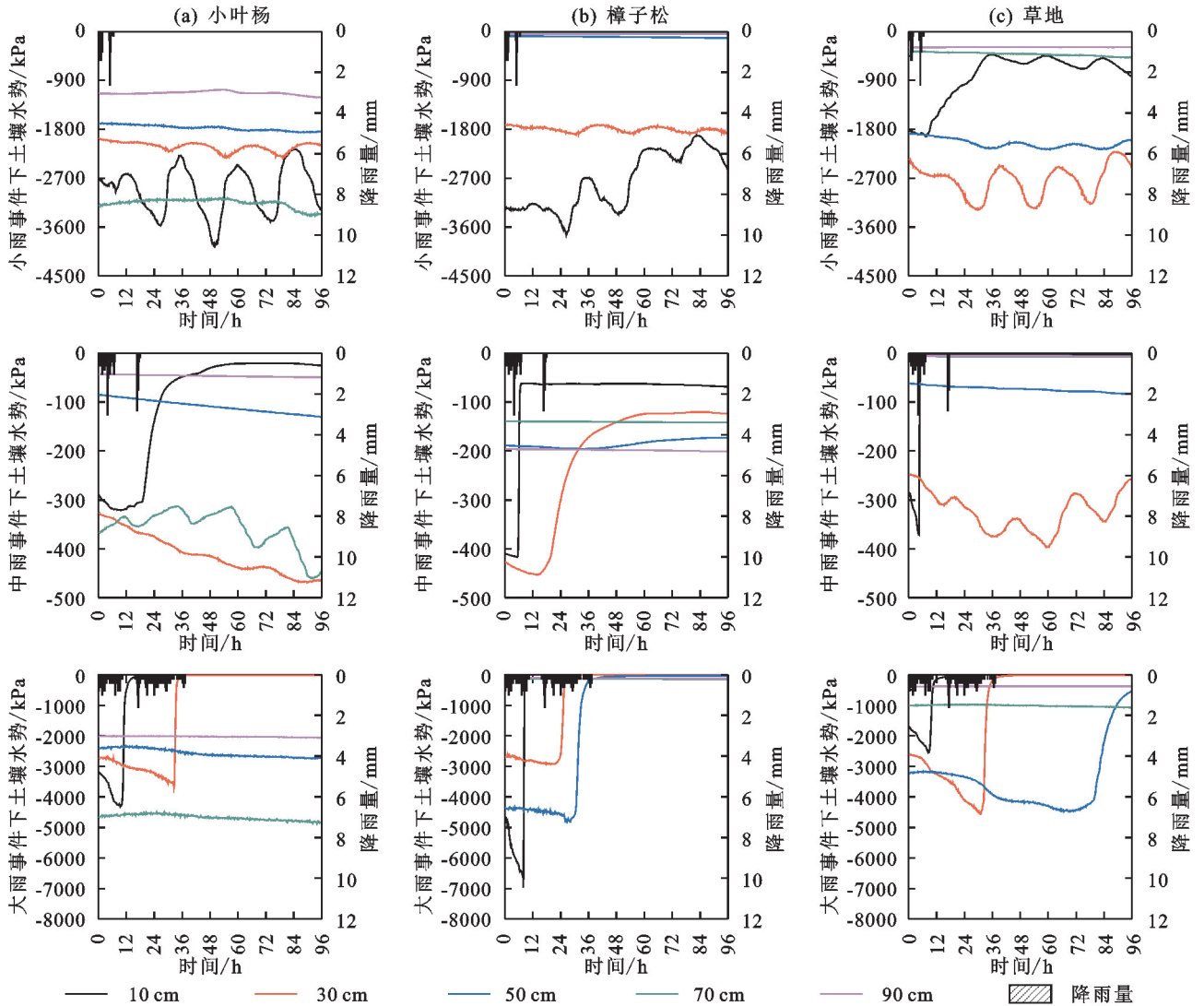


图 8 不同降雨量作用下剖面土壤水势动态

大气温度由太阳辐射决定^[17],太阳的辐射到达地面后,一部分被反射,另一部分通过多孔介质向土壤传导,使得土壤温度升高。在白天,太阳辐射加大,土壤吸热导致剖面土壤温度梯度为负值,产生向下的气态水通量,导致土壤含水率增大,进一步提高土壤水势,晚上则相反^[18]。同时,来源于植被水分的吸收,使得水势下降。水势升高仅在生长季前小叶杨深层发生过,因为5月初深层土壤温度较低,处于解冻状态,水分含量升高使得水势升高^[19]。2种趋势都有2个共

同的特点:首先,土壤水势的变化具有滞后性,因为热传递需要时间,因此,土壤水势相对于大气温度存在滞后效应^[20];其次,土壤水势的变化一般出现在表层(10 cm),越向深层土壤水势变化幅度越小,因为表层土壤温度吸收大部分的太阳辐射,温度上升最大,次表层接受的太阳辐射有限,温度上升不大^[21]。

不同降雨量下的剖面水势动态表明,土壤水势对降雨的响应也具有滞后效应,10 cm水势最先响应,经过一定时间后,30 cm水势接着响应,证明降雨的

输入是土壤水势变化的主要原因。在小雨事件下,各植被响应的程度最小且呈波动状,有研究^[22-23]表明,降雨要经过冠层、枯落物的截留后,到达土壤层,才能触发改变土壤水分并影响土壤水势,小叶杨作为阔叶乔木,其截留能力强,樟子松是针叶乔木,截留能力相对弱,结缕草作为草本植物,单位面积生物量较小,截留能力最弱,因此,整体响应程度为小叶杨<樟子松<结缕草。中雨事件下,3种植被的10 cm水势迅速升高,但在30 cm情况有所不同,小叶杨在30 cm水势均匀下降,此趋势在降雨前已经发生,可能是植被对于水分的吸收和土壤蒸发导致^[24]。樟子松在30 cm水势发生明显的上升,说明水分达到30 cm土壤层,并大大改变水分含量,进一步改变水势含量。结缕草在30 cm土壤水势呈现波动变化,降雨前后相比变化较小,可能是仪器受土壤温度导致的。大雨事件下,除截留作用,还要考虑到地表在大雨事件下可能产生地表径流,从而影响到入渗水量进而影响土壤水势。本试验所研究大雨事件降雨量为43.0 mm,降雨历时为37.33 h,最大30 min雨强为2.8 mm/h,降雨分布较为均匀,有利于降雨入渗。同时。奚宏等^[25]的研究表明,在坡度为5°条件下,径流系数为0~0.03,由于本试验位于坝上地区,坡度较缓,大雨事件下不产生地表径流或产生较少的地表径流。3种植被表层水势先降低,后迅速上升到较高值。在降雨到达探头前,在植物吸收和土壤蒸发的多重作用下,土壤处于一个快速下降的趋势。同时响应存在滞后,因为降雨到达水分探头引起水势变化需要时间。水势变化量一般为大雨>中雨>小雨,但存在例外,小叶杨和樟子松在中雨下的水势变化量非常小,因为中雨事件发生在6月中旬,小叶杨和樟子松此时水势已经处于较高值,而水势须为负数,所以中雨在此状态下提升有限。

4 结论

(1)人工林和草地土壤水势变化趋势相同,在生长季前段和后段土壤水势较高,中期土壤水势进入波动下降期,但不同植被进入波动期时间不同,樟子松晚于小叶杨和结缕草。此外,小叶杨土壤水势最低值出现在70 cm处,为-1 257.24 kPa,樟子松出现在10 cm,为-747.97 kPa,结缕草出现在30 cm,为-830.11 kPa。小叶杨、樟子松和结缕草土壤水势变异系数最大值分别出现在9月10 cm、7月10 cm、7月30 cm处,其值分别为-155.9%,-208.0%,-183.6%。变异系数总体上生长季中期大于前期和后期,表层大于深层。

(2)晴天人工林和草地土壤水势差的最大值与日均温度之间存在显著的相关关系($p < 0.05$),其关系符合 $Y = AX^2 + BX + C$ 或 $Y = Ae^{BX}$, $R^2 \geq 0.498$ 。随着日均温度升高,水势差最大值也增大。典型晴天

大气温度在日内上下波动,土壤水势呈现滞后波动,这种关系在生长季浅层土壤最为明显。

(3)不同降雨量与土壤水势差呈现显著相关关系($p < 0.05$),随着降雨量升高,土壤水势差也随之升高,两者之间符合 $Y = AX^2 + BX + C$, $R^2 \geq 0.583$ 。典型降雨事件下,中雨和大雨剖面土壤水势迅速上升,小雨事件下主要呈现波动变化。从不同植被来看,草地较于人工林更为剧烈。

(4)相较于草地,8月、9月人工林土壤水势低于-1 500 kPa的土壤层更多,最低值更低。人工林吸取水分,需要花费更多的能量,是导致人工林退化的原因之一。但人工林退化原因复杂,还需要深入研究。

(5)本研究不足之处在于只监测2019年的土壤水势数据,而土壤水势在不同年份(平水年、枯水年、丰水年)存在怎样的差异,这种差异对环境因子如何响应,有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 吕振豫,刘姗姗,秦天玲,等.土壤入渗研究进展及方向评述[J].中国农村水利水电,2019(7):1-5.
- [2] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1987:8-18.
- [3] 杨湘,苏学德,李鹏程,等.不同土壤水势对克瑞森葡萄光合生理及果实品质的影响[J].西南农业学报,2020,33(7):1429-1434.
- [4] 吴沿友,胡林生,谷睿智,等.两种土壤含水量与水势关系[J].排灌机械工程学报,2017,35(4):351-356.
- [5] 李奕然,马英,宋献方,等.华北山区典型人工林土壤水势动态和水分运移规律[J].生态学报,2021,41(14):5622-5631.
- [6] 袁佳丽,温国胜,张明如,等.毛竹快速生长期的水势变化特征[J].浙江农林大学学报,2015,32(5):722-728.
- [7] 杨湘,苏学德,李鹏程,等.不同覆盖物对夏黑葡萄关键生育期土壤温度和土壤水势的影响[J].中国农学通报,2021,37(20):59-65.
- [8] 任涛,贾志峰,王智,等.毛乌素沙地地膜/地布覆盖下土壤水势动态[J].水土保持学报,2020,34(4):78-84.
- [9] Wang X P, Berndtsson R, Pan Y X, et al. Spatiotemporal variation of soil water potential and its significance to water balance for a desert shrub area[J].Soil and Tillage Research,2022,224:e105506.
- [10] 党宏忠,却晓娥,冯金超,等.土壤水分对黄土区苹果园土壤-植物-大气连续体(SPAC)中水势梯度的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):829-836.
- [11] Zhu L J, Ke Y H, Hong J M, et al. Assessing degradation of lake wetlands in Bashang Plateau, China based on long-term time series Landsat images using wetland degradation index[J].Ecological Indicators,2022,139:e108903.
- [12] Lozano P J, Schnabel S, Ceballos B A. The role of vegetation covers on soil wetting processes at rainfall

- event scale in scattered tree woodland of Mediterranean climate[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 951-961.
- [13] 邵明安. 土壤物理与生态环境建设研究文集[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000: 145-148.
- [14] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 河北坝上樟子松人工林径向生长及其对气候因素的响应[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1830-1840.
- [15] 付强, 马梓昇, 李天霄, 等. 覆盖物对冻融土壤热量空间分布与传递效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 292-298.
- [16] 赵玉峰, 罗专溪, 于亚军, 等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1301-1313.
- [17] 何志明, 李月臣, 金贤锋, 等. 考虑太阳辐射修正的重庆山地气温空间化模拟[J]. *资源科学*, 2019, 41(6): 1131-1140.
- [18] 马稚桐, 王文科, 张在勇, 等. 浅层包气带土壤水昼夜分布变化规律模拟研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 245-251, 260.
- [19] Sun L B, Chang X M, Yu X X, et al. Effect of freeze-thaw processes on soil water transport of farmland in a semi-arid area [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: e106876.
- [20] 张旭, 塔娜, 甄琦, 等. 寒旱区双层膜日光温室南侧不同保温结构土壤水热试验与模拟[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(8): 175-185.
- [21] 田梦, 高伟达, 任图生, 等. 条带覆盖免耕下吉林南部玉米行间土壤水分和温度的时空动态[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1297-1307.
- [22] Zhang R, Wang D, Yang Z Q, et al. Changes in rainfall partitioning and its effect on soil water replenishment after the conversion of croplands into apple orchards on the Loess Plateau [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 312: e107342.
- [23] 王铁浩, 王彦辉, 李振华, 等. 重庆铁山坪马尾松天然次生林降雨截持与贮水特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6542-6551.
- [24] 张鹏飞, 王融融, 戴燕燕, 等. 山西榆次不同植被土壤水分有效性与干燥化效应[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 192-198.
- [25] 奚宏, 唐继斗, 史东梅, 等. 坡度对紫色土坡耕地产流产沙特征的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(4): 19-25.
- (上接第 180 页)
- [11] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [12] Dzikiti S, Jovanovic N Z, Bagan R D, et al. Comparison of two remote sensing models for estimating evapotranspiration: Algorithm evaluation and application in seasonally arid ecosystems in South Africa[J]. *Journal of Arid Land*, 2019, 11(4): 495-512.
- [13] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. *地理研究*, 2013, 32(4): 617-627.
- [14] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 979-988.
- [15] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 等. 2000—2012 年陕甘宁黄土高原区地表蒸散时空分布及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(2): 499-507.
- [16] 刘可, 杜灵通, 候静, 等. 2000—2014 年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J]. *草业学报*, 2018, 27(3): 1-12.
- [17] 云龙, 段超宇, 李海霞. 宁夏水资源承载能力评价研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(1): 36-40, 50.
- [18] 吴洪相, 白耀华. 宁夏水资源公报(2001—2020 年)[R]. 银川: 宁夏回族自治区水利厅, 2001—2020.
- [19] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [20] Hurst H E. The long-term storage capacity of reservoirs[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineer*, 1951, 116: 770-799.
- [21] 皮贵宁, 贺中华, 游漫, 等. 2001—2020 年贵州省气候变化及人类活动对植被变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 160-167.
- [22] 宫菲, 杜灵通, 刘可, 等. 两种遥感蒸散产品在干旱半干旱地区的应用对比[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(1): 197-202.
- [23] 马小燕, 朱晓雯, 赵金涛, 等. 1995—2015 年宁夏沿黄城市带蒸散发时空变化特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(2): 216-224.
- [24] 王志成, 李稚, 张辉, 等. 阿克苏河流域灌区土地利用变化对蒸散耗水的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(6): 79-85.
- [25] 赵芸, 贾荣亮, 滕嘉玲, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被演替生物土壤结皮盖度对沙埋的响应[J]. *生态学报*, 2017, 37(18): 6138-6148.
- [26] 宁夏回族自治区统计局. 宁夏统计年鉴(2001—2020 年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001—2021.
- [27] 郑方, 马力文, 赵慧. 宁夏灌区压减水稻面积对水环境的影响[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(19): 25-29.