

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

GAO Jia, WANG Wenke, ZHAO Ming, MA Zhitong, HOU Xinyue, and LI Wanxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析

Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based on time series NDVI data

贺军亮, 韦锐, 李丽, 金雁琳 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 91-98

基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量

Estimation of groundwater evaporation based on lysimeter experiment and analytical solution in the Mu Us sandy land

王文科, 尹红美, 黄金廷, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 1-6

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175-182

基于Landsat遥感影像的围场县植被覆盖时空格局变化

Change in temporal-spatial pattern of vegetation coverage in Weichang County based on Landsat remote sensing image

周智勇 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 81-90

承德市土壤重金属空间结构与分布特征

Spatial structure and distribution characteristics of heavy metals in the soil in Chengde

安永龙, 万利勤, 李霞, 殷志强, 卫晓峰, 何泽新, 贾凤超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 119-131

汶川震区北川县泥石流流域崩滑体时空演变特征

Spatio-temporal evolution characteristics of landslides in debris flow catchment in Beichuan County in the Wenchuan earthquake zone

李明威, 唐川, 陈明, 史青云 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 182-190



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112005

高佳, 王文科, 赵明, 等. 毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 34-42.

GAO Jia, WANG Wenke, ZHAO Ming, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 34-42.

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期 土壤水分时空分布特征

高 佳^{1,2}, 王文科^{1,2}, 赵 明^{1,2}, 马稚桐^{1,2}, 侯昕悦^{1,2}, 李婉歆^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054;

2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 在水资源短缺的沙地生态系统中, 土壤水分是植被恢复和水资源管理的主要控制因子, 正确认识沙地土壤水分的分布特征及时空变化规律是促进沙地水资源可持续发展的基础。以毛乌素沙地为研究区, 利用原位试验观测、经典统计学分析和聚类分析相结合的方法, 揭示了有无植被覆盖下的土壤剖面水分时空变化特征, 探讨了植物生长对土壤水分布的影响。结果表明: 在 2016 年非冻结期内, 地下水水位埋深较浅时, 裸地与植被覆盖情况下土壤平均含水率均随土壤深度的增加而增大, 可将 0~350 cm 土层划分为气候影响层、过渡层与地下水影响层。裸地剖面平均含水率为 23.59%, 变异系数为 4.24%, 属于弱变异, 剖面含水率在观测期间明显上升, 并在 8 月中旬强降雨时上升速率达到最大; 植被覆盖下土壤剖面平均含水率为 17.74%, 变异系数为 15.61%, 属于中等变异, 剖面含水率在观测期间显著下降, 在 8 月沙柳发育成熟后剖面含水率下降最快。在垂向深度上, 植被对土壤剖面含水率的影响近似呈高斯曲线变化, 对过渡层含水率的影响最大, 占总影响的 50% 以上, 对气候影响层与地下水影响层的影响相对较小, 且随着植物生长, 气候影响层受到的相对影响逐渐减弱, 地下水影响层受到的相对影响逐渐增强。研究成果可为半干旱区毛乌素沙地合理的水资源调控以及沙地生态系统的稳定发展提供参考依据。

关键词: 土壤水分; 时空分布; 裸地; 植被覆盖; 毛乌素沙地

中图分类号: S156.4; P641.131

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0034-09

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

GAO Jia^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, ZHAO Ming^{1,2}, MA Zhitong^{1,2}, HOU Xinyue^{1,2}, LI Wanxin^{1,2}

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Chang'an University, Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In the sandy land ecosystem with water shortage, soil moisture is the main controlling factor for

收稿日期: 2021-12-05; 修订日期: 2022-01-08

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130710); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF05-01); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2021JCW-16)

第一作者: 高佳(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: gjdehd@163.com

通讯作者: 王文科(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区地下水文过程与生态效应研究。E-mail: [wengkew@chd.edu.cn](mailto:wenkew@chd.edu.cn)

vegetation restoration and water resources management. Therefore, a correct understanding of the distribution characteristics and spatial-temporal variation of soil moisture in the sandy land is the basis for promoting the sustainable development of sandy land water resources. The Mu Us desert is taken as the study area, in-situ experimental observations, classical statistical analysis and hierarchical clustering analysis methods are used to reveal the spatial and temporal changes of soil profile moisture with or without vegetation cover, and the effect of plant growth on soil water distribution are discussed in this paper. The results show that in the non-freezing period of 2016, when the groundwater depth was relatively shallow, the average soil moisture content increased with the increasing soil depth under the bare land and vegetation coverage. The soil layer of 0–350 cm thick can be divided into the climate-influencing layer, transition layer and groundwater-influencing layer. The average moisture content of the bare soil profile is 23.59%, and the coefficient of variation is 4.25%, which belongs to weak variation. The profile moisture content increased significantly during the observation period, and the rate of increase reached the maximum when the heavy rainfall event occurred in mid-August. The average moisture content of the soil profile under the vegetation cover is 17.74%, and the coefficient of variation is 15.61%, which is a medium variation. The water content of the profile dropped significantly during the observation period, and it dropped the fastest in August after the *Salix* matures. At the vertical depth, the influence of vegetation on the soil profile moisture content approximates a Gaussian curve, and has the greatest influence on the moisture content of the transition layer, accounting for more than 50% of the total influence. The impact on climate-influencing layer and groundwater-influencing layer is relatively small. As plants grow, the relative influence on the climate-influencing layer gradually weakens, and the relative influence on the groundwater-influencing layer gradually increases. The research results can provide references for the rational regulation of water resources in the semi-arid Mu Us Sandy Land and the stable development of the sandy land ecosystem.

Keywords: soil moisture; spatial and temporal distribution; bare land; vegetation cover; Mu Us desert

土壤水分是干旱地区植物生存生长和分布的主要限制因素,也是制约沙地生态系统水分循环和植被恢复的关键因子^[1-3],影响着地下水-土壤-植被-大气连续系统中能量、水分和物质的循环演化过程^[4-5]。由于气象、土壤、地貌、植被等因素在时空尺度上的多变性,土壤水分呈现出不同的时空变化特征^[6]。充分认识沙地土壤水分的时空变异特征及分布规律,对提高模拟与预报水文过程的准确度、深入理解沙地生态系统的结构及其稳定性具有重要意义^[5]。

目前,许多学者对沙地土壤水分的时间及空间变化进行了相关研究^[7-10]。诸多研究表明,沙地土壤水分随时间的变化主要受到不同季节降水量分布的影响^[7],根据季节动态变化可大致划分为春季水分积累期、夏季水分消耗期与秋季水分稳定期^[8-9]。此外,陈洪松等^[11]、殷地迟等^[12]的研究表明,植被覆盖是引起土壤剖面含水量差异的重要因素。一般认为,植被覆盖最少的流动沙丘土壤含水量最高,半流动沙丘次之,植被覆盖最多的固定沙丘含水量最低^[13-14]。旱区沙地生态系统中的植被生长会消耗大量深层土壤水,使得土壤水分严重短缺,最终导致植物群落退化甚至

消亡^[15],阻碍了当地的植被重建和生态恢复。纵观已有研究,关于毛乌素沙地土壤水分时空变化的探讨大多围绕降水^[7,16]、沙丘不同类型^[17-18]及不同部位^[19-21]等因素,尤其关注沙地浅层土壤水分在水平空间上的差异^[22]。而对于裸地与植被覆盖下,垂向上土壤含水量时空变化的对比研究及其影响因素探讨较少,对于大气、植被、土壤水和地下水之间的相互作用的研究更是不足。

基于此,本文通过土壤水分原位监测试验,应用经典统计学、聚类分析等方法,对比分析了毛乌素沙地浅水位埋深情况下裸土与植被覆盖土壤剖面的水分分布模式以及时空变化特征,并探讨了植被不同生长阶段对剖面土壤水及地下水分布的影响,本研究可为半干旱沙漠植被恢复区的物种选择、土壤水分利用和水资源管理提供支撑。

1 研究区概况

试验区位于内蒙古乌审旗,地处毛乌素沙地中南部(图1),该区多年平均气温 5.6℃,年日照时数 2 600 h,年均蒸发量为 2 109.2 mm,多年平均降水量 386.1 mm。

年内降雨主要集中在 7—9 月, 约占全年总降水量的 67.2%。2016 年属于平水年, 年内降水总量为 361.8 mm, 观测期内降水总量为 357.1 mm。研究区内沙丘与丘间洼地相间分布, 沙地土壤以风积沙为主。风积沙质地均一, 渗透能力强, 土壤持水率弱。田间持水量为 6.85%, 凋萎系数为 0.7%, 丘间洼地地下水平均埋深为 0.4~3 m, 毛细上升高度可达 50~60 cm。研究区的植被类型为草本, 灌丛, 灌木等。沙柳是多年生深根灌木, 生长在沙丘或丘间洼地, 是毛乌素沙地重要的固沙植物, 在沙区植被的复建过程中具有极其重要的地位。

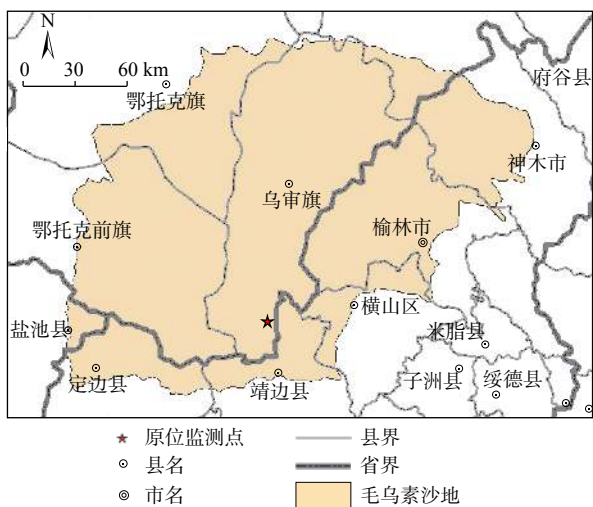


图 1 研究区范围及原位监测点位置
Fig. 1 Scope of the study area and location of the in-situ monitoring point

2 研究方法 with 数据获取

2.1 试验设置及土壤水分测定

原位监测站点位于乌审旗河南乡的国家气象站内, 布设了 2 个底部和壁面密封的蒸渗仪。蒸渗仪直径 200 cm, 深度 420 cm, 均回填了当地天然均匀的风积沙。其中 1 个蒸渗仪中于 2015 年种植了 1 株沙柳幼苗, 另 1 个蒸渗仪中为裸土。实验室测得 2 个蒸渗仪中不同深度土壤的平均物理参数见表 1。此外, 分别测得裸土饱和含水率为 31.0%, 沙柳地土壤饱和含水率为 30.6%。2 个蒸渗仪中均布设了含水率探头(5 TM, 1%~2%)和地下水水位监测的液位计(Diver, ±0.05%)。

表 1 均质风积沙的物理参数

Table 1 Physical parameters of the homogeneous aeolian sand measured in the laboratory

| 土壤容重 /(g·cm ⁻³) | 残余含水率 /(cm ³ ·cm ⁻³) | 饱和含水率 /(cm ³ ·cm ⁻³) | 渗透系数 /(m·d ⁻¹) |
|--------------------------------|--|--|-------------------------------|
| 1.45±0.005 | 0.014±0.002 | 0.31±0.009 | 6.2±0.6 |

在进行观测试验前已对所有仪器进行校正以保证其监测结果的准确性。裸地剖面的含水率探头布设在地表以下 3, 10, 20, 30, 50, 80, 150, 170, 190, 210 cm 处, 沙柳地剖面的含水率探头布设在 3, 10, 20, 30, 50, 80, 150, 250, 350 cm 处。各个观测仪器存储数据频率均为每 5 min 1 次。观测时间为 2016 年 5—11 月, 当地土壤的冻结期为 12 月至次年 4 月。裸地与沙柳地的初始地下水水位分别为 204, 225 cm。

2.2 数据分析

利用 Kriging 法对相邻观测数据进行插值, 确定了 0~350 cm 剖面 10 cm 间距任意给定位置的土壤含水率。

2.2.1 经典统计学分析

变异系数 CV 可以表明含水率的离散程度, 计算公式为:

$$CV = \frac{S}{x} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S——含水率标准差;

x——土层含水率均值。

当 CV<10% 时为弱变异, 当 10%≤CV≤100% 时为中等变异, CV>100% 时为强变异^[23]。

2.2.2 聚类分析

本研究以不同土层土壤含水率为基础, 采用层次聚类分析法(Hierarchical Clustering Analysis, HCA)根据含水率的相似性对土壤垂直剖面进行分层。样本之间的距离为欧式距离, 裸地与沙柳地的欧式距离均选为 10。

3 结果与分析

3.1 土壤水分空间变化特征

土壤平均含水率随深度的变化见图 2。裸地与沙柳地 2 种情况下, 土壤平均含水率均随着深度的增加而增大。由于植物遮荫作用, 沙柳地土壤表层(<5 cm)含水率略大于裸地表层含水率, 但其余土层沙柳地含水率均显著小于裸地。为了更好地分析土壤垂直剖面水分动态, 采用层次聚类分析法将裸地与沙柳地剖面进行分层, 见图 3。欧式距离为 10 时, 裸地与沙柳地均被分为 3 层, 裸地的浅层为 0~80 cm, 中层为 80~170 cm, 深层为 170~350 cm; 沙柳地的浅层为 0~150 cm, 中层为 150~250 cm, 深层为 250~350 cm。

裸地情况下土壤 0~350 cm 剖面平均含水率为 23.59%, 浅层、中层及深层平均含水率分别为 11.65%、19.97%、30.71%(表 2)。浅层土壤含水率较低, 且随深

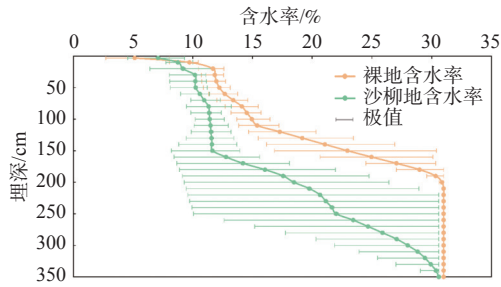


图 2 裸地与沙柳地土壤平均含水率垂直分布图

Fig. 2 Vertical distribution of the average soil moisture content of the bare land and Salix land

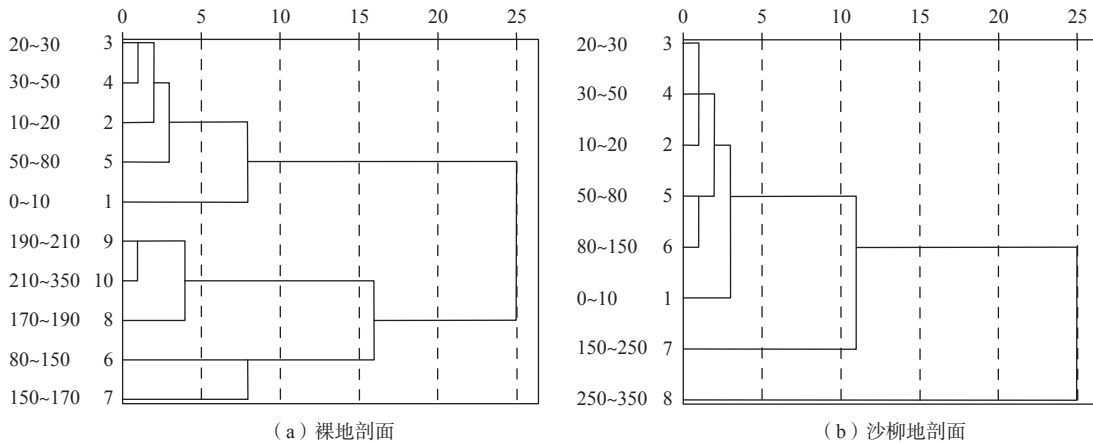


图 3 土壤含水率层次聚类分析的谱系图

Fig. 3 Pedigree diagram of soil moisture content by hierarchical clustering analysis

到 350 cm 处才达到饱和。

从含水率极值可以看出, 裸地中大部分土层的平均含水率在月尺度上变幅较小, 不超过 5.0%, 210 cm 及以下土层变幅为 0; 在沙柳地中, 绝大部分土层的含水率变幅显著大于裸地, 大部分中层土壤含水率在月尺度上的变化范围超过 15%。2 种情况下土壤剖面中的含水率变幅均表现为中层处变幅最大, 而浅层与深层的变幅比中层小, 这与剖面各层变异系数的变化一致。如表 2 所示, 裸地与沙柳地剖面平均含水率的变异系数分别为 4.24%、15.61%, 分别处于弱变异与中等

表 2 裸地和沙柳地不同土层土壤含水率和变异系数

Table 2 Soil moisture content and coefficient of variation in different soil layers in the bare land and Salix land

| 土地类型 | 土层/cm | 平均值/% | 标准差SD/% | 变异系数CV/% |
|------|---------|-------|---------|----------|
| 裸地 | 0~80 | 11.65 | 1.05 | 9.01 |
| | 80~170 | 19.97 | 3.77 | 18.88 |
| | 170~350 | 30.71 | 0.21 | 0.68 |
| | 0~350 | 23.59 | 1.00 | 4.24 |
| 沙柳地 | 0~150 | 10.55 | 1.21 | 11.47 |
| | 150~250 | 18.43 | 6.36 | 34.51 |
| | 250~350 | 27.82 | 3.28 | 11.79 |
| | 0~350 | 17.74 | 2.77 | 15.61 |

度增加增长较慢(图 2); 中层土壤含水率从 14.11% 快速增长至 27.05%; 深层土壤含水率均较高, 其中 210 cm 以下土层在整个监测期内均位于地下水水位之下, 含水率达到饱和(31.00%)。沙柳地情况下土壤 0~350 cm 剖面平均含水率为 17.74%, 浅层、中层及深层平均含水率分别为 10.55%、18.43%、27.82%(表 2)。浅层土壤含水率增长相较于裸地更缓慢; 150 cm 之下的中层土壤含水率大幅度增加, 在 250 cm 处已达到 22.01%; 深层土壤含水率在地下水的支撑下处于较高水平, 直

变异。裸地情况下浅层、中层及深层含水率变异系数分别为弱变异(9.01%)、中等变异(18.88%)、弱变异(0.68%), 且变异程度中层>浅层>深层; 沙柳地情况下各层含水率均处于中等变异, 变异系数分别为 11.47%、34.51%、11.79%, 变异程度中层>深层>浅层。

3.2 土壤水分时间变化特征

裸地土壤水分随时间的变化主要受到大气条件的影响。如图 4 所示, 浅层含水率受大气影响波动明显, 降雨会导致浅层含水率迅速升高, 蒸发使其逐渐降低, 因此本文定义该层为气候影响层。观测期间, 层内含水率在 11% 左右波动, 并在 8 月中旬强降雨后达到峰值 16%; 中层土壤含水率受大气影响较小, 本文定义该层为过渡层, 层内含水率大部分时间较为稳定, 但在 8 月中旬受大量降雨影响含水率从 16.8% 迅速抬升至 24.1%; 深层土壤含水率受地下水的影响, 长期处于饱和或近饱和状态, 因此定义深层为地下水影响层, 该层含水率在观测期间几乎不发生变化, 仅在 8 月中旬从 30.5% 上升至饱和含水率 31.0%。裸地剖面地下水水位总体呈上升趋势, 从 204 cm 上升至 174 cm, 其变化与中层含水率变化相似, 在 5—7 月、9—11 月

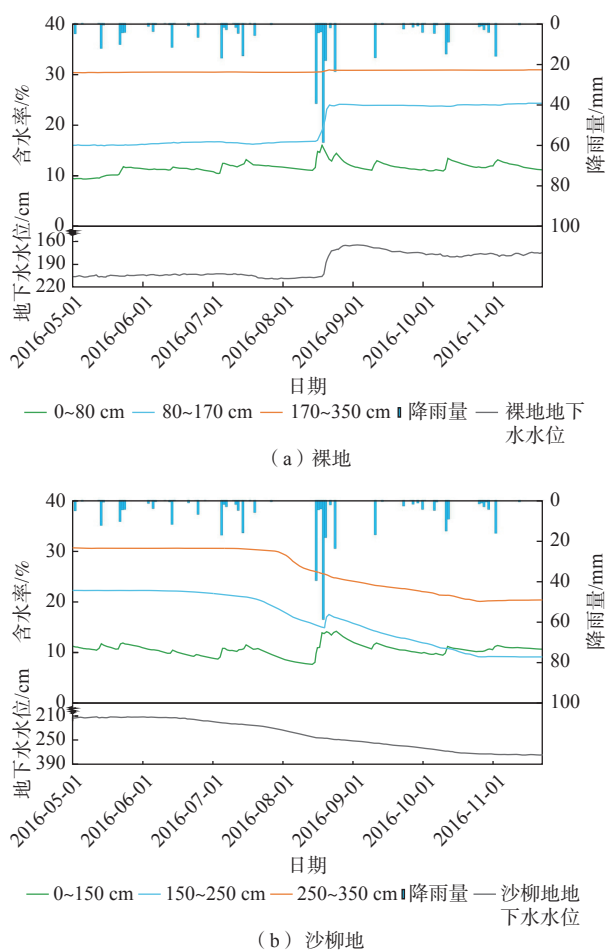


图 4 土壤浅层、中层及深层含水率与地下水水位随时间变化
 Fig. 4 Changes in water content of the shallow, middle and deep soil layers and groundwater levels with time

水位波动不大, 仅在 8 月中旬出现较大抬升。

以裸地为参照, 可将沙柳地土壤剖面的浅层、中层与深层同样命名为气候影响层、过渡层与地下水影响层, 但由于沙柳地土壤水分还受到植物耗水的重要影响, 因此各层土壤的含水率大小及分布模式均发生了较大变异。沙柳地气候影响层土壤含水率变化与裸地类似, 在大气条件影响下于 10% 上下波动。而过渡层和地下水影响层的含水率变化与裸地相反, 5—11 月总体呈下降趋势。其中, 5—6 月过渡层与地下水影响层含水率基本保持稳定。7 月开始进入夏季, 随着气温的上升, 沙柳发育成熟, 并且 7 月 18 日—8 月 11 日为近 1 个月的干旱期, 导致土壤含水率快速降低。受到 8 月 12—20 日的大量降雨影响, 过渡层含水率出现短暂上升, 但在降雨结束后含水率迅速回落。10 月下旬, 过渡层含水率已降至 9.2%, 地下水影响层含水率降至 20.3%。11 月后沙柳进入休眠状态, 在此期间, 降雨量和需水量几乎为 0, 各层含水率基本

不变。沙柳地中的地下水水位在观测期内共下降了 124 cm。7 月之前波动较小; 7 月初至 8 月中, 地下水水位下降较快; 8 月中旬强降雨后, 地下水水位下降速率明显减缓; 11 月之后, 水位基本稳定于 349 cm。

3.3 植被影响下的土壤水分分布

由图 2 与图 4 可知, 裸地与植被覆盖情况下土壤剖面含水率差异明显, 由于本试验中 2 种情况下的土壤性质相同, 初始地下水水位相近, 且受到同样的大气条件影响, 因此, 可近似地认为 2 种情况下剖面含水率的差异是由植被引起的。即裸地与沙柳地在各土层上的土壤水分差量 $\Delta\theta$ 可体现出植被对各土层土壤水分的影响情况。5—11 月各层土壤总平均 $\Delta\theta$ 随深度的分布如图 5 (散点) 所示, 其分布近似呈高斯分布, 对散点进行曲线拟合, 拟合函数为:

$$\Delta\theta = f(x, \mu, \sigma, A) = A \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad (2)$$

其中, x 为深度; $f(x)$ 为土壤水分差量 $\Delta\theta$ 。参数 μ 决定了曲线的位置, μ 越大, $\Delta\theta$ 峰值出现的深度越深。参数 σ 决定了曲线的形态, σ 越大, 曲线越扁平, σ 越小, 曲线越尖陡。相应地, 在 $\Delta\theta$ -埋深分布曲线中, σ 越大, 植被对剖面水分的主要影响区域越分散, σ 越小, 植被对剖面水分的主要影响区域越集中; A 决定了曲线的变化幅度, 其值等于 $f(x)$ 的最大值, 此处即为 $\Delta\theta$ 的最大值。

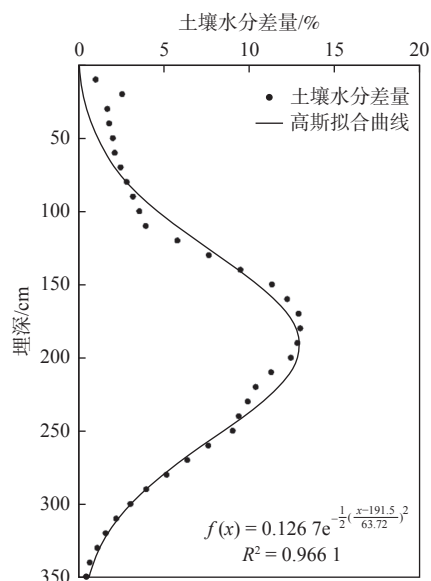


图 5 裸地与沙柳地土壤水分差量随深度变化
 Fig. 5 Variation of difference in soil moisture between the bare land and Salix land with depth

拟合结果见图 5, A 、 μ 、 σ 参数值分别为 0.126 7, 191.5, 63.72, 可以看出, $\Delta\theta$ 分布与高斯曲线总体拟合

程度良好, R^2 达到 0.966 1。沙柳对土壤水分的影响程度随深度的增加呈现出先增大后减小的变化规律, 在过渡层的 191.5 cm 处达到峰值, 该深度处沙柳地土层平均含水率比裸地低了 12.67%。含水率在 0~100 cm、280~350 cm 深度土层处受到沙柳耗水的影响较小, $\Delta\theta$ 小于 5%, 分别位于气候影响层与地下水影响层内; 在 150~240 cm 土层处受到的影响最大, $\Delta\theta$ 超过了 10%, 均位于过渡层内。气候影响层(0~150 cm)、过渡层(150~250 cm)及地下水影响层(250~350 cm)土壤水分差量分别占剖面总差量的 25.81%、56.77%、17.42%。由此可见, 沙柳生长对气候影响层与地下水影响层土壤水分的影响相对较小, 对过渡层土壤水分的影响最大。

4 讨论

4.1 土壤水分垂直分布模式

土壤剖面不同土层的土壤水分表现出不同的水文过程和生态功能^[24], 在裸地及植被存在情况下呈现出不同的分布模式及变化特征。气候影响层是蒸发和降雨等大气因子影响强烈的区域^[12], 层内土壤水分受到旱区干燥少雨气候的影响而损失严重, 长期处于较低水平。沙柳地情况下, 沙柳根系长期吸收该层内的土壤水并拦截降雨入渗水分, 由此加剧了层内土壤水分的损失, 使得 0~150 cm 剖面含水率均处于较低水平(图 2)。

随着深度的增加, 大气条件的影响逐渐减弱, 植物根系与地下水的影响逐渐增强, 过渡层土壤是浅层与深层土壤水分交替供应的区域^[25], 该层的特点是土壤平均含水率变幅最大(图 2), 变异性最高(表 2), 裸地与沙柳地土壤水分的差异性在该层也最为明显(图 5), 是沙柳对土壤水分含量影响最大的区域。地下水影响层是土壤贮水层, 起到“土壤水库”的作用^[26], 该层土壤均位于地下水或其毛细上升带内, 层内水分含量较高, 且基本不会受到大气条件的直接影响, 但当上层土壤水短缺时, 地下水会通过毛细作用向上运移补给, 而当雨季上层土壤水饱和时, 多余的水分通过重力作用入渗至该层^[25]。裸地情况下, 地下水影响层的含水率长期保持稳定状态, 而沙柳地情况下该层内的饱和含水层在沙柳深根吸水作用下逐渐向非饱和含水层转化, 含水率逐渐降低, 即便如此, 该层内的含水率也显著大于其余土层。

4.2 植被对土壤水分时空变化的影响

Dardanelli 等^[27]指出, 植物根系在土壤剖面不同深度上对水分的吸收是不均匀的。本次研究发现, 植被

对水分的利用改变了 0~350 cm 土壤剖面水分的分布状况, 显著地降低了土壤水分含量, 但在不同深度上对土壤水分的影响程度有所不同。在 5—11 月的完整生长期内, 沙柳对垂向剖面上各土层平均含水率的影响近似呈高斯分布(图 5), 过渡层中土壤水分受到的影响最大, 气候影响层次之, 地下水影响层受到的影响最小。

为进一步阐明植物处于不同生长阶段时裸地与沙柳地的土壤水分差异, 分别计算观测期内沙柳的发芽期(5—6月中旬)、生长期(6月中旬至7月下旬)、成熟期(8月)、枯萎期(9—10月)与休眠期(11月)间的土壤水分差量, 各阶段 $\Delta\theta$ 分布见图 6, 气候影响层、过渡层与地下水影响层的土壤水分差量占剖面总差量的比例见表 3。与 5—11 月总平均 $\Delta\theta$ 分布(图 5)类似, 各个时期的 $\Delta\theta$ 均随深度呈先增加后减小的单峰变化, 且峰值均出现在过渡层。可以看出, 植物不同的生长阶段对土壤水分变化的影响不尽相同, 表明植物对土壤水和地下水的吸收是适时调整的^[27]。发芽期和生长期沙柳对剖面土壤水分的影响较小, 且影响主要存在于气候影响层与过渡层, 这是由于发芽期和生长期时沙柳的需水量较少且根系发育较浅, 主要吸收包气带水分以满足自身需求; 此后的成熟期、枯萎期及休眠期, 剖面各层土壤水分受到的影响程度逐渐增大, 但相对于整体影响而言各层所受到的相对影响程度(即 $\Delta\theta$ 占比)变化趋势有所不同, 气候影响层 $\Delta\theta$ 占比逐渐减小, 地下水影响层 $\Delta\theta$ 占比逐渐增大, 而在沙柳生长的任一时期, 过渡层的 $\Delta\theta$ 占比均超过

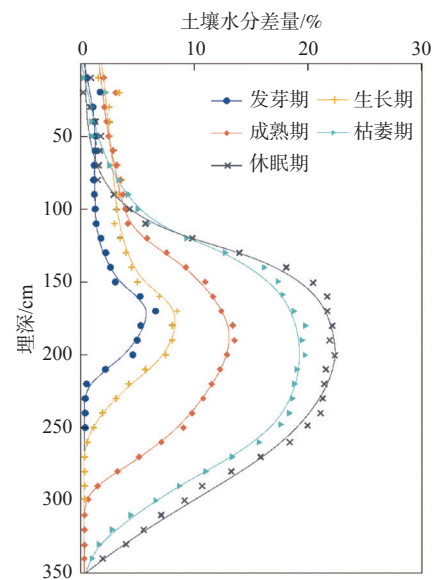


图 6 沙柳不同生长阶段裸地与沙柳地的土壤水分差量

Fig. 6 Variation of difference in soil moisture between the bare land and the Salix land in different growth stages of Salix

50%。也就是说,植被对土壤剖面水分的影响主要集中在过渡层,对气候影响层与地下水影响层的影响程度是随着沙柳的发育进程而逐渐转变的。以上结果意味着,沙柳在土壤剖面 150~250 cm 处发育有大量深根,到 250~350 cm 甚至更深处的土层中深根仍然存在,当浅层包气带水分不能满足沙柳的生长需求时,沙柳深根开始吸收深层土壤水和地下水以改善干旱环境中的水分胁迫^[28]。刘深思等^[29]对沙柳的研究结果也表明,沙柳主根伸展的深度达到了地表以下 500 cm,其生理功能的维持不仅依赖浅层土壤水,还依赖地下水。该发现可为研究干旱地区深根植物的适应机制及建立土壤-植物-大气连续体(SPAC)系统中植物根系吸水模型提供参考。

表 3 沙柳不同生长阶段各土层的土壤水分差量占比

Table 3 $\Delta\theta$ proportions of each soil layer at different growth stages of Salix /%

| 土层 | 发芽期 | 生长期 | 成熟期 | 枯萎期 | 休眠期 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0~150 cm | 36.71 | 42.53 | 30.28 | 22.37 | 19.93 |
| 150~250 cm | 56.23 | 53.40 | 58.29 | 56.00 | 55.55 |
| 250~350 cm | 7.06 | 4.07 | 11.43 | 21.63 | 24.52 |

4.3 旱区植被耗水效应

土壤水和地下水是干旱、半干旱地区许多植物生长和蒸腾的主要水源^[30],研究表明,在干旱区的大多数植物,特别是灌木,发育深根,吸收大量深层土壤水与地下水,导致旱区土壤水分状况不断恶化。本研究通过长期原位监测裸地与沙柳地土壤剖面含水率,发现沙柳生长同时消耗了大量土壤水与地下水,造成了土壤剖面水分严重缺失,地下水水位大幅度下降。Wang 等^[31]和 Cao 等^[32]发现植被恢复后,土壤的浅层和深层都变得极为干燥。因此,虽然植被恢复有效地缓解了旱区沙地的水土流失及土壤侵蚀等问题^[33],但在有限的土壤水分和更广泛的植被覆盖所产生的水分需求之间存在着不相容性^[34]。在毛乌素沙地目前的气象条件下,大规模种植沙柳等耗水性灌木不仅会减少甚至断绝外界水分对地下水的补给^[35],在地下水埋深较浅的丘间洼地还会直接导致地下水水位下降,加剧了干旱地区地下水资源的耗竭。故在植被恢复过程中,应在合适的土壤及地下水水位条件下种植沙柳等深根耗水性植物,并保持一定的间距,在减少植物对地下水消耗的同时尽可能使降雨入渗的水分更多地补充到深层土壤^[36],促进旱区生态系统恢复的良性发展。

5 结论

(1)裸地与植被地剖面的土壤水分具有不同的分

布模式,以裸地为参照,垂向上根据土壤含水率变化的主要影响因素将剖面分为 3 层:气候影响层、过渡层与地下水影响层。裸地情况下各层分别位于地表以下 0~80 cm、80~170 cm 及 170~350 cm 深度,植被地情况下分别位于 0~150 cm、150~250 cm 及 250~350 cm 深度。2 种情况下平均含水率均随土壤深度的增加而增大,变异性在过渡层达到最高,但各层含水率大小及变化趋势差异明显。

(2)2016 年观测期间,裸地土壤含水率及地下水水位总体呈上升趋势,在 8 月中旬降雨量大时上升明显,在其余降雨量小的月份比较稳定;观测期间剖面平均含水率为 23.59%,*CV* 值为 4.24%,处于弱变异。植被地土壤含水率及地下水水位呈下降趋势,在 5~7 月植物萌芽生长期耗水较少,8 月发育成熟后耗水量大,11 月后休眠期内保持稳定;剖面平均含水率为 17.74%,*CV* 值为 15.61%,处于中等变异。与裸地相比,植物根系吸收水分,使得 0~350 cm 剖面的土壤含水率降低,土壤水分的变异性增大。

(3)植被引起的土壤水分差量 $\Delta\theta$ 在垂向上的变化近似呈高斯分布,约在 190 cm 土层处达到峰值,气候影响层、过渡层及地下水影响层的水分差量分别占剖面总差量的 25.81%、56.77%、17.42%。随着植物生长,气候影响层含水率受到的相对影响逐渐减小,地下水影响层含水率受到的相对影响逐渐增大,在沙柳各个生长阶段,过渡层 $\Delta\theta$ 占比均达 50% 以上,表明植物对过渡层土壤水分的影响最大。

参考文献 (References):

- [1] BERNDTSSON R, NODOMI K, YASUDA H, et al. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 185(1/2/3/4): 221 - 240.
- [2] BUTTAFUOCO G, CASTRIGNANÒ A, BUSONI E, et al. Studying the spatial structure evolution of soil water content using multivariate geostatistics[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1/2/3/4): 202 - 218.
- [3] HU W, SHAO M A, WANG Q J, et al. Time stability of soil water storage measured by neutron probe and the effects of calibration procedures in a small watershed[J]. *Catena*, 2009, 79(1): 72 - 82.
- [4] 王文科, 宫程程, 张在勇, 等. 旱区地下水文与生态效应研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(7): 702 - 718. [WANG Wenke, GONG Chengcheng, ZHANG Zaiyong, et al. Research status and prospect of the subsurface hydrology and ecological effect in arid regions[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(7):

- 702 – 718. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 刘凯, 高磊, 彭新华, 等. 半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 765 – 772. [LIU Kai, GAO Lei, PENG Xinhua, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture in horqinsandy land[J]. Soils, 2015, 47(4): 765 – 772. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 杨丽萍, 苏志强, 侯成磊, 等. 基于随机森林的干旱区全极化SAR土壤含水量反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(4): 1255 – 1264. [YANG Liping, SU Zhiqiang, HOU Chenglei, et al. Soil moisture content retrieval in arid area based on Random Forest using Polarimetric SAR data[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1255 – 1264. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 洪光宇, 王晓江, 王少昆, 等. 沙地土壤水分时空动态研究进展[J]. 水土保持研究, 2021, 28(3): 390 – 398. [HONG Guangyu, WANG Xiaojiang, WANG Shaokun, et al. Research progress on spatiotemporal dynamics of soil moisture in sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(3): 390 – 398. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张进虎, 贺康宁, 段玉玺, 等. 毛乌素沙地西南缘不同植被下的土壤水分时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 96 – 99. [ZHANG Jinhu, HE Kangning, DUAN Yuxi, et al. Study on the spacial and temporal change of soil water content under different plant coverage on the southwestern edge of maowususandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 96 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 伍永秋, 张健枫, 杜世松, 等. 毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1612 – 1619. [WU Yongqiu, ZHANG Jianfeng, DU Shisong, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in dunes with different vegetation coverage in southern margin of the mu us sandy land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6): 1612 – 1619. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 贺帅, 张成福, 洪光宇, 等. 毛乌素沙地土壤水分研究进展[J]. 北方园艺, 2020(10): 138 – 144. [HE Shuai, ZHANG Chengfu, HONG Guangyu, et al. Research progress of soil moisture in Mu Us Sandy Land[J]. Northern Horticulture, 2020(10): 138 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 413 – 420. [CHEN Hongsong, SHAO Ming'an. Review on hillslope soil water movement and transformation mechanism on the loess plateau[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(4): 413 – 420. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 殷地迟, 王立, 蔡国军, 等. 半干旱黄土丘陵区不同植被类型的土壤水分特征及其稳定性[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 65 – 71. [YIN Dichi, WANG Li, CAI Guojun, et al. Soil moisture characteristics and stability of different vegetation types in semi-arid loess hilly region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 65 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王海燕, 刘廷玺, 王力, 等. 科尔沁沙地坨甸交错区土壤水分的空间变异规律[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 438 – 443. [WANG Haiyan, LIU Tingxi, WANG Li, et al. Spatial variation of soil moisture content in the dune-meadow ecotone in the horqin sandy land[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 438 – 443. (in Chinese with English abstract)]
- [14] YU X N, HUANG Y M, LI E G, et al. Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, northwest China[J]. Catena, 2018, 161: 96 – 103.
- [15] 易小波, 贾小旭, 邵明安, 等. 黄土高原区域尺度土壤干燥化的空间和季节分布特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(3): 373 – 381. [YI Xiaobo, JIA Xiaoxu, SHAO Ming'an, et al. Regional spatial and seasonal characteristics of soil desiccation on the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(3): 373 – 381. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 周宏飞, 肖祖炎, 姚海娇, 等. 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘土壤水分时空变异特征[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 771 – 777. [ZHOU Hongfei, XIAO Zuyan, YAO Haijiao, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in dendritic sand dune over Gurbantunggut Desert in central Eurasia[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 771 – 777. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 王宇祥, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁不同类型沙丘土壤水分时空变化特征及其环境影响因子[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 125 – 134. [WANG Yuxiang, LIU Tingxi, DUAN Limin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture and environmental impact factors in different types of dunes in horqin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 125 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 符超峰, 赵景波. 毛乌素沙地东南缘不同类型沙丘土壤水分分布特征[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 377 – 383. [FU Chaofeng, ZHAO Jingbo. Distribution of soil moisture content in different types of sand dunes in the southeastern marginal zone of the Mu Us Sandy Land[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 377 – 383. (in Chinese with English abstract)]

- [19] 王翔宇, 张进虎, 丁国栋, 等. 沙地土壤水分特征及水分时空动态分析[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 222 - 227. [WNAG Xiangyu, ZHANG Jinhu, DING Guodong, et al. Study on the temporal and spacial change of soil water content and soil moisture characteristics of sandy land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 222 - 227. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 石莎, 冯金朝, 邹学勇. 不同地形条件对沙漠植物生长和沙地土壤水分的影响[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(6): 846 - 851. [SHI Sha, FENG Jinchao, ZOU Xueyong. Effects of the fixed dune topography on soil water and plant growth[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(6): 846 - 851. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张友焱, 周泽福, 程金花, 等. 毛乌素沙地不同沙丘部位几种灌木地土壤水分动态[J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(6): 73 - 78. [ZHANG Youyan, ZHOU Zefu, CHENG Jinhua, et al. Soil moisture characteristics of several types of shrubs in different anchored dune positions in Maowusu sandy land[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(6): 73 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 993 - 1000. [PAN Yanxia, WANG Xinping, SU Yangui, et al. Temporal and spatial variability of surface soil moisture in a re-vegetation desert area in Shapotou[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 993 - 1000. (in Chinese with English abstract)]
- [23] HU W, SHAO M, REICHARDT K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 762 - 773.
- [24] 侯琼, 苗百岭, 王英舜, 等. 水分胁迫对半干旱典型草原土壤水分变化特征的影响[J]. *干旱气象*, 2020, 38(6): 987 - 993. [HOU Qiong, MIAO Bailing, WANG Yingshun, et al. Effects of water stress on soil moisture in semiarid typical steppe[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(6): 987 - 993. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 余优森. 人工草地土壤水分垂直变化规律的实验研究[J]. *水科学进展*, 1991, 2(4): 271 - 276. [YU Yousen. An experimental study on vertical variation of soil moisture in the artificial sward[J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(4): 271 - 276. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 蔺鹏飞, 朱喜, 何志斌, 等. 土壤水分时间稳定性研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3403 - 3413. [LIN Pengfei, ZHU Xi, HE Zhibin, et al. Research progress on soil moisture temporal stability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(10): 3403 - 3413. (in Chinese with English abstract)]
- [27] DARDANELLI J L, RITCHIE J T, CALMON M, et al. An empirical model for root water uptake[J]. *Field Crops Research*, 2004, 87(1): 59 - 71.
- [28] NEPSTAD D C, CARVALHO C D, DAVIDSON E A, et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures[J]. *Nature*, 1994, 372(6507): 666 - 669.
- [29] 刘深思, 徐贵青, 李彦, 等. 5种沙地灌木对地下水埋深变化的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 615 - 625. [LIU Shensi, XU Guiqing, LI Yan, et al. Difference and consistency of responses of five sandy shrubs to changes in groundwater level in the Hailiutu River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 615 - 625. (in Chinese with English abstract)]
- [30] GRIBOVSKIZKI Z, SZILÁGYI J, KALICZ P. Diurnal fluctuations in shallow groundwater levels and streamflow rates and their interpretation: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 385(1/2/3/4): 371 - 383.
- [31] WANG Y Q, SHAO M A, SHAO H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 9 - 17.
- [32] CAO S X, CHEN L, SHANKMAN D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration[J]. *Earth Science Reviews*, 2011, 104(4): 240 - 245.
- [33] FU B J, ZHAO W W, CHEN L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. *Land Degradation & Development*, 2005, 16(1): 73 - 85.
- [34] WEI F, HUANG M, GALLICHAND J, et al. Optimization of plant coverage in relation to water balance in the Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2012, 173/174: 134 - 144.
- [35] ZHANG Z Y, WANG W K, GONG C C, et al. Salix psammophila afforestations can cause a decline of the water table, prevent groundwater recharge and reduce effective infiltration[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 780(9): 146336.
- [36] ZHAO M, WANG W K, WANG Z F, et al. Water use of Salix in the variably unsaturated zone of a semiarid desert region based on insitu observation[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591(3): 125579.