

晋西北不同植被类型土壤水分亏缺特征*

王玲, 刘庚, 冯向星, 牛俊杰

(太原师范学院历史地理与环境变迁研究所, 山西 晋中 030619)

摘要: 为了解人工水土保持林地土壤水分变化特征及亏缺现状, 对区域植被恢复提供理论依据。对晋西北岚县典型人工林和对照样地撂荒地进行土壤水分测定, 通过构建土壤水分亏缺定量评价模型, 对柠条林 (*Caragena korshinskii*)、油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 和撂荒地雨季和非雨季的土壤储水量和土壤水分亏缺指数进行计算。结果表明: ① 随土层深度增加, 3 种植被的土壤剖面含水量均呈先降低后升高趋势, 柠条、油松林土壤剖面含水量分别在 300 和 400 cm 深度后呈降低趋势, 撂荒地土壤剖面含水量变化呈增长型, 土壤含水量最高; ② 3 种植被类型的土壤储水量和土壤有效储水量变化趋势相同, 均表现为: 撂荒地 > 柠条 > 油松, 土壤水分相对亏缺量表现为: 油松 > 柠条 > 撂荒地; ③ 柠条、油松林地存在明显亏缺现象, 样地土壤水分平均相对亏缺指数分别为 0.24、0.69, 撂荒地为 -0.19。油松林地的土壤水分亏缺程度高于柠条林和撂荒地。

关键词: 土壤水分亏缺; 人工林地; 植被类型; 晋西北

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 01-0102-08

The characteristics of water deficit in various vegetation soils in northwestern Shanxi Province

WANG Ling, LIU Geng, FENG Xiangxing, NIU Junjie

(Institute of Historical Geography and Environmental Change, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China)

Abstract: We aimed to clarify the variation characteristics of soil water and the soil water deficit of artificial forestland in order to provide theoretical support for the selection of vegetation types and ecological restoration pattern. It was necessary to measure soil water in Northwestern Shanxi Loess hilly regions in Lan county. The moisture storage capacity and soil water deficit index of *Caragena korshinskii*, *Pinus tabulaeformis* and abandoned land in soil profiles of 0 ~ 600 cm depth were calculated to quantify soil water deficit during the rainy season and non-rainy season. The results showed that : ① The soil water changed with vegetation types, and even for the same vegetation type, the soil water was not consistent with other soil layers. The soil water content of 3 vegetation types showed first decreasing and then increasing trend with soil depth on the whole. Soil water profile contents of *Caragena korshinskii* and *Pinus tabulaeformis* showed a decreasing trend in the depth of 300 cm and 400 cm, respectively. In addition, the soil water content of abandoned land was higher than that of other artificial forestlands, and presented increasing type. ② The effective moisture storage capacity range showed the same trend for 3 vegetation types, with

* 收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171423)

作者简介: 王玲 (1992 年生), 女; 研究方向: 生态恢复; E-mail: ydlw0626@163.com

通信作者: 牛俊杰 (1968 年生), 男; 研究方向: 自然地理; E-mail: junjieniu@foxmail.com

abandoned land > *Cartagena korshinskii* > *Pinus tabuliformis*, and the deficit soil water storage presented *Pinus tabuliformis* > *Cartagena korshinskii* > abandoned land. ③ There was a significant deficit phenomenon of *Cartagena korshinskii* and *Pinus tabuliformis*. The plot compared soil water deficit index of *Cartagena korshinskii* land and *Pinus tabuliformis* land was 0.24, 0.69, respectively. Nevertheless, the plot compared soil water deficit index of abandoned land was only -0.19. Therefore, the water deficiency of *Pinus tabuliformis* land was worse than that of other soil types as a whole.

Key words: soil water deficit; artificial forestland; vegetation types; northwest Shanxi Province

晋西北地处半干旱黄土丘陵区, 该区水资源短缺、气候干燥、降水稀少, 土壤水分不足已成为当地植被恢复与重建的关键影响因子^[1-2]。自 1998 年起, 国家在晋西北实施了大面积的退耕还林还草工程, 取得了显著成效^[3-4]。然而, 该区域“低降水、高蒸发”的气候条件及植被恢复过程中配置不合理等原因, 造成土壤含水量较低, 甚至发育干层^[5-6], 导致不同深度土层土壤水分出现亏缺现象^[7-9]。目前国内外对不同土地利用方式、不同植被类型的土壤水分亏缺评价进行了相应研究^[10-12], 也有学者对土壤水分亏缺评价的评价模型、评价指标等进行探究, 提出土壤干化指数^[13]、土壤水分相对亏缺指数和样地土壤水分相对亏缺指数^[14-15]、土壤含水量与生长阻滞含水量的差值^[16]、以及基于水分消耗的土壤干化指标^[17]等土壤水分亏缺评价指标, 在土壤水分亏缺的半定量化及定量化评价方面取得了较大进步。晋西北生态环境脆弱, 对该区域开展不同植被类型土壤水分干层和土壤水分亏缺评价研究, 具有重要意义^[18]。

研究人工植被土壤水分时、空分布特征, 对认识土壤水分亏缺状况、防止新的生态退化、成功实施生态环境建设和农林业发展具有重要现实意义。目前对晋西北不同植被类型、土壤水分垂直剖面分布规律和空间分布规律等方面已有相关研究^[19], 但对晋西北不同植被类型 0~600 cm 典型人工林地土壤水分亏缺程度的评价及不同季节储水量特征的研究还比较鲜见。因此, 本研究选择晋西北典型人工林地柠条林、油松林为研究对象, 以撂荒地作为对照, 分析不同植被土壤储水量剖面特征, 定量评价不同植被类型 5、7、9、11 月 0~600 cm 土壤剖面水分亏缺现状, 以期为同类地区生态建设和科学管理提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于晋西北的岚县岚城镇东河村, 海拔高度约为 1 287 m。岚县是汾河上游环境生态重

点治理县, 也是国家生态环境建设重点县。该区属温带大陆性气候, 无霜期 130 d, 年平均气温 6.8 ℃, 极端最高气温 36.4 ℃, 最低为 -30.5 ℃, 年有效积温 2 948 ℃, 年均降雨量为 400 mm, 分配极不均匀, 主要集中在 7-9 月, 占全年降水总量的 70% 左右。受气候影响, 该区代表性的植物有芦苇 (*Phragmites australis*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、锦鸡儿 (*Cartagena sinica*) 等, 典型的人工植被有柠条 (*Cartagena korshinskii*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、油松 (*Pinus tabuliformis*) 等。该县属于典型的半干旱黄土丘陵区, 降水稀少、气候干旱等自然因素导致了诸多生态环境问题。

1.2 样点采集与分析

选取当地具有代表性的柠条、油松林地, 以撂荒地作为对照样地, 样地均设在低缓坡地上。柠条林龄为 13 a, 平均树高 1.5 m, 冠幅约为 2 m, 柠条林地表层为杂草; 油松林龄为 15 a, 平均树高 10 m, 平均冠幅 3.5 m, 油松林地表层有 10~15 cm 的枯落物层。该县 12 月初至次年 4 月上旬土壤处于冻土状态, 因此选择该区 2014 年 5、7、9 和 11 月的 22-26 日在野外采集土壤样品, 之所以选择这几个测定日是因为 7、9 和 5、11 月可以分别反映该区雨季和非雨季的土壤水分状况。土壤样品采用轻型人力钻采取, 每种植被样地选 3 个样点进行重复采样, 样品采集深度为 0~600 cm, 土壤样品间距为 10 cm, 共计 2 160 个样品。采用烘干法测定土壤含水量, 烘干时间为 24 h 以上。储水量通过公式计算, 田间持水量和土壤容重采用环刀法测定。表 1 为分层测定不同植被 0~60 cm 的土壤容重, 60 cm 以下同一植被类型的土壤质地基本一致, 下层土壤取各植被 0~60 cm 土壤容重的平均值。降水数据来自研究区的气象站。

1.3 数据分析方法

1.3.1 土壤储水量指土壤中含水的绝对数量 即在一定厚度、一定面积土壤中所含水量相当于相同面积水层的厚度, 一般可用水深表示。其计算公式为:

表 1 不同植被类型土壤容重 (平均值 \pm 标准误)
Table 1 Volume weight of soil of different vegetation types

土层/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)				Cv/%
	油松	柠条	撂荒地	平均	
0~10	1.327 \pm 0.063	1.324 \pm 0.021	1.466 \pm 0.046	1.327 \pm 0.043	0.048
10~20	1.396 \pm 0.045	1.412 \pm 0.065	1.485 \pm 0.061	1.431 \pm 0.057	0.027
20~40	1.406 \pm 0.052	1.434 \pm 0.055	1.584 \pm 0.062	1.475 \pm 0.056	0.053
40~60	1.480 \pm 0.059	1.503 \pm 0.062	1.668 \pm 0.052	1.550 \pm 0.058	0.054
0~60	1.402 \pm 0.055	1.418 \pm 0.051	1.551 \pm 0.055	1.457 \pm 0.054	0.046
Cv/%	0.045	0.052	0.060	0.064	-

$$W_i = M_i \times D_i \times h \times 10 \div 100 \quad (1)$$

式中, W_i 为土壤储水量 (mm); M_i 为土壤含水量 (%); D_i 为土壤容重 (g/cm³); h 为土层深度 (cm); i 为土层序列。

1.3.2 单个样地不同土层土壤水分相对亏缺程度

通过土壤水分相对亏缺指数进行定量评价, 其计算公式为^[15]:

$$CD_i = \frac{C_i - M_i}{C_i - W_m} \quad (2)$$

式中, CD_i 为不同林地第 i 土层土壤水分相对亏缺值; i 为采样土层系列; C_i 为对照样地即多年撂荒地第 i 层土壤含水量 (%); W_m 为萎蔫系数 (%).

1.3.3 不同样地间土壤水分相对亏缺程度 通过样地土壤水分相对亏缺指数进行定量评价, 其计算公式为^[15]:

$$PD = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{W_{c_i} - W_i}{W_{c_i} - W_{wm}}}{k} \quad (3)$$

式中, PD 为样地土壤水分相对亏缺指数; W_{c_i} 为对照样地即多年撂荒地第 i 层土壤储水量 (mm); W_i 为样地第 i 层土壤储水量 (mm); W_{wm} 为萎蔫系数对应的土壤储水量 (mm); k 为样地土层的分层数。

1.3.4 土壤有效储水量 是指植物可利用的土壤水的上限与下限的差值。计算公式为^[15]:

$$EW_i = \begin{cases} W_i - W_{wm} & (M_i < F_c) \\ W_{F_c} - W_{wm} & (M_i \geq F_c) \end{cases}$$

$$EW = \sum_{i=1}^k EW_i \quad (4)$$

式中, EW_i 为第 i 层土壤有效储水量 (mm); F_c 为田间持水量 (mm); EW 为土壤有效储水量 (mm)。

1.3.5 为量化分析不同植被恢复的土壤水分状况 采用土壤水分相对亏缺量来表示, 计算公式

为^[15]:

$$DW = \sum_{i=1}^k W_{c_i} - \sum_{i=1}^k W_i \quad (5)$$

式中, DW 为土壤水分相对亏缺量 (mm); W_{c_i} 为对照地第 i 层土壤储水量 (mm)。

采用 OriginPro8.0 制图, 利用 SPSS17.0 进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤剖面储水量特征

2 种人工林地与撂荒地不同季节土壤剖面储水量特征如图 1 所示。3 种植被在不同季节的土壤储水量随土层深度增加有较明显的趋势特征, 总体上表现出先降低后升高的规律, 但土壤储水量变化随植被类型、月份变化也有差异。除 5 月外, 不同植被类型 0~60 cm 深度范围内的土壤储水量随土层深度增加呈明显降低趋势, 这是土壤水分的补给与消耗综合作用的结果。上层土壤受天然降水的直接补给, 并从上向下渗透, 同时表层土壤受植物蒸腾与土壤蒸发影响, 水分消耗较快^[20]。100~600 cm 土层的土壤储水量变化随植被类型和月份不同而有一定差异性。柠条林地 100~300 cm 土层土壤储水量变化趋势因月份不同而有较大差异, 整体表现为在雨季有所增加, 在非雨季呈降低趋势或趋于稳定; 柠条 300~600 cm 土层深度的土壤储水量在雨季 7 月、9 月为升高趋势, 而 400~500 cm 土层在 5 月和 11 月为波动性下降趋势。5 月、11 月油松林地 0~60 cm 土层土壤储水量低于柠条, 7 和 9 月该层土壤储水量均较柠条林地高; 60~500 cm 土层深度的土壤储水量变化趋势与柠条接近, 500~600 cm 土层深度的土壤储水量整体呈降低趋势。撂荒地 0~80 cm 土层深度的土壤储水量为降低趋势, 80~600 cm 土层深度的土壤储水量为明显的升高趋势。

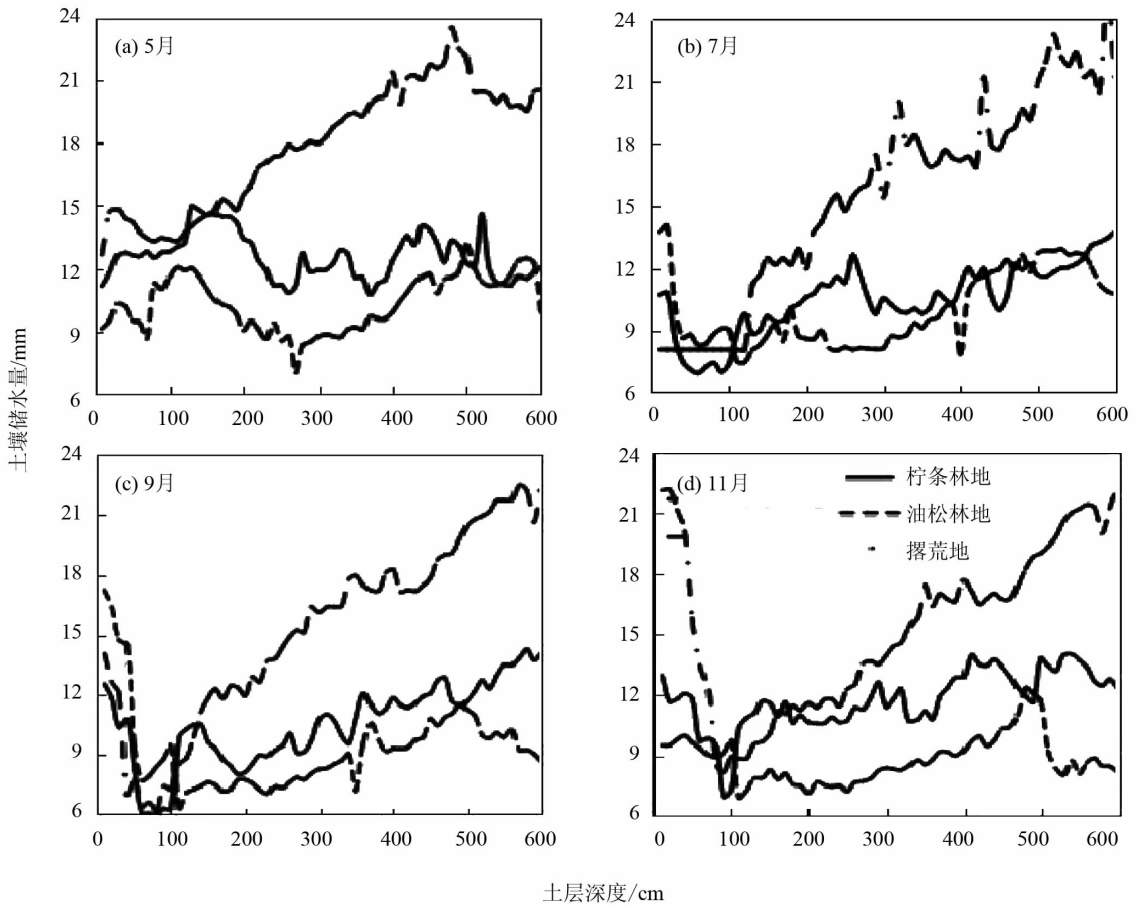


图 1 不同植被类型在不同季节的土壤储水量

Fig. 1 Soil water content of different vegetation types in different seasons

2.2 不同植被类型的土壤储水量亏缺

为方便比较不同植被在不同季节土壤储水与亏缺状况，在研究区土地类型、采样深度和采样时间均相同的条件下测定不同季节土壤储水量，采取多样本取平均值法进行分析，增加数据的可信度。结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出，在相同月份，不同植被类型的土壤储水量、土壤有效储水量差异均较大，而土壤储水量与有效储水量变化趋势基本一致，各月土壤储水量和土壤有效储水量均表现为：撂荒地 > 柠条 > 油松，撂荒地、柠条林、油松林的土壤有效储水量分别占土壤储水量的 35.58%、10.05%、4.15%。撂荒地作为对照样地，其土壤储水量与土壤有效储水量均较高，这可能与撂荒地植被覆盖以草地为主，同期消耗土壤水分较少有关；土壤水分相对亏缺量表现为：油松 > 柠条 > 撂荒地，柠条、油松林地 7 月土壤水分相对亏缺量最大，分别为 393.07 mm、452.34 mm。撂荒地除 5 月土壤水分相对亏缺外（亏缺量为 19.57 mm），其它月份土壤水分均有蓄积，这可能是由于 5 月气温快速回

升，蒸发量较大，且降水稀少造成的；3 种植被类型不同月份的土壤储水量均表现为：5 月 > 11 月 > 7 月 > 9 月。

2.3 同一植被类型不同土层的土壤水分亏缺评价

图 2 为 2 种人工林地剖面土壤水分相对亏缺指数。CD_i 值越大，表明土壤水分亏缺越严重，若值小于 0，表示土壤水分没有亏缺。柠条、油松林地 0~600 cm 土层 CD_i 剖面分布特征较为相似，0~280 cm 土层范围内 CD_i 值随土层深度增加波动较大，280~600 cm 土层 CD_i 值波动范围较小，土壤水分接近凋萎湿度，平均 CD_i 高达 0.92。柠条林地 0~40 cm 土层受降雨影响亏缺程度较轻，40~280 cm 土层亏缺程度随深度增加而加剧，土壤水分出现严重亏缺的土层为 140~250 cm，其次为 260~360 cm；土壤水分出现严重亏缺的土层范围随月份变化而改变，不同月份的 CD_i 值波动范围为 -3.26~4.95，5 月 200~400 cm 土层土壤水分相对亏缺严重，7 月上移到 50~200 cm 土层，8 月又下移至 140~260 cm 土层，11 月继续下移至 160~290 cm 土层；与其他月份相比，11 月份土壤水分

亏缺最严重。油松林地 300 cm 以下土层均存在水分亏缺现象, 40 ~ 120 cm 土层土壤水分亏缺程度较柠条林地低; 5 月、11 月土壤水分亏缺程度相对较轻, CD_i 随土层深度增加而降低; 7 月、9 月土

壤水分亏缺随土层深度增加呈先增加后降低的趋势; 5 月 0 ~ 70 cm 土层土壤水分亏缺较严重, 7 月下移至 40 ~ 140 cm 土层, 9 月继续下移至 110 ~ 240 cm, 11 月上移至 0 ~ 150 cm。

表 2 不同植被类型土壤储水量与降雨量

Table 2 Soil water content of different vegetation types and rainfall

月份	柠条林地			油松林地			撂荒地			降雨量 mm
	W	EW	DW	W	EW	DW	W	EW	DW	
5	768.28	163.48	364.83	691.47	78.79	441.63	1133.10	463.18	19.57	52.7
7	681.55	76.75	393.07	622.27	9.59	452.34	1074.61	404.69	-58.77	105.1
9	662.39	57.59	308.78	616.74	4.06	354.43	971.1	301.25	-5.81	90.5
11	699.83	95.03	280.79	626.61	13.92	354.01	980.62	310.69	-11.82	6.9

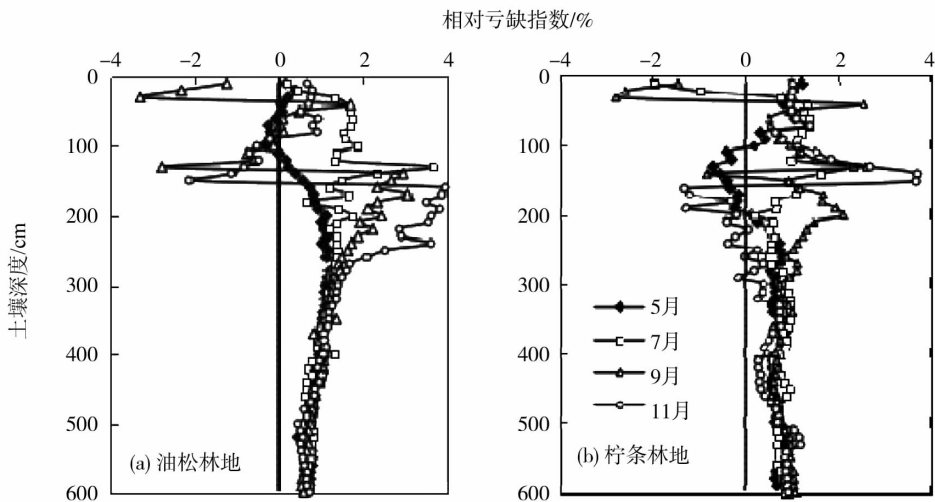


图 2 不同人工林土壤水分相对亏缺指数

Fig. 2 Compared soil water deficit index of different artificial forestland

2.4 不同植被类型的土壤水分相对亏缺特征

样地土壤水分相对亏缺指数适用于不同样地之间土壤水分亏缺程度的对比, PD 值越大, 表明样地土壤水分亏缺程度越高, 若 PD 值小于 0, 则表明土壤水分有所补充。由表 3 不同植被类型 PD 值可以看出, 柠条林地 0 ~ 600 cm 土层土壤水分整体呈亏缺状态, 水分相对亏缺程度介于油松和撂荒地之间, 0 ~ 100 cm 土层相对亏缺程度最低, 100 ~ 200 cm 土层相对亏缺较严重, 平均 PD 值达到 0.24, 柠条林地 11 月相对亏缺最严重。油松林地 PD 值随土层深度增加呈先减小后增大趋势, 500 ~ 600 cm 土层, 水分相对亏缺程度达到最大, 其原因可能是由于油松根系集中分布的土层耗水较多, 土水势较低, 500 ~ 600 cm 土层土壤水分在水势差

作用下向上运移, 且地下水埋藏较深, 该深度土层土壤水分难以得到补给造成的。5 ~ 11 月 0 ~ 600 cm 土层平均 PD 值为 0.69, 11 月油松土壤水分相对亏缺较轻, 是由于该时期植被已停止生长, 土壤水分消耗降低。撂荒地 7 月土壤水分相对充足, 从 7 月初到 9 月底, 该时期植被生长耗水增量, 蒸发强烈, 但天然降雨集中, 土壤水分蓄积效应较强。撂荒地 7 月、9 月 PD 值分别为 -0.62、-0.13, 0 ~ 100 cm 土层范围内 PD 值分别为 -0.78、-0.28, 土壤水分不亏缺; 5 月、11 月 PD 值接近零, 分别为 0.05、-0.04, 土壤水分存在较轻的亏缺; 撂荒地 11 月土壤水分亏缺主要集中在表层, 0 ~ 100 cm 土层范围内 PD 值最高, 为 0.11。

表 3 不同植被样地土壤水分相对亏缺指数¹⁾

Table 3 Plot compared soil water deficit index of different vegetation types

植被类型	柠条林地				油松林地				撂荒地			
	5 月	7 月	9 月	11 月	5 月	7 月	9 月	11 月	5 月	7 月	9 月	11 月
PD _a	0.03	0.13	-0.02	0.01	0.88	0.81	0.41	0.96	0.02	-0.78	-0.28	0.11
PD _b	0.07	0.13	0.20	0.57	0.07	1.00	1.01	-1.11	0.01	-0.38	-0.02	0.01
PD _c	0.11	0.12	0.14	0.17	0.70	0.72	1.06	0.46	0.02	-0.20	0.00	-0.24
PD _d	0.10	0.10	0.11	0.11	0.77	0.91	0.82	0.66	0.10	-0.19	-0.02	0.00
PD _e	0.08	0.07	0.09	0.08	0.69	0.78	0.74	0.57	-0.05	-0.09	0.01	0.01
PD _f	0.08	0.08	0.07	0.07	0.81	0.79	0.98	0.96	0.05	-0.13	-0.06	-0.02
PD	0.17	0.22	0.21	0.37	0.65	0.84	0.84	0.42	0.05	-0.62	-0.13	-0.04

1) PD_a - PD_f 分别代表 0 ~ 100, 100 ~ 200, 200 ~ 300, 300 ~ 400, 400 ~ 500, 500 ~ 600 cm 土层深度的 PD 值。

3 讨 论

1) 3 种植被 0 ~ 100 cm 土层深度的土壤储水量变化差异较大, 其主要原因是浅层土壤易受降雨入渗、植物强烈的蒸腾作用等影响^[21], 造成不同植被不同季节在该深度土层的土壤储水量变化范围较大。文中研究结果显示, 100 ~ 600 cm 深度范围内, 撂荒地土壤储水量明显高于柠条、油松林地; 500 ~ 600 cm 深度范围内, 柠条林储水量高于油松林, 且油松林在该层的土壤储水量变化均为降低趋势。从土壤储水量剖面变化特征来看, 撂荒地主要消耗 0 ~ 80 cm 深度的土壤水分, 深层土壤水分均有蓄积; 柠条林地耗水深度达 400 cm; 油松林耗水深度已超过 600 cm。3 种植被 5 月 0 ~ 300 cm 土层深度的土壤含水量略高于其他季节, 其原因可能与该区土壤在 4 月中旬解冻后, 积雪融水补给土壤水分有关。不同植被类型在不同季节的土壤剖面储水量随土层深度增加, 呈剧烈一缓和趋势, 表明深层土壤水分时间稳定性通常较浅层土壤水分更强。

2) 土壤储水量的大小可表征不同植被水文生态功能对调节干旱、减弱并防止土壤侵蚀作用的强弱^[22]。由表 2 可见, 雨季降雨量明显高于非雨季, 不同月份土壤储水量和有效储水量变化趋势一致, 与人工林生长季强烈耗水和雨季土壤水分补给具有较大相关性。柠条、油松林地储水量均变现为: 5 月 > 11 月 > 7 月 > 9 月, 撂荒地则为 5 月 > 7 月 > 11 月 > 9 月, 都是在土壤解冻后上升, 进入生长季后逐渐下降, 随着雨季的到来, 逐步升高或升高后再降低。由图 1 和表 2 可见, 油松林地和柠条林地消耗土壤水分远大于撂荒地, 而 0 ~ 60 cm 油松林地土壤储水能力较柠条林强, 这可能是因为油松林地表层土壤中夹杂未分解或半分解的枯枝落叶, 枯

落物层土壤疏松多孔, 导致土壤密度较低, 孔隙度较高^[23], 在自然降水后水分可充满孔隙并依靠表面张力维持在枯落物层中, 具有较强的持水能力^[24], 这与大多数研究一致。

3) 植被类型决定植被根系分布深度和密度, 对植被有效利用土壤水分的程度有较大影响。何福红等^[25]研究认为不同植被类型土壤含水量变化为: 农地 > 草地 > 果园 > 林地; 刘庚等^[26]通过分析撂荒地、柠条林、小叶杨林 3 种植被 4 - 7 月份 0 ~ 600 cm 深度剖面土壤水分的时空异质性特征, 发现撂荒地的土壤水分在不同月份的最小值明显都高于柠条、小叶杨林。由图 2 和表 3 可见, 撂荒地在雨季土壤储水量蓄积效应最强, 而非雨季表层土壤水分亏缺较深层土层严重。柠条林地主要消耗的土壤水分为 0 ~ 400 cm 土层, 200 ~ 400 cm 土壤亏缺程度较高。油松林地土壤水分相对亏缺指数和样地土壤水分相对亏缺指数均高于柠条林地和撂荒地。综合来看, 油松林耗水量和耗水深度均高于柠条林。

4 结 论

1) 3 种植被类型各月土壤剖面储水量变化趋势不同。从总体来看, 撂荒地土壤剖面储水量较人工林高, 且随土层深度增加呈增长型。0 ~ 60 cm 土层土壤储水量受降雨量变化影响较大, 雨季该层土壤储水量油松高于柠条; 柠条林地 100 ~ 500 cm 土层土壤储水量较油松林地高; 油松林地与柠条林地在 500 ~ 600 cm 土层土壤储水量变化趋势相反, 油松林为降低型, 柠条林为增长型, 说明不同植被类型人工林主要对深层土壤水分的垂直分布产生影响。

2) 撂荒地 0 ~ 600 cm 土层土壤水分相对亏缺量最小, 7 月、9 月、11 月土壤水分不亏缺; 油松

林地各月份土壤水分相对亏缺量较柠条林地高。2 种人工林植被土壤储水量均表现为非雨季高于雨季, 且雨季油松林表层的枯落物层储水能力较强。

3) 2 种人工林植被存在明显的土壤水分亏缺现象, 且不同植被类型的土壤水分亏缺深度不同, 严重亏缺土层随季节变化在一定范围的土层深度内移动, 柠条林地基本表现为: 雨季向浅层土壤移动, 非雨季向深层土壤移动, 而油松林地严重亏缺土层表现为连续向深层土壤移动的趋势, 土壤水分亏缺最严重。

参考文献:

- [1] 张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7056 - 7066.
ZHANG J J, LI H M, XU J J. Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7056 - 7066.
- [2] 上官周平. 黄土区水分环境演变与退化生态系统恢复[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 92 - 94.
SHANGGUAN Z P. Water-environment evolution and de-generated-ecosystem rehabilitation in Loess Regions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 92 - 94.
- [3] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14 - 22.
SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14 - 22.
- [4] 李小英, 段争虎. 黄土高原土壤水分与植被相互作用研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 43(6): 1508 - 1514.
LI X Y, DUAN Z H. Review on the interaction between soil moisture and vegetation on the Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 43(6): 1508 - 1514.
- [5] 赵景波, 祁子云, 魏君平, 等. 青海湖北土壤水分分布与土壤干层恢复[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7): 853 - 858.
ZHAO J B, QI Z Y, WEI J P, et al. Soil moisture distribution and moisture restoration in dried soil layer in northern Qinghai Lake [J]. Progress in Geography, 2012, 31(7): 853 - 858.
- [6] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应—以燕沟流域为例[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1543 - 1553.
WANG L, WEI S P, WU F Q. Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of Yangou Catchment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1543 - 1553.
- [7] 卞莹莹, 宋乃平, 王兴, 等. 荒漠草原区不同土地利用方式下土壤水分相对亏缺[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 201 - 207.
BIAN Y Y, SONG N P, WANG X, et al. Soil water deficit under different land-use type in desert steppe [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1): 201 - 207.
- [8] 刘庚, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 晋西北黄土丘陵区人工林地土壤水分亏缺评价[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 309 - 314.
LIU G, NIU J J, ZHU W X, et al. Assessment on soil water under different artificial forestland in Loess Hilly regions of Northwestern Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(5): 309 - 314.
- [9] LI Y, COHEN Y, WALLACH R, et al. On quantifying soil water deficit of a partially wetted root zone by the response of canopy or leaf conductance [J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(1): 21 - 38.
- [10] MICHELOT A, BREDA N, DAMESIN C, et al. Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest [J]. Forest Ecology & Management, 2012, 265(1): 161 - 171.
- [11] RALLO G, PROVENZANO G. Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea*, L.) to soil water deficit conditions [J]. Agricultural Water Management, 2012, 120(2): 79 - 88.
- [12] MENGISTU D K. The influence of soil water deficit imposed during various developmental phases on physiological processes of *tef* (*Eragrostis tef*) [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 132(3/4): 283 - 289.
- [13] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 75 - 89.
LI J, CHEN B, LI X F, et al. Effects of deep soil desiccations on alfalfa grassland in different rainfall areas of the Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 75 - 89.
- [14] 王进鑫, 黄宝龙, 罗伟祥. 黄土高原人工林地水分亏缺的补偿与恢复特征[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2395 - 2401.
WANG J X, HUANG B L, LUO W X. Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of the drought-prone Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2395 -

- 2401.
- [15] 杨磊, 卫伟, 莫保儒, 等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3060–3068.
- YANG L, WEI W, MO B R, et al. Soil water deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3060–3068.
- [16] 易亮, 李凯荣, 张冠华, 等. 黄土高原人工林地土壤水分亏缺研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 5–9.
- YI L, LI K R, ZHANG G H, et al. Soil moisture deficit in artificial forest land in Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5): 5–9.
- [17] 牛俊杰, 赵景波. 山西土壤水环境与植被建设[M]. 北京: 中国环境科学出版, 2006.
- NIU J J, ZHAO J B. Soil water environment and suitable setting of vegetation of Shanxi[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [18] 朱炜歆, 牛俊杰, 刘庚, 等. 植被类型对生长季黄土区土壤含水量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 152–156.
- ZHU W X, NIU J J, LIU G, et al. The influence of vegetation types on the soil moistures during growing season in Loess area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 152–156.
- [19] WEI H B, LI R, YANG Q K, et al. Research advances of vegetation effect on soil and water conservation in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 26(4): 489–496.
- [20] 奚同行, 左长清, 尹忠东, 等. 红壤坡地土壤水分亏缺特性分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 30–33.
- XI T H, ZUO C Q, YIN Z D, et al. Analysis on characteristic of soil water deficit on red soil slope land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(4): 30–33.
- [21] 郭烁, 夏北成, 倪国祥. 不同森林类型的土壤持水能力及其环境效应研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(增刊): 327–330.
- GUO L, XIA B C, NI G X. Analysis of water capacities held in different forest soils and environmental effect[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (Suppl), 2005, 44: 327–330.
- [22] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 30–34.
- ZHU J Z, LIU J J, ZHU Q K, et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 30–34.
- [23] 辛颖, 邹梦玲, 赵雨森. 大兴安岭不同恢复年限落叶松人工林土壤水分涵养特性研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 823–829.
- XIN Y, ZOU M L, ZHAO Y S. Soil water storage capacity and infiltration properties of *Larix Gmelinii* plantation in different growth age after burned in Greater Khingan Mountains[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 823–829.
- [24] 武春彦, 赵雨森, 辛颖, 等. 落叶松人工林结构对土壤水文特性的影响[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 58–62.
- WU C Y, ZHAO Y S, XIN Y, et al. Effects of structure of the *Larix gmelini* plantation on soil-hydrology characteristic[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 58–62.
- [25] 何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 6–9.
- HE F H, HUANG M B, DANG T H. Soil water distribution characteristics in Wangdonggou watershed in gully region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(4): 6–9.
- [26] 刘庚, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 黄土丘陵区不同植被土壤水分的分异性特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 83–88.
- LIU G, NIU J J, ZHU W X, et al. Heterogeneous characteristics of soil moisture of different vegetation types in Loess Hilly regions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 83–88.