

DOI: 10.5846/stxb201808021654

苟清平,朱清科,李依璇,申明爽,刘昱言,梅雪梅,王瑜.陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应.生态学报,2019,39(19): - .

Gou Q P, Zhu Q K, Li Y X, Shen M S, Liu Y Y, Mei X M, Wang Y. Soil desiccation effects under different vegetation types in the Loess Region of Northern Shaanxi. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): - .

陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应

苟清平¹, 朱清科^{1,2,*}, 李依璇¹, 申明爽¹, 刘昱言¹, 梅雪梅¹, 王瑜^{1,3}

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083

3 陕西省水务集团有限公司, 西安 710075

摘要:退耕还林还草工程虽然取得显著成效,但是加剧了区域土壤水分亏缺与土壤干燥化程度,同时制约着植被构建。选取陕西省吴起县金佛坪流域山杏、油松、刺槐、小叶杨和沙棘 5 种植被类型,对照荒草地。采用人工土钻法取样,分析不同植被类型 0—10 m 的土壤湿度特征和土壤干燥化效应。结果表明:各植被类型浅层和深层土壤水分均存在显著差异;与荒草地相比,各类林地均出现土壤水分过度消耗,其中刺槐林过耗量最大,山杏林最小;各林地均出现土壤干层,其中刺槐林、小叶杨林和山杏林土壤干层都已达到 10 m 以下,植被是深层土壤水分的主要影响因素。5 类林地的土壤干燥化指数平均值 39.26%,都远高于荒草地-9.57%。土壤干燥化强度为小叶杨(80.19%)>刺槐(78.03%)>沙棘(55.38%)>山杏(37.94%)>油松(32.34%),这是树种、林木大小和密度、林分生物量、树龄等生长指标综合作用的结果。在今后植被恢复中,应注意根据当地土壤水分条件,合理选择节水树种和合理设计林分结构,尽量避免或减轻土壤干化,维持较高的植被稳定性。

关键词:陕北黄土区;人工林地;土壤湿度;土壤干层

Soil desiccation effects under different vegetation types in the Loess Region of Northern Shaanxi

GOU Qingping¹, ZHU Qingke^{1,2,*}, LI Yixuan¹, SHEN Mingshuang¹, LIU Yuyan¹, MEI Xuemei¹, WANG Yu^{1,3}

1 School of soil and water conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Shaanxi Water Affair Group Co., Ltd, Xi'an, 710075, China

Abstract: Although projects undertaken to return farmlands to forests and grasslands has achieved remarkable results, it has aggravated the soil water deficit, soil desiccation intensity, and has also restricted the vegetation restoration. Five different vegetation types (*Armeniaca sibirica.*, *Pinus tabulaeformis.*, *Robinia pseudoacacia.*, *Populus simonii.*, *Hippophae rhamnoides.*) and a grassland were selected to analyze the soil moisture and soil desiccation in 0—10 m soil profile. The results showed that the moisture differed significantly in the shallow soil, as well as deep soil between the vegetation types. Compared with the grassland, soil moisture was excessively consumed in all vegetation types, the *Robinia pseudoacacia* forest consuming the most, and the *Armeniaca sibirica* forest consuming the least. Soil desiccation appeared in all vegetations types, and the desiccated soil layer of *Robinia pseudoacacia* forest, *Populus simonii* forest, and *Armeniaca sibirica* forest had reached below 10 m, implying that the vegetation is the primary factor influencing the deep soil moisture. The average soil desiccation index of the five vegetation types was 39.26%, which is much higher than that of the grassland (-9.57%). The order of soil desiccation intensity was as follows: *Populus simonii* (80.19%) > *Robinia pseudoacacia* (78.03%) >

基金项目:“十三·五”国家重点研发计划课题(2016YFC050170502);深圳市铁汉生态环境股份有限公司项目资助(THRD007)

收稿日期:2018-08-02; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuqingke@sohu.com

Hippophae rhamnoides (55.38%) > *Armeniaca sibirica* (37.94%) > *Pinus tabuliformis* (32.34%)。This result can be attributed to the comprehensive effect of tree species, tree size and density, stand biomass, tree age, etc. In the future, for restoration of vegetation, we should pay attention to the rational selection of water-saving tree species combined with a design for stand structure according to the local soil water conditions, so as to avoid or reduce soil desiccation and maintain high vegetation stability.

Key Words: Loess Region of Northern Shaanxi; artificial forestlands; soil moisture; soil desiccation

陕北黄土区气候干燥,降雨量少,蒸发量大,生态环境脆弱,水土流失严重,为了治理水土流失,改善生态环境,实施了“三北”防护林体系,退耕还林(草)等林业生态工程,虽然取得了显著效果,然而人工林林地水分条件的稳定性和植被恢复的可持续性是目前迫切需要解决的关键问题。近些年来研究表明:在黄土高原不同地区林地普遍出现深层土壤干燥化现象^[1],其直接后果就是形成土壤干层。土壤干层指降雨渗透以下(降雨入渗一般 2 m 左右),植被深层吸水不能被降雨入渗补给的土壤水分低湿层^[2]。土壤干燥化会导致植被退化,植被更新和再次造林困难加大,阻断地表水对地下水的补给,从而恶化当地的生态环境。60 年代中期在陕西蒲城首次发现土壤干层以来,土壤干燥化现象日益严重,已成为生态文明建设中棘手的问题,相关学者为了解决这一问题,就土壤干层的定义、成因、分类以及防治措施做了大量研究^[3-10],并取得一系列研究成果。这些研究主要是针对单一植被的土壤干燥化效应,例如柠条(*Caragana Korshinskii*)^[11]、苹果园(*Malus pumila*)^[12]、苜蓿(*Medicago Sativa*)^[13]等研究较多。然而,在同一地形条件下不同植被的土壤干燥化效应研究鲜见报道。

本研究以陕西省吴起县金佛坪流域作为研究区,选取山杏(*Armeniaca sibirica*)、油松(*Pinus tabuliformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)林地,以多年荒草地作为对照,分析各植被类型 0—10 m 的土壤水分分布特征,定量评价土壤干燥化强度,旨在为提高该地区的植被稳定性及生态系统的可持续健康发展提供理论指导。

1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市吴起县金佛坪流域,地处 107°38'57"—108°32'49"E,36°33'33"—37°24'27"N 之间。全县地貌类型为黄土丘陵沟壑区,属暖温带大陆性季风气候,海拔 1233—1809 m,年均气温 7.8℃,多年平均降水量为 478.3 mm,降水季节分配不均,年际变化大,雨季集中在 7—9 月,多年平均年陆面实际蒸发量为 400—450 mm。土壤为地带性黑垆土剥蚀后广泛发育在黄土母质上的黄绵土,占全区总面积的 97.6%,质地为轻壤,田间持水量为 20.9%,凋萎湿度 4.7%,1 m 以上土层的土壤容重平均为 1.3 g/cm³。金佛坪流域自 1998 年实施退耕还林以来,形成了山杏、油松、刺槐、小叶杨等主要乔木树种人工林,以及沙棘、柠条等主要树种的灌木林,以及针茅(*Stipa capillata*)、早熟禾(*Poa annua*)等草本植物。该县植被恢复效果较好,林草植被覆盖率达 49.6%,水土流失得到有效控制。

2 研究方法

2.1 样地选择

本研究选取山杏、小叶杨、油松、刺槐等乔木林和沙棘灌木林以及多年荒草地作为研究对象,为了突出比较植被类型,选取的地形(坡度和坡向)相似。乔木林地采用 20 m×20 m 的样地,灌木林地采用 5 m×5 m 的样地,荒草地采用 1 m×1 m 的样地调查植被生长状况(表 1)。

2.2 林地土壤湿度测定

在不同林地植被调查基础上,随机选取 3 个典型样地样点,在其大致中心位置(两株树的中心线与两行

距的中心线的交点)进行土壤取样,取样点尽量避免靠树太近造成误差,即取样点离周围最近的树距离大致相等。用人工土钻法取 0—10 m 的土壤,0—1 m 土层每间隔 10 cm 取样,1—10 m 土层每间隔 20 cm 取样,每层取 3 个土样重复。采用烘干法测定土壤质量含水量。每次土壤水分测定取样时保证前 7 日未降雨,土壤水分测定时间集中在 2017 年 10 月 25 日—2017 年 11 月 10 日。

表 1 不同林地和荒草地的基本情况

Table 1 Basic situation of different forestland and grassland

植被类型 Vegetation types	海拔 Altitude/m	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	平均高 Average high/m	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	郁闭度 Canopy density/%	林龄 Tree age/a	栽植密度/ 株行距 Planting density
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	1410	东	23	3.10	2.60	40%	8	2 m×3 m
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	1434	东	24	8.90	8.60	85%	18	2 m×3 m
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	1420	东	25	3.20	2.20	60%	5	2 m×3 m
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1410	东北	20	10.90	8.60	80%	19	2 m×3 m
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	1425	东南	25	2.50	1.80	90%	18	1 m×1 m
荒草地 Grassland	1431	东南	18	—	—	—	—	—

2.3 土壤干燥化强度评价方法

黄土高原土壤干层下限含水量指标≤凋萎湿度,上限含水量指标≤土壤稳定湿度^[14]或毛管断裂湿度。土壤稳定湿度是指土壤能够长期维持的一个土壤湿度值,一般是田间持水量的 50%—80%^[1-2],该值反映某一土壤持水性能的中间状态。本文的田间稳定湿度值取田间持水量的 60%,凋萎湿度取值 4.7%^[15]。

本文为了定量描述不同林地的土壤干燥化程度,采用土壤干燥化指数 SDI(soil desiccation index)分析和对比不同林地的土壤干燥化效应^[12,14,16]。

$$SDI = \left(1 - \frac{SM - SW}{SSM - SW} \right) \times 100\% = \frac{SSM - SM}{SSW - SW} \times 100\%$$

式中,SDI 是土壤干燥化指数(%),SM 是土壤湿度(%),SW 是凋萎湿度(%),SSM 是土壤稳定湿度(%),土壤湿度用土壤质量含水量(%)表示。依据 SDI 大小,土壤干燥化强度划分等级(表 2)。

表 2 土壤干燥化强度划分标准

Table 2 Classification standard of soil desiccation intensity

土壤干燥化指数 SDI (Soil desiccation index)	土壤干燥化强度等级 Soil desiccation intensity grades	土壤干燥化指数 SDI (Soil desiccation index)	土壤干燥化强度等级 Soil desiccation intensity grades
SDI ≥ 100%	极度干燥化	25% ≤ SDI < 50%	中度干燥化
75% ≤ SDI < 100%	强烈干燥化	0 ≤ SDI < 25%	轻度干燥化
50% ≤ SDI < 75%	严重干燥化	SDI < 0	无干燥化

2.4 土壤水分相关指标计算方法

土壤储水量(SWS)为一定厚度土层所储存的水量,计算公式:

$$SMS = \frac{10 \times SMC \times BD \times H}{\rho}$$

式中,SMS(soil moisture storage)为土壤储水量(mm);BD(bulk density)为土壤容重(g/cm³),取值为 1.3 g/cm³,SMC(soil moisture content)为土壤质量含水量(%),H 表示土层厚度(cm),ρ表示水的密度,取值为 1.0 g/cm³。

土壤有效储水量(ASMS)表示土壤实际储水量与凋萎湿度时土壤储水量的差值,计算公式为:

$$ASMS = SMS - SMS_{WM}$$

式中, ASMS(available soil moisture storage) 为土壤有效储水量(mm); SMS_{WM} 表示土壤水分为凋萎湿度时的土壤储水量(mm)。

土壤水分过耗量(SMO)表示土壤稳定湿度时的储水量与实际土壤储水量的差值, 计算公式为:

$$SMO = SMS_{SSM} - SMS$$

式中, SMO(soil moisture overuse) 为土壤水分过耗量(mm); SMS_{SSM} 表示土壤水分处于稳定湿度的土壤储水量(mm)。

土壤干燥化速度(SSD)表示人工造林后平均每年土壤水分过耗量, 计算公式为:

$$SSD = SMO/TA$$

式中, SSD(speed of soil desiccation) 为土壤干燥化速度(mm/a); SMO(soil moisture overuse) 为土壤水分过耗量(mm); TA(tree age) 表示树龄(a)。

2.5 数据分析

用方差分析、LSD 多重比较不同植被类型浅层与深层土壤水分的差异性, 分析不同林地土壤干燥化效应, 制表和制图在 Excel2016 中完成。

3 结果与分析

3.1 不同林地 0—10 m 土层土壤含水量

分别对各林地和荒草地 0—2 m 和 2—10 m 的土壤湿度进行统计分析(表 3)。可知, 浅层(0—2 m) 土壤湿度值为刺槐林地最低, 平均值仅为 10.67%, 在 4.16%—13.16% 之间波动, 最小值(4.16%) 已低于凋萎湿度 4.7%; 小叶杨林地最高, 平均值达 17.11%。除小叶杨林地以外, 山杏、沙棘、油松、刺槐林地, 在 0—2 m 平均土壤湿度值均低于荒草地(15.03%)。深层(2—10 m) 土壤湿度则有所不同, 小叶杨林地土壤湿度平均值仅为 6.24%, 在 5.30%—8.24% 之间波动, 是这几种林地中最低的。深层土壤湿度最高的是荒草地, 在 8.68%—17.51% 波动, 平均值为 13.25%。除荒草地外, 油森林地的土壤湿度最高。

表 3 不同植被类型下土壤水分含量与多重比较

Table 3 Soil water contents in different vegetations types by multiple comparisons

植被类型 Vegetation types	0—2 m				2—10 m			
	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Average/%	变异系数 Coefficient of variation	最小值 Min/%	最大值 Max/%	平均值 Average/%	变异系数 Coefficient of variation
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	4.16	13.16	10.67c	0.31	4.20	9.55	6.41g	0.23
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i> Linn	5.18	20.13	13.32b	0.28	4.90	14.57	8.18f	0.36
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	8.63	19.90	17.11a	0.18	5.30	8.24	6.24g	0.11
油松 <i>Pinus tabuliformis</i>	9.15	14.99	12.93bc	0.11	5.96	13.07	9.96e	0.23
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	13.46	15.27	14.14b	0.03	7.24	13.51	9.54e	0.15
荒草地 Grassland	14.38	15.80	15.03ab	0.03	8.68	17.51	13.25d	0.22
F 值 F value			4.55 **				9.14 **	

同一列不同植被类型之间字母不同表示差异显著($P < 0.05$, LSD), ** 表示差异极显著($P < 0.01$)

各类林地 0—10 m 土壤湿度(表 4)平均于 7.57%—10.80%, 平均值 9.59%, 土壤储水量在 984.1—1404.0 mm, 平均 1246.4 mm; 土壤有效储水量变化在 373.1—793.0 mm, 平均 635.4 mm, 均低于荒草地的土壤湿度 13.73%, 也均低于土壤稳定湿度 12.50%, 仅占田间稳定湿度的 60.6%—96.4%, 说明各林地发生了不同程度的土壤干燥化现象。

各林地土壤水分过耗量介于 221.0—640.9 mm, 平均 378.6 mm(表 4), 其中刺槐林最大(640.9 mm), 是油松林(223.6 mm)和山杏林(221.0 mm)的近三倍, 小叶杨次之(427.7 mm), 山杏林(221.0 mm)最小。虽然山杏林的土壤储水量最大(1404.0 mm), 但还是小于荒草地。不同林地土壤干燥化速度介于 12.3—44.7 mm/a 之间, 平均值 27.1 mm/a, 油松最大, 山杏最小。

表 4 不同林地和荒草地 0—10 m 土层土壤含水量比较

Table 4 Comparison of soil water in 0—10m soil layer in different forestlands and grassland

植被类型 Vegetation types	土壤湿度/% Soil moisture	土壤储水量 Soil moisture storage/mm	土壤有效储水量 Available soil moisture storage/mm	土壤水分过耗量 Amount of soil moisture overuse/mm	平均土壤干燥化速度 Average speed of soil desiccation/(mm/a)
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	7.57	984.1	373.1	640.9	33.7
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	9.21	1197.3	586.3	427.7	23.8
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	9.58	1245.4	634.4	379.6	21.1
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	10.78	1401.4	790.4	223.6	44.7
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	10.80	1404.0	793.0	221.0	12.3
各类林地平均 Average of forestlands	9.59	1246.4	635.4	378.6	27.1
荒草地 Grassland	13.73	1784.9	1173.9	-159.9	—
凋萎湿度 Withering moisture	4.70	611.0	0.0	—	—
土壤稳定湿度 Soil stable moisture	12.50	1625.0	1014.0	—	—

3.2 不同林地土壤湿度剖面分布特征

不同林地和荒草地 0—10 m 土壤剖面的土壤湿度随着土层深度存在先降低后升高的整体趋势(图 1)。除油松、沙棘、荒草地外, 其他林地最大耗水深度达到或超过 10 m。其中山杏林地 250 cm 以下均为土壤干层, 刺槐林地 75 cm 以下均为土壤干层, 油松林地土壤干层位于 130—750 cm 和 870—1000 cm, 沙棘林地、荒草地土壤干层分别位于 130—850 cm, 270—610 cm。刺槐林地土壤水分亏缺最严重, 山杏林地较轻。各林地和荒草地浅层土壤湿度都大于田间稳定湿度, 甚至部分植被土层土壤湿度达到田间持水量以上。不同林地开始出现土壤干层的深度也不一样, 刺槐林地开始形成土壤干层最浅, 为 75 cm; 沙棘和油松林次之, 均为 130 cm; 油松林次深, 为 170 cm, 山杏林最深, 为 250 cm。

3.3 不同植被类型土壤干燥化程度

由于土壤湿度调查的时间是雨季末期(10月下旬), 浅层土壤水得到降雨补给, 相关研究表明, 降雨对土壤水分的补给深度一般为 1—2 m^[17]。故本文只分析各植被类型土壤深层(2—10 m)土壤干燥化强度。在不同林地中, 深层(2—10 m)土壤已达强烈干燥化为小叶杨林地(干燥化指数为 80.19%)和刺槐林地(78.03%), 说明深层土壤水分利用量较大; 与其他植被类型相比, 刺槐林地出现了极度干燥层, 厚度达 140 cm, 位于 160—300 cm 土层, 该层是刺槐林地主要耗水层。其他样地的 2—10 m 土层的干燥化指数分别为沙棘林 55.38%(严重干燥化)、山杏林 37.94%(中度干燥化)、油松林 32.34%(中度干燥化)、荒草地 -9.75%(无干燥化)(表 5)。达到强烈以上程度的干燥层厚度从大到小依次为小叶杨林地 580 cm、刺槐林地 380 cm、沙棘林地 360 cm、油松林地 100 cm。山杏林地未出现强烈程度以上

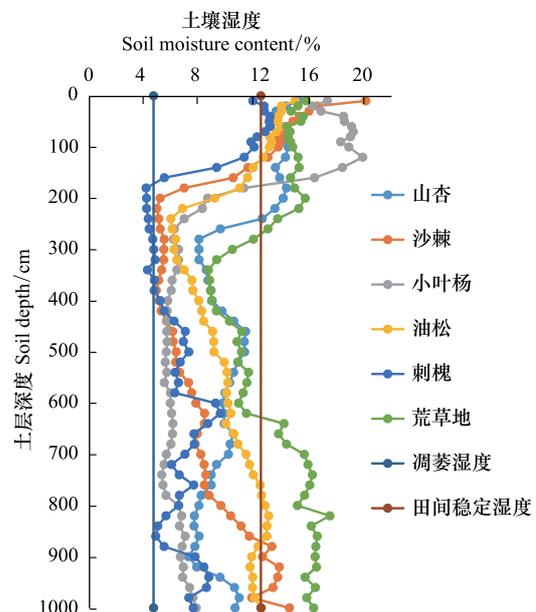


图 1 不同林地与荒草地土壤湿度剖面分布

Fig.1 Distribution of soil moisture profile in different forestlands and grassland

的干燥层,但严重程度以上的干燥层厚度达到 240 cm。荒草地只出现中度以上干燥层,厚度 160 cm。山杏林,刺槐林和小叶杨林地的土壤干层深度都超过了 10 m 以上。在这几种植被类型中,荒草地的土壤干层厚度最小,为 340 cm。

表 5 不同植被类型深层(2—10 m)土壤干燥化指数、干燥化强度和剖面土壤干层厚度

Table 5 Soil desiccation index, desiccation density and soil desiccation thickness in different forestlands and grassland in the deep(2—10 m)

植被类型 Vegetation types	平均干燥化指数 Soil desiccation index/%	土壤干燥化强度 Soil desiccation intensity	极度干燥层 Extreme desiccation soil layers/cm	强烈以上干燥层 Strong desiccation soil layers/cm	严重以上干燥层 Severe desiccation soil layers/cm	中度以上干燥层 Moderate desiccation soil layers/cm	土壤干层 Dried soil layers/cm
荒草地 Grassland	-9.57	无干燥化	0	0	0	160	340
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	32.34	中度干燥化	0	100	140	220	750
山杏 <i>Armeniaca sibirica</i>	37.94	中度干燥化	0	0	240	340	>750
沙棘 <i>Hippophae rhamnoides</i>	55.38	严重干燥化	0	360	240	80	720
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	78.03	强烈干燥化	140	380	260	100	>925
小叶杨 <i>Populus simonii</i>	80.19	强烈干燥化	0	580	220	20	>830

4 讨论

4.1 不同植被 0—10 m 土层土壤湿度

土壤水分是半干旱黄土区植被构建的限制因素,在植被恢复过程中,合理利用土壤水分至关重要,不同植被类型在根系分布,土壤水分需求上存在差异。各植被类型样地浅层土壤湿度相对较高,主要是因取样时间是雨季末期的 10 月下旬和 11 月上旬,受雨季降雨补给影响。刘刚^[15]等分析吴起县不同植被类型土壤干层表明,降雨能缓解土壤浅层土壤水分亏缺,与本文研究结果一致。在浅层土壤水分中,其中小叶杨林地的土壤湿度最高,可能由于小叶杨林地枯落物较厚,有利于减少地表径流,增加入渗以补充土壤水分;杨磊^[18]等通过分析次降雨事件对不同植被类型土壤水分的补给效率与阈值表明,相同降雨条件下,天然荒草地土壤水分容易得到补给,其次为小麦(*Triticum aestivum*)、沙棘、红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)和油松,与本文研究结果不一致,可能是因荒草地土壤水分物理蒸发较大,导致土壤水分低于小叶杨林地。然而小叶杨林地的深层土壤湿度却最低,土壤干燥化指数也最大,这可能是由于小叶杨林树木高大与密集,蒸散耗水量较大,在以往年份中利用了更多深层土壤水。除荒草地外,油松林深层土壤湿度最高,这是因为油松林林龄很小,仅为 5 年,土壤水分的亏缺累计还不大。刺槐林 0—10 m 土层的水分过耗量最大,这主要因刺槐林树木大和林龄大,降雨补充土壤水分少,这从其浅层土壤湿度最低和土壤干层形成深度最浅都能反映;此外,相关研究表明,刺槐属于深根系植被^[19],能够利用深层土壤水所致。

4.2 不同植被的土壤湿度剖面分布特征

土壤干层的分布受到土壤湿度剖面分布的影响,土壤水分的消耗主要是物理蒸发^[20]、植被蒸腾^[21]和根系吸收^[22]。近年来,黄土高原干旱次数增多^[23],气候呈干旱化趋势^[24],降水量减少,植被耗水量增加,致使土壤水分处于亏缺状态,长期低于土壤稳定湿度,林草植被为了维持自身生命活动,导致林木通过根系不断由表层向深层吸收利用深层土壤水分,出现更严重的亏缺,最终形成土壤干层。莫保儒等^[25]研究表明,由土壤表层至深层,地形影响土壤水分的作用逐渐减弱,植被影响土壤水分的作用逐渐增强;张晨成^[26]分析了坡面尺度下不同植被类型的土壤干层的空间分布,研究结果表明,植被是改变坡面深层土壤水分分布的主要影响因素,均与本文研究结果一致。由图 1,土壤干层在研究区不同植被类型下均存在,植被只是在一定空间尺度下加重土壤干层。黄土高原土壤干层会恶化当地的生态环境,土壤干层除了受到降水的影响外,还受到植被的生理生态特征、土壤理化性质^[27]、根系分布、吸水能力、气孔导度^[22]等的影响。

4.3 不同植被的深层土壤干燥化强度

黄土高原土壤干层的形成是由于树木在长期连续生长过程中过度消耗土壤水分的结果。梁海斌^[28]等对黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化强度分析表明,随树龄和土层深度的增加,不同退耕还林植被土壤干燥化强度和土壤干层厚度逐渐增加;李军^[29]等分析不同植被类型区人工林地土壤干燥化强度表明,随着林龄增加,林地土壤干燥化强度逐渐加强;卢建利^[30]等研究了半干旱黄土区 4, 8, 12, 15 a 沙棘林生长季土壤水分动态,得出 0—6 m 土壤湿度明显随着树龄增加而减小的规律,均与本文研究结果基本一致。其中,山杏林(8 年生)和油松林(5 年生)土壤干燥化强度为中度,刺槐林、沙棘林、小叶杨林土壤干燥化强度已达严重及以上。在同一地点的土壤性质、降雨条件基本相同的情况下,各植被类型土壤水分亏缺的差异主要是植被特征^[31]、微地形差异^[32]等因素综合作用的结果。本研究分析了各植被类型深层土壤干燥化效应,今后研究中,应考虑各因素的综合影响机制。

5 结论

在 2017 年生长季末对位于黄土高原半干旱区的陕西省吴起县的主要各植被类型 0—10 m 土层的土壤湿度的一次性调查表明,浅层与深层土壤湿度均存在显著差异,其中浅层:小叶杨>山杏>沙棘>油松>刺槐,深层:油松>山杏>沙棘>刺槐>小叶杨。与荒草地相比,各类林地均出现了土壤水分过度消耗,其中刺槐林过耗量最大,山杏林最小。

各林地均存在土壤干层,其中刺槐林、小叶杨林和山杏林土壤干层都已达到 10 m 以下,植被是深层土壤水分的主要影响因素。

5 类林地土壤干燥化指数平均为 39.26%,都远高于荒草地-9.57%。土壤干燥化强度为小叶杨>刺槐>沙棘>山杏>油松,这是树种、林木大小和密度、林分生物量、树龄等生长指标综合作用的结果。在今后植被恢复中,应注意根据当地土壤水分条件,合理选择节水树种和合理设计林分结构,尽量避免或减轻土壤干化,维持较高的植被稳定性。

参考文献 (References):

- [1] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [2] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- [3] 李玉山. 黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 3(2): 91-101.
- [4] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展. *林业科学*, 2005, 41(4): 155-161.
- [5] 王力, 邵明安. 黄土高原退耕还林条件下的土壤干化问题. *世界林业研究*, 2004, 17(4): 57-60.
- [6] 王力, 邵明安, 张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 436-442.
- [7] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999, (5): 11-14.
- [8] 杨文治, 田均良. 黄土高原土壤干燥化问题探源. *土壤学报*, 2004, 41(1): 1-6.
- [9] 王力, 邵明安, 侯庆春. 延安试区土壤干层现状分析. *水土保持通报*, 2000, 20(3): 35-37.
- [10] 赵景波, 周旗, 侯雨坚. 黄土高原土壤干层对生态环境建设的影响. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 31(4): 93-97, 109-109.
- [11] 梁海斌, 史建伟, 李宗善, 牛俊杰. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 87-93.
- [12] 曹裕, 李军, 张社红, 王亚莉, 程科, 王学春, Tahir M N. 黄土高原苹果园深层土壤干燥化特征. *农业工程学报*, 2012, 28(15): 72-79.
- [13] 王美艳, 李军, 孙剑, 王学春, 方新宇, 任晶晶. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应. *生态学报*, 2009, 29(8): 4526-4534.
- [14] 李军, 陈兵, 李小芳, 赵玉娟, 次仁央金, 蒋斌, 胡伟. 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田土壤干燥化效应比较. *土壤学报*, 2008, 45(1): 40-49.
- [15] 刘刚, 王志强, 王晓岚. 吴旗县不同植被类型土壤干层特征分析. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 126-129.
- [16] Zhang J, Wang L. The impact of land use on water loss and soil desiccation in the soil profile. *Hydrogeology Journal*, 2017, 26(3): 185-196.
- [17] 孙长忠, 黄宝龙. 黄土高原“林分自创性”有效水分供给体系的研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 614-621.
- [18] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 457-466.

- [19] Li P, Zhao Z, Li Z B. Vertical root distribution characters of *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau in China. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(2): 87-92.
- [20] 程立平, 刘文兆. 黄土塬区不同土层土壤水分对旱作冬小麦耗水的贡献. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2285-2291.
- [21] 赵明, 郭志中, 王耀琳, 李爱德, 张得魁, 贾宝全. 不同地下水位植物蒸腾耗水特性研究. *干旱区研究*, 2003, 20(4): 286-291.
- [22] Kattge J, Knorr W. Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species. *Plant, Cell and Environment*, 2007, 30(9): 1176-1190.
- [23] 王利娜, 朱清科, 翁白莎, 刘芳, 王建伟, 何霄嘉. 1961—2012 年黄土高原干旱时空分布特征. *水利水电技术*, 2018, 49(2): 15-22.
- [24] 段建军, 王小利, 高照良, 张彩霞. 黄土高原地区 50 年降水时空动态与趋势分析. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 143-146.
- [25] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 杨磊, 党宏忠, 王多锋, 薛睿. 半干旱黄土区成熟柠条林地剖面土壤水分环境及影响因子研究. *干旱区地理*, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [26] 张晨成, 邵明安, 王云强. 黄土区坡面尺度不同植被类型下土壤干层的空间分布. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 102-108.
- [27] 吕文强, 王立, 党宏忠, 周泽福, 何修道. 黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征. *水土保持学报*, 2015, 29(6): 233-240.
- [28] 梁海斌, 薛亚永, 安文明, 王帅, 李宗善, 吕一河. 黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 77-85.
- [29] 李军, 陈兵, 李小芳, 赵玉娟, 次仁央金, 蒋斌, 胡伟, 程积民, 邵明安. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应. *生态学报*, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [30] 卢建利, 陈云明, 张亚莉, 李卓, 徐敬华. 黄土丘陵半干旱区沙棘生长对土壤水分及养分影响. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 137-140, 145-145.
- [31] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 木热提江·阿不拉, 蔺鹏飞, 张晓萍. 黄土高原沟壑区不同植被对土壤水分分布特征影响. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 60-64.
- [32] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 蔡国军, 贾福岩. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应. *地理研究*, 2012, 31(1): 71-81.