

黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应

梁海斌^{1,2}, 薛亚永³, 安文明^{1,2}, 王帅¹, 李宗善¹, 吕一河¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 土壤水分是黄土高原植被恢复的主要限制因子, 退耕还林工程在恢复生态环境的同时也造成了区域土壤含水量下降和土壤干燥程度的加剧, 土壤干燥化正日益威胁到土壤水资源的持续利用和人工植被建设的成效。选取黄土高原退耕还林试点县吴起境内刺槐、杏树、柠条和沙棘4种分布广泛的退耕植被类型, 对照撂荒草地, 分析了不同林龄和不同植被类型样地0—500 cm的土壤水分特征和土壤干燥化效应, 并根据作物耗水量估算土壤干层水分的恢复时间。结果表明: 不同退耕还林植被类型样地土壤含水量由表层向深层呈降低趋势, 随林龄增加, 各植被类型样地土壤含水量、有效储水量逐渐减少。刺槐林土壤含水量较同龄沙棘和柠条林低, 而杏树林则较同龄柠条林高。各植被类型样地土壤剖面均不含渗透重力水与极易效土层, 随林龄增加, 土壤相对湿度及易效水土层厚度占比逐渐减少, 中效水、难效—无效水土层厚度逐渐增加。随林龄和土层深度的增加, 各植被类型样地土壤干燥化强度、土壤干层厚度逐渐增加, 土壤湿度恢复到土壤稳定湿度所需要的时间及难度呈上升趋势。

关键词: 土壤干燥化; 退耕还林; 土壤含水量; 黄土高原

中图分类号: S727.21; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0077-09

Effects of Different Revegetation Types on Soil Desiccation in the Loess Plateau

LIANG Haibin^{1,2}, XUE Yayong³, AN Wenming^{1,2}, WANG Shuai¹, LI Zongshan¹, Lü Yihe¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of West China's Environmental System, Ministry of Education, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Soil moisture is the main limiting factor affecting vegetation restoration in the vast Loess Plateau. Since Grain-for-Green Project was conducted in 1999, vegetation coverage has increased significantly, and soil and water loss has been alleviated. However, on the other hand, as ecological water use of vegetation increased, it has resulted in decrease of soil moisture content and aggravated soil desiccation. Soil desiccation has been seriously threatened the sustainable and healthy use of soil water resource as well as the vegetation construction. In the present study, a representative county, Wuqi County, located in northwestern Loess Plateau, was selected. Four different revegetation types (*Robinia pseudoacacia*, *Prunus armeniaca*, *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*) with various forest ages (10-year, 15-year, 18-year, 20-year, 25-year, 30-year, 38-year, 42-year as well as 50-year) were selected to measure the soil moisture contents and soil desiccation intensity in 0—500 cm soil profiles. Soil moisture availability, together with desiccated soil layers' recovery was also estimated based on annual crop water consumption. The results indicated that soil moisture contents of different revegetation types decreased from surface to deep soil layers, soil moisture in 0—100 cm soil depth varied actively, while below 100 cm it kept relatively stable; as forest age increased, soil moisture contents, available soil moisture storage gradually declined, while soil moisture over consumption showed an increasing tendency; soil moisture content in *Robinia pseudoacacia* was lower than that in *Caragana korshinskii* and *Hippophae rhamnoides* shrub-lands with the same forest age, whereas soil moisture content in *Prunus armeniaca* was a little higher than even-aged *Caragana korshinskii*; moreover, there was no infiltration gravitational moisture and most easily available soil moisture in each sampling plot; with

the increase of forest age, relative soil moisture and the ratio of easily available soil moisture to soil profiles decreased, while the thickness of moderately available and hard-unavailable soil moisture gradually increased. In conclusion, soil desiccation intensity and the thickness of desiccated soil layers gradually increased along with the increase of forest age and soil depth, furthermore, both the time and difficulty required for soil desiccation recovery to the stable soil moisture escalated.

Keywords: soil desiccation; grain-for-green project; soil moisture; the Loess Plateau

黄土高原干旱半干旱区植被稀疏,土质疏松,受水力与风力作用,土壤侵蚀现象严重,造成了严重的水土流失问题。自 20 世纪 70 年代末开始,经过一系列生态恢复建设工程,国土整治措施的实施,黄土高原地区植被覆盖状况^[1]、土壤侵蚀和水土流失问题得到明显改善^[2]。但是,在黄土高原植被建设过程中,由于自然干旱和不合理的植被选种及配置模式,植被不断消耗深层土壤水分^[3-4],造成严重的土壤干燥化现象,并导致地表水与地下水联系中断、土壤深层储水减少而形成土壤干层^[5]、人工林草植被衰退、局部气候环境趋于旱化^[6]等一系列生态学问题。近年,黄土高原土壤水分及土壤干燥化问题日益引起人们的重视。现有研究表明,土壤干燥化现象广泛存在于黄土高原不同植被类型区,包括林地、草地^[7-8],甚至南部半湿润区的草田轮作农地^[9]。通过长时间序列研究发现,苜蓿草地快速消耗深层土壤水分,尽管地表覆盖能够降低表层土壤温度波动,增加表层土壤水分,提高饲草产量,但对于缓解深层土壤干燥化进程作用不大^[10]。另外,黄土高原地区的土壤干层分布具有明显的空间变异性^[11],土壤干燥化强度受土地利用、植被类型、植物生育期的影响显著,天然植被的自然演替可以使土壤干层有所缓解,并逐步得到恢复^[12]。同时,对于黄土高原土壤干层水分的恢复状况也有相关研究报道^[13-14],如王志强等^[15]研究了黄土高原半干旱区苜蓿翻耕地土壤干层的水分恢复状况,得出苜蓿翻耕后 3 a 和 12 a 后 2 m 以上土层的土壤平均湿度均可恢复到易效水水平,并能够满足 1 a 生农作物的生长需水要求,但不能满足高耗水的多年生林草植被正常生长需水。刘沛松等^[16]对宁南山区不同生长年限苜蓿深层土壤水分及翻耕后轮作农田的水分进行测定,结果表明随着粮草轮作年限的增加,苜蓿土壤干层水分恢复到农田湿度的效果越好。但是,关于土壤干燥化及干层土壤水分恢复的研究大多仅针对某一特定植被类型,对整个区域范围内不同退耕还林植被类型的土壤干燥化及干层水分恢复状况的研究较少。

经过十几年的退耕还林(还草)工程建设之后,不同种植年限的深根系植被对土壤水分有何影响?不

同退耕还林类型植被的土壤干燥化效应如何?因此,以退耕还林工程导致的土壤水分差异为基础,进行不同退耕还林植被土壤水分对生态恢复响应的研究有重要的生态学意义。为解决这些问题,本研究选取退耕还林示范县吴起境内不同种植年限的典型退耕还林植被,乔木与灌木群落各两类(刺槐—10,15,25,42 a、杏树—20,30,50 a、柠条—25,30,50 a、沙棘—10,15,18,38 a),以多年撂荒草地(撂荒年限 40 a 以上)为对照,采用空间代替时间方法,系统研究了 0—500 cm 土层的土壤水分状况、土壤干燥化程度,并对不同降水年型的土壤干层水分恢复情形进行估算,以期判定各类退耕还林植被的土壤水分变化规律及其土壤水分有效性,为黄土高原地区恢复植被选种、管理提供相关依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

吴起县(107°38′57″—108°32′49″E,36°33′33″—37°24′27″N)位于延安市西北部^[17]。境内梁状丘陵沟壑分布,海拔介于 1 233~1 809 m,总面积为 3 791.5 km²。该区气候属暖温带大陆性半干旱气候,年均气温为 7.8℃,最热月(7 月)平均温度为 21.5℃,最冷月(1 月)平均温度为 -7.7℃;多年平均降水量为 478.3 mm,且年内分布不均,7—9 月降水量约占全年降水总量的 62%以上(图 1);年均陆地蒸发量为 400~450 mm,干燥度为 1.86;光照充足,年均日照时数达 2 400 h;≥10℃的有效积温为 2 883℃^[18],无霜期短,约为 96~146 d。境内土质均一,地带性土壤为黄绵土,质地属轻壤^[19],土壤容重 1.17~1.21 g/cm³,平均为 1.19 g/cm³^[20],田间持水量为 20.6%,土壤凋萎湿度平均为 4%^[21]。全区水土流失面积达 3 693 km²,约占土地总面积的 97.40%,年侵蚀模数为 0.54 万 t/km²,是黄土高原极强度水土流失地区之一^[17]。

研究区为我国退耕还林的试点示范县和全国造林先进县,自 1999 年开始实施退耕还林以来,累计完成退耕还林面积 12.32 万 hm²,林草覆盖率达 62.9%。该区以人工植被为主,包括有林地、疏林地

和灌木林地,主要乔木类型为刺槐(*Robinia pseud-acacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Prunus armeniaca*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)和榆树(*Ulmus pumila*),灌木主要以柠条(*Caragana korshinskii*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 样地布设 试验前首先对研究区主要土地利用类型及不同退耕还林(还草)植被类型实地调查,在此基础上,选取 15 块样地分别代表不同种植年限的典型退耕还林植被类型,详细调查记录样地内植物种类、长势(盖度、高度、冠幅)、地貌特征(坡度、坡向、坡位、海拔)等相关信息(表 1)。已有研究表明,在黄土高原半干旱区,只有林龄大于一定生长年限的植被,其土壤水分循环过程才能基本稳定,此时土壤水分的

差异主要受植被类型的影响,因此本研究所选植被类型均为 10 龄以上,以避免初始土壤含水量对当季土壤水分的影响^[22]。同时,为避免地貌部位不同对土壤水分的影响,采样点均选择在阳坡坡顶立地条件相近的地方,各样地基本信息见表 1。

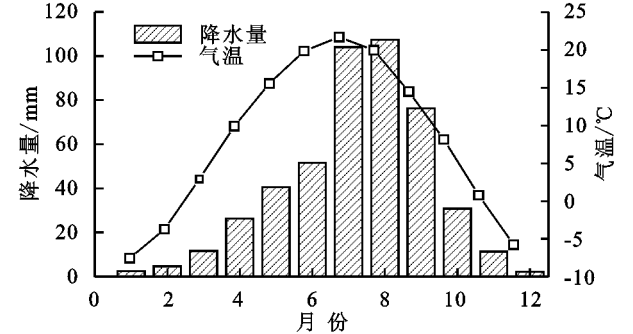


图 1 1956—2015 年研究区多月平均温度及降水分布

表 1 主要造林树种样地概况

造林 树种	林龄/ a	经度/ (°)	纬度/ (°)	坡向/ (°)	坡度/ (°)	密度/ (株·hm ⁻²)	盖度/ %	海拔/ m
刺槐	10	107.90	36.91	S54°W	7	819	35	1659
	15	107.97	36.78	S17°E	10	775	25	1552
	25	108.38	37.14	S5°E	30	725	20	1545
	42	108.38	37.14	S12°W	20	300	10	1531
杏树	20	108.04	36.91	S	20	1025	40	1410
	30	107.91	36.92	S87°E	3	980	25	1634
	50	108.40	37.35	S65°E	20	875	10	1580
柠条	25	108.38	37.14	S60°E	35	825	60	1576
	30	108.43	37.34	S24°W	25	475	45	1523
	50	107.82	37.12	S75°W	30	—	20	1567
沙棘	10	107.91	36.91	S82°W	5	—	65	1644
	15	107.98	36.78	S30°E	10	1500	50	1543
	18	107.87	36.84	S30°W	20	—	45	1612
	38	108.40	37.35	S45°E	30	1800	35	1542
撂荒草地(CK)	40	107.87	36.84	S68°W	4	—	—	1582

1.2.2 土壤样品采集 于 2014 年 7 月,采用土钻法进行土样采集,测定深度为 500 cm,间距为 20 cm。根据烘干法取每层平均值作为该测层的土壤含水量。采样期间均无有效降水分布,因而可避免单次降水事件对取样的影响,所测数值能真实反映土壤水分的自然变化状况。

土壤样品采集的同时,在样地附近(1 m 范围以内)挖取 40 cm 深的土壤剖面,使用环刀(直径 5 cm,高 5 cm,容积 100 cm³)分上下两层(0—20 cm,20—40 cm)采集土壤原状土测定土壤容重、饱和含水量等土壤水分物理性质。

1.3 相关土壤水分指标计算方法

采用烘干称重法测定土壤含水量,将已称取湿重后的土壤样品,置于鼓风干燥箱于 105℃条件下连续烘干 18 h 至恒重后称量干土质量。土壤含水量计算

公式为:

$$SMC=\frac{G_1-G_2}{G_2-G}\times 100\% \tag{1}$$

式中:SMC(soil moisture content)为土壤含水量(%);G₁为铝盒与湿土质量(g);G₂为铝盒与干土质量(g);G为空铝盒质量(g)。

土壤储水量(SMS)为一定厚度(H)土层所贮存的水量,计算公式为:

$$SMS=BD\times SMC\times H\times 0.1 \tag{2}$$

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 1.19 g/cm³;H 表示土层厚度(cm)。

土壤有效储水量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:

$$ASMS=SMS-SMS_{WM} \tag{3}$$

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

土壤水分过耗量表示土壤储水量与土壤达到稳定湿度时土壤储水量的差值,计算公式为:

$$SMO=SMS-SMS_{SSM} \tag{4}$$

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

土壤相对湿度,即土壤含水量与土壤田间持水量的比值,作为土壤水分对植物有效性的评价标准,其计算公式为:

$$RSM=\frac{SMC}{FC}\times 100\% \tag{5}$$

式中:RSM(relative soil moisture)为土壤相对湿度(%);FC(field capacity)为田间持水量(%)。针对研究区轻壤质地,按照杨文治等^[21]研究结果将土壤水分有效性依次划分为渗透重力水、极易效水、易效水、中效水和难效表示无效水 5 个等级(表 2)。

表 2 土壤水分有效性等级分类

土壤水分 有效性分级	土壤相对 湿度/%	土壤水分 有效性分级	土壤相对 湿度/%
渗透重力水	>100	中效水	30~49
极易效水	80~100	难效—无效水	<30
易效水	50~80		

土壤干燥化指数计算公式为:

$$SDI=\frac{SMC-WM}{SSM-WM}\times 100\% \tag{6}$$

式中:SDI(soil desiccation index)为土壤干燥化指

表 4 不同退耕还林植被类型及对照撂荒草地土壤含水量比较

植被类型	林龄/ a	土壤 含水量/%	土壤 储水量/mm	土壤有效 储水量/mm	每米土层土壤 有效储水量/mm	土壤水分 过耗量/mm
刺槐	10	6.57	390.92	152.92	30.58	340.94
	15	6.61	393.30	155.30	31.06	338.56
	25	3.65	217.18	-20.83	-4.17	-514.68
	42	4.81	286.20	48.20	9.64	445.66
杏树	20	11.33	674.14	436.14	87.23	57.72
	30	6.58	391.51	153.51	30.70	340.34
	50	3.76	223.72	-14.28	-2.86	-508.13
	25	4.67	277.87	39.87	7.97	453.99
柠条	30	3.78	224.91	-13.09	-2.62	-506.94
	50	3.36	199.92	-38.08	-7.62	-531.93
沙棘	10	8.48	504.56	266.56	53.31	227.29
	15	7.89	469.46	231.46	46.29	262.40
	18	7.36	437.92	199.92	39.98	293.93
	38	4.19	249.31	11.31	2.26	482.55
撂荒草地(CK)	40	9.29	552.76	314.76	62.95	179.10

数,用于表征土壤干燥化强度,WM(wilting moisture)为土壤凋萎湿度(%),SSM(stable soil moisture)为土壤稳定湿度(%),作为判别林草地土壤干燥化的上限指标^[14]。在黄土高原半湿润半干旱地区,由于土壤含水量随降水变化而不断发生变化,短期内不易直接测定深层土壤稳定湿度,因而参照前人研究^[23],采用土壤凋萎湿度和田间持水量的算术平均值作为土壤稳定湿度值,约为田间持水量的 50%~70%,同时将凋萎湿度作为判别土壤干燥化的下限指标。式中,SDI 数值越小,说明土壤干燥化强度越大,根据土壤干燥化指数将土壤干燥化强度划分为以下 6 个等级(表 3):

表 3 土壤干燥化强度评价等级

土壤干燥化强度	SDI/%	土壤干燥化强度	SDI/%
无干燥化	$SDI\geq 100$	严重干燥化	$50>SDI\geq 25$
轻度干燥化	$100>SDI\geq 75$	强烈干燥化	$25>SDI\geq 0$
中度干燥化	$75>SDI\geq 50$	极度干燥化	$SDI<0$

2 结果与分析

2.1 不同退耕还林植被类型土壤含水量

2.1.1 不同退耕还林植被类型剖面土壤含水量变化 就相同林龄的退耕还林植被类型而言,刺槐林土壤含水量均小于同龄沙棘与柠条灌木林,而杏树林则较同龄柠条灌木林土壤水分为高(表 4)。如 10 a,15 a 刺槐林土壤含水量分别为 6.57%,6.61%,分别较同龄沙棘林土壤含水量低 34.55%和 19.36%;25 a 刺槐林土壤含水量较 25 a 柠条林低 27.95%;而 30 a 与 50 a 杏树林土壤水分则较同龄柠条林分别高 74.07%和 11.90%。

不同退耕还林植被类型剖面土壤含水量大体上呈现由表层向深层土壤逐渐减少的变化趋势,在表层0—100 cm范围内土壤含水量变化比较活跃,由表层高值快速减少;100 cm土层以下,除38 a沙棘林土壤水分变化差异较大外,其余各样地土壤含水量变化曲线均呈波动减少趋势,但剖面土壤含水量最大值出现位置略有差异,其中10 a刺槐林、30 a杏树林在150 cm附近出现最大值,30 a柠条林与10 a沙棘林在220 cm土层处土壤含水量最高,而18 a与38 a沙棘林则分别在320 cm与360 cm处达到最大(图2)。

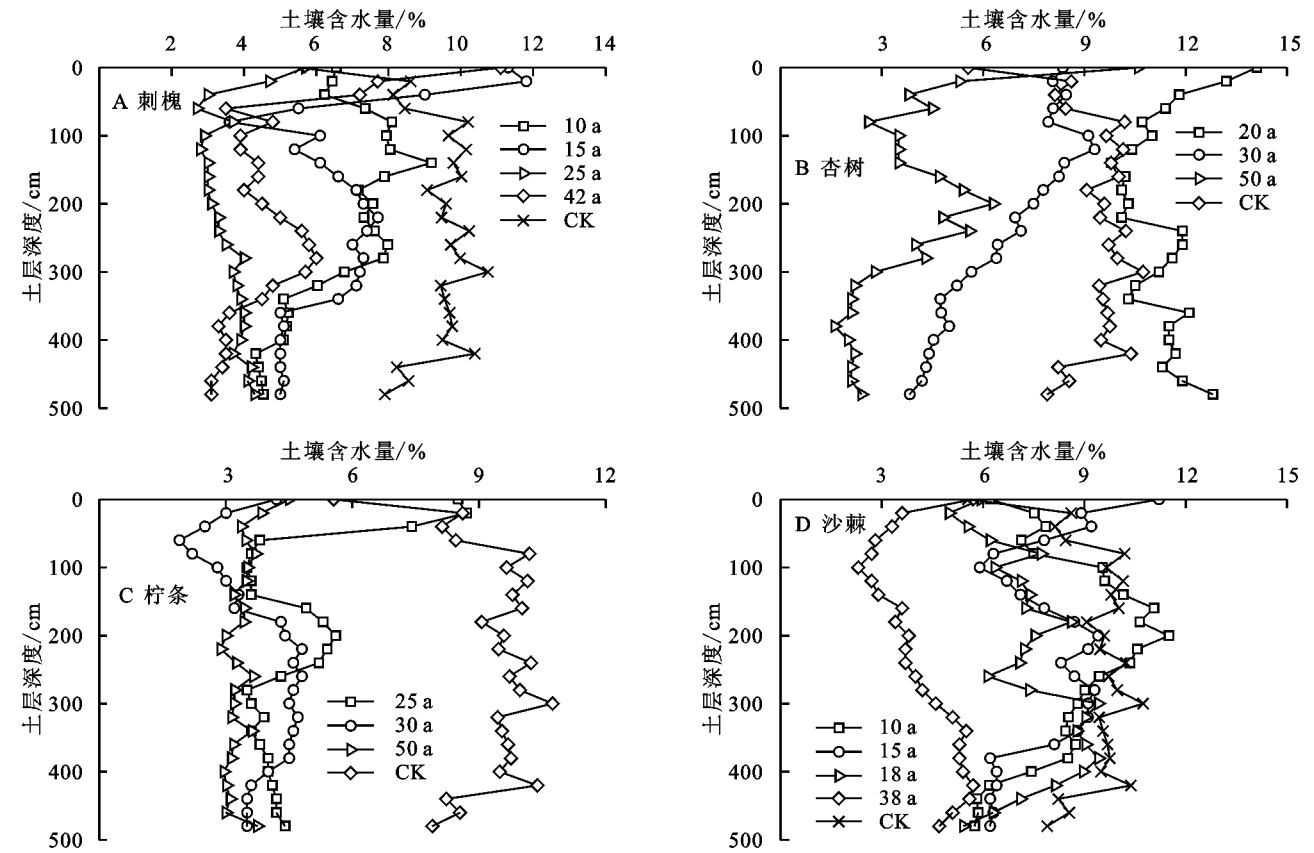


图2 不同退耕还林植被类型剖面土壤水分

2.1.2 不同林龄退耕还林植被类型土壤水分总量水平 研究区内4种不同退耕还林植被类型0—500 cm剖面土壤含水量随林龄变化见表4,结果表明,除刺槐林土壤含水量呈波动变化外,其余各植被类型土壤含水量、土壤有效储水量均随林龄增加而逐渐降低。不同林龄刺槐林土壤含水量主要介于3.65%~6.61%,平均为5.41%,但42 a刺槐林土壤水分条件优于25 a刺槐林地;杏树林土壤含水量,由20 a的11.33%逐年减少到50 a的3.76%水平,平均为7.22%;25 a,30 a和50 a柠条林平均土壤含水量为3.94%,20 a柠条林最大为4.67%,50 a柠条林最小为3.36%;不同林龄沙棘林土壤含水量变化范围为4.19%~8.48%,平均为6.98%。除20 a杏树林平均土壤含水量(11.33%)高于对照撂荒草地(9.29%)外,其余不同林龄退耕还林植被类型均显著低于对照撂荒草地。

较土壤稳定湿度而言,除刺槐林土壤水分过耗量随林龄增加呈波动变化外,其余不同退耕还林植被类型土壤水分过耗量均随林龄呈逐渐增加趋势,刺槐、

杏树、柠条和沙棘林土壤水分过耗量平均值分别为409.96,302.06,497.62,316.54 mm,年均土壤干燥化速度分别为10.61~34.09,1.92~17.02,15.23~18.16,12.70~22.73 mm/a,沙棘林年均土壤干燥化速度随林龄增加呈逐渐减小的变化趋势。

2.2 不同退耕还林植被类型土壤水分有效性评价

研究区不同退耕还林植被类型土壤水分有效性分级结果,及各有效性级别土层厚度占剖面土层总厚度的比重见表5,结果得出各植被类型样地在0—500 cm土层剖面均不含渗透重力水与极易效水层,并且随着林龄的增加,各土壤水分有效性级别的土壤平均相对湿度大致呈减少趋势,同时易效水层厚度所占剖面土层总厚度比重逐渐减少,而中效水、难效—无效水层厚度所占比重逐渐增加。

刺槐林各样地中,10 a刺槐林以中效水在剖面土层所占比重最高,平均相对湿度为36.38%,且主要分布在0—320 cm土层范围,其余320 cm以下均为难效—无效水层;15 a,25 a,42 a刺槐林则以难效—无效水比重最大,并在25 a刺槐林整个土壤剖面均为难

效—无效水层。20 a,30 a 和 50 a 杏树林分别以易效水、中效水和难效—无效水层厚度占比最高,分别达 84%,60%和 92%,对应土层土壤平均相对湿度分别为 56.20%,38.20%和 16.27%。不同林龄柠条林中,难效—无效水层厚度占比最大,仅在 25 a 柠条林表层 0—60 cm 出现少量中效水层,30 a 与 50 a 柠条林剖面均为

难效—无效水控制。10 a,15 a,18 a 沙棘林以中效水土层占比最高,而 38 a 沙棘林剖面则全部为难效—无效水层。对照撂荒草地中 88%土层的土壤水分在中效水范围内,平均相对湿度为 45.37%,主要分布在土壤垂直剖面的 20—300 cm 及 340 cm 以下,其余土层则分布为少量的易效水和难效—无效水。

表 5 不同退耕还林植被类型土壤水分有效性评价

植被类型	林龄/a	易效水		中效水		难效—无效水	
		平均相对 湿度/%	厚度占土层 总厚度比重/%	平均相对 湿度/%	厚度占土层 总厚度比重/%	平均相对 湿度/%	厚度占土层 总厚度比重/%
刺槐	10	—	—	36.38	64	23.92	36
	15	56.07	8	35.44	44	25.04	48
	25	—	—	—	—	17.73	100
	42	53.90	4	36.17	8	20.81	88
杏树	20	56.20	84	48.79	16	—	—
	30	—	—	38.20	60	22.61	40
	50	51.50	4	30.60	4	16.27	92
柠条	25	—	—	39.81	12	20.32	88
	30	—	—	—	—	18.35	100
	50	—	—	—	—	16.31	100
沙棘	10	52.52	20	40.12	68	28.18	12
	15	54.40	4	38.01	92	28.60	4
	18	—	—	37.87	80	27.22	20
	38	—	—	—	—	20.33	100
撂荒草地(CK)	40	51.27	8	45.37	88	27.00	4

2.3 不同退耕还林植被类型土壤干燥化评价

研究区内不同退耕还林植被类型土壤干燥化强度及剖面土壤干层范围评价结果见表 6,结果表明,除刺槐林样地外,不同退耕还林植被类型土壤干燥化指数 SDI 随林龄增加呈降低趋势,土壤干燥化强度逐渐增加并远大于对照撂荒草地(SDI=63.75%)。除 20 a 杏树林样地土壤干层厚度为 440 cm 外,其余不同林龄退耕还林植被类型剖面土壤干层厚度均达 500 cm,并且随林龄增加,土壤干层程度逐渐加深,强烈干燥层和极度干燥层厚度增加,而轻度、中度干燥层厚度减少。如不同林龄刺槐林样地 0—500 cm 土层的平均土壤干燥化指数 SDI 介于—4.19%~31.47%,平均值为 17.01%,10 a,15 a 刺槐林土层剖面以严重干燥层为主,但随着林龄增加,25 a,42 a 刺槐林强烈及以上干燥层厚度分别达 500 cm 和 440 cm,占土壤剖面总厚度的 88%以上,土壤干燥化强度逐渐增强。在不同林龄沙棘林样地中,10 a,15 a,18 a,38 a 沙棘林 0—500 cm 土层的平均土壤干燥化指数 SDI 介于 2.27%~53.99%,10 a,15 a 和 18 a 沙棘林分别达到中度及严重干燥化强度,38 a 沙棘林达强烈干燥化强度,并已接近极度干燥化水平。而对照样地撂荒草地土壤干燥化指数为 63.75%,达中等干燥化强度。

不同退耕还林植被类型剖面土壤干层分布结果显示,土壤干燥化程度随土层深度的增加逐步加深,土壤含水量状况越接近土壤干燥化下限(WM),甚至低于凋萎湿度。如在不同林龄柠条样地,25 a,30 a 和 50 a 柠条林剖面土壤水分均接近土壤干燥化下限值,因而自表层向深层 500 cm 土层均出现不同程度的土壤干燥化现象,并且越向深层,土壤干燥化程度越大。另外,就同一土层深度,除 25 a 刺槐林地外,其余不同林龄退耕还林植被类型土壤干燥化程度大致随林龄增加逐步加强。如 20 a,30 a,50 a 杏树林样地中,0—200 cm 土壤干燥化强度分别为轻度、中度和强烈干燥化,200—300 cm 土壤干燥化强度分别为轻度、严重、强烈土壤干燥化,300—500 cm 土壤干燥化强度则逐渐加强,分别达轻度、强烈和极度干燥化水平。

2.4 不同退耕还林植被类型土壤干层水分恢复估算

研究区 1957—2014 年降水量 270~786.3 mm,平均为 467.8 mm,其中 1964 年达最大值 768.3 mm。为判定不同退耕还林植被类型土壤干层水分恢复情况,综合考虑近 60 a 降水数据,按照平均降水量上下 10%区间依次划分为丰水年、平水年、欠水年^[24],对应降水量分别为 514.6,467.8,421.1 mm。

若大致以一季作物耗水量 350 mm^[14] 计算,粮草轮作情况下土壤湿度年恢复量分别为 164.6,117.8,71.1 mm,在连续丰水年、平水年和欠水年条件下,各样地土壤水分恢复到土壤稳定湿度水平总体上表现为随林龄增加恢复难度有所增加,且所需时间逐渐增加(表 7)。例如,10 a,15 a 刺槐林土壤水分恢复到土壤稳定湿度时分别需要 3,3,5 a;25 a 刺槐林分别需要 4,5,8 a;42 a 刺槐林则分别需要 3,4,7 a。若综合考虑各降水年型出现的概率,10 a,15 a 刺槐林需要 4 a;25 a,42 a 刺槐林则需要至少 5 a;其余不同林龄退耕还林植被类型样地土壤湿度恢复到土壤稳定湿度则需要 1~6 a 不等;对照撂荒草地需要 2 a 以上。

表 6 不同退耕还林植被类型土壤干燥化强度及土壤干层范围

植被类型	林龄/ a	平均土壤干燥 化指数/%	土壤干燥 化强度	极度 干燥层/cm	强烈 干燥层/cm	严重 干燥层/cm	中度 干燥层/cm	轻度 干燥层/cm
刺槐	10	30.97	严重干燥化	0	180	300	20	0
	15	31.47	严重干燥化	20	180	240	20	40
	25	−4.19	极度干燥化	340	160	0	0	0
	42	9.78	强烈干燥化	200	240	40	0	20
杏树	20	88.34	轻度干燥化	0	0	0	80	360
	30	31.14	严重干燥化	20	180	180	120	0
	50	−2.89	极度干燥化	300	160	20	0	20
	25	8.05	强烈干燥化	200	240	20	40	0
柠条	30	−2.65	极度干燥化	240	360	0	0	0
	50	−7.71	极度干燥化	480	20	0	0	0
	10	53.99	中度干燥化	0	60	140	200	100
	15	46.84	严重干燥化	0	20	240	220	20
沙棘	18	40.50	严重干燥化	0	80	280	140	0
	38	2.27	强烈干燥化	240	260	0	0	0
	40	63.75	中度干燥化	0	20	40	400	40

表 7 不同退耕还林植被类型土壤干层水分恢复所需水量和时间估算

植被类型	林龄/ a	土壤湿度/%		土壤稳定湿度/%		总需 水量/mm	土壤湿度恢复年需水量/mm			土壤湿度 恢复所需 年限/a
		土壤 湿度/%	土壤 储水量/mm	土壤 湿度/%	土壤 储水量/mm		丰水年	平水年	欠水年	
刺槐	10	6.57	390.92			340.94				4
	15	6.61	393.30			338.56				4
	25	3.65	217.18	12.30	731.85	514.68	164.62	117.84	71.06	5
	42	4.81	286.20			445.66				5
杏树	20	11.33	674.14			57.72				1
	30	6.58	391.51	12.30	731.85	340.34	164.62	117.84	71.06	4
	50	3.76	223.72			508.13				5
柠条	25	4.67	277.87			453.99				5
	30	3.78	224.91	12.30	731.85	506.94	164.62	117.84	71.06	5
	50	3.36	199.92			531.93				6
沙棘	10	8.48	504.56			227.29				3
	15	7.89	469.46	12.30	731.85	262.40	164.62	117.84	71.06	3
	18	7.36	437.92			293.93				3
	38	4.19	249.31			482.55				5
撿荒地(CK)	40	9.29	552.76	12.30	731.85	179.10	164.62	117.84	71.06	2

3 讨论

不同退耕还林植被类型土壤含水量与土壤有效储水量随林龄增加逐渐降低,土壤水分过耗量则随林龄呈增加趋势。通常,随林龄增加,各植被类型生长耗水量明显增加,使剖面土壤水分明显下降。郭忠升

等^[25]对固原人工柠条林土壤水分连续 5 a 观测后发现,柠条林对土壤水分的影响程度随林龄增加逐渐增强,土壤含水量与土壤储水量显著减少。卢建利等^[26]通过研究黄土丘陵半干旱区 4,8,12,15 a 沙棘林生长季内的土壤水分动态特征,得出不同林龄沙棘林均对土壤水分消耗强烈,0—600 cm 土层的平均含

水量与土壤储水量均随林龄增加表现出明显的减少趋势,均与本文研究结果一致。但42 a刺槐林土壤水分状况较25 a更优,其原因可能是随刺槐林龄的增加,老龄刺槐林逐步退化甚至出现死亡,自疏现象明显^[27],因而对土壤水分的消耗量相对减少,土壤含水量得到少量恢复。常译方等^[28]对晋西黄土区不同密度刺槐林的土壤水分研究表明,低密度刺槐林的年均土壤储水量较高密度刺槐林高,同时以田间持水量的60%作为土壤适宜储水量标准,低密度刺槐林达到适宜储水量的天数较高密度刺槐林长达60 d,低密度刺槐林的储水效果明显优于高密度刺槐林。另外,样地调查也发现,42 a刺槐林密度为300株/hm²,较25 a的725株/hm²显著减少(表1),也再次说明减小密度能部分恢复土壤含水量。但是,莫保儒等^[29]对半干旱黄土区成熟柠条林土壤水分研究中发现,人工林密度只在人工林群落初始发育阶段影响较大,由于人工林植被强烈的水分耗散,使土壤含水量迅速减少,但当人工林进入成熟或衰老阶段后,人工林密度的影响逐步减弱,土壤水分有所恢复,此时仅有群落盖度和高度对土壤水分影响较大。这与本文刺槐林土壤水分状况有所差异,可推断出土壤耗水模式与灌木林、乔木林的生理生态特征差异直接相关,冠层结构对林下土壤水分的作用影响也较大。

黄土高原地区,人工植被的降水入渗深度一般不超过150 cm,因而表层0—100 cm受降水、蒸发和植被蒸腾作用强烈,土壤水分变化活跃,100 cm以下则相对较为稳定。在干旱气候条件下,林草植被往往不可能仅从降水中获取足够的水分^[30],随植被旺盛生长,植被蒸腾量与土壤蒸发量增加,为满足正常生长水分需求,根系不断向下延伸以吸取深层土壤水分,在强烈的土壤水分消耗作用下,剖面土壤含水量明显下降,大致呈现由表层向深层逐渐减少的变化趋势。并且随林龄增加,各植被类型样地土壤平均相对湿度逐渐减少,土壤水分有效性降低,中效与难效一无效水层厚度所占土层总厚度比重也逐渐减少,这与前期在黄土高原北部所得结果一致^[31]。另外,植被根系,尤其是细根作为吸收土壤水分的主要器官,其分布深度与细根密度对土壤水分的消耗有重要作用。相关研究表明,刺槐和柠条均属深根系植被,根系分布较深,部分区域根深可达21.5 m和6.4 m^[8,11]。但是,细根表面积密度随土层深度增加逐渐增大,基本到0.5—1.2 m土层达到最大值,之后随土层深度的增加缓慢减少,因而也进一步从侧面反映了根区土壤水分状况,100 cm土层以下的土壤水分较为稳定。

黄土高原地区降水是土壤水分的主要补给源,土壤蒸发及植被蒸腾耗水是土壤水分消耗的主要输出

项,由于降水量小于蒸散发耗水量,使土壤水分常处于亏缺状态,低于土壤稳定湿度,这样自然降水、土壤储水和林草植被耗水关系失衡便形成了土壤干燥化现象,并在土壤剖面产生程度不一的厚层干燥化土层。土壤干燥化程度及土壤干层范围受土壤含水量影响,是由高耗水植被和降雨入渗补偿的有效性共同决定的^[29]。由表6可知,土壤干燥化现象在研究区内普遍存在,人工植被只是在一定空间尺度范围内加重了土壤干燥化程度^[29],随林龄增加,土壤干燥化程度逐渐加强,干燥化土层在土壤剖面的分布深度亦有所差异。Li等^[23]针对黄土高原不同植被类型区人工林地的深层土壤干燥化效应研究表明,随林龄增加,23种林地土壤干燥化强度逐渐加强,剖面土壤干层不断加深加厚,这与本文研究结果一致。另外,降水量大小对干层土壤水分的恢复起着重要作用,由于降水量的差异以及林龄的共同作用,不同退耕还林植被类型样地的干层土壤水分恢复时间及难度随林龄增加而逐渐增加。黄土区土壤干燥化现象对植被恢复的影响极为严重,土壤干燥化除受降水影响较大外,还与植被的生理生态特征、土壤的持水性能及土壤质地密切相关^[32]。因而在黄土高原植被恢复建设过程中,必须充分考虑降水特征以及植被、土壤的影响,采取适地适树(草)原则,根据土壤水分承载力要求,合理布局植被类型,选取合适的种植密度,以使土壤水资源得以持续健康利用。

4 结论

(1) 不同退耕还林植被类型随林龄增加,土壤含水量、土壤有效储水量总体上由表层向深层呈降低趋势,其中表层0—100 cm土壤水分变化活跃,土壤水分过耗量呈增加趋势,而年均土壤干燥化速度则随林龄增加表现出逐渐减小的变化趋势。

(2) 各植被类型样地土层剖面均不含渗透重力水与极易效水层,随林龄增加,植被对土壤水分的有效性程度逐渐降低,各土壤水分有效性级别对应的土壤相对湿度及易效水土层厚度占比逐渐减少,中效水、难效一无效水土层厚度逐渐增加。

(3) 随林龄和土层深度的增加,不同退耕还林植被类型样地土壤干燥化强度、土壤干层厚度逐渐增加,并远高于对照撂荒草地,各样地土壤湿度恢复到土壤稳定湿度所需要的时间及难度呈上升趋势,各样地土壤水分恢复需1~6 a不等,对照撂荒草地则需要2 a以上。

参考文献:

- [1] Zhang B Q, He C S, Burnham M, et al. Evaluating the coupling effects of climate aridity and vegetation restoration on soil erosion over the Loess Plateau in China[J].

- Science of the Total Environment, 2016, 539: 436-449.
- [2] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China[J]. Plos One, 2012, 7(2): e31782.
- [3] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 101(3): 122-128.
- [4] Yang L, Chen L D, Wei W, et al. Comparison of deep soil moisture in two re-vegetation watersheds in semi-arid regions [J]. Journal of Hydrology, 2014, 513(1): 314-321.
- [5] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from northern China[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 366: 1-10.
- [6] Wang L, Wang Q J, Wei S P, et al. Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2467-2477.
- [7] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 143(1): 91-100.
- [8] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(4): 437-448.
- [9] Wang X C, Muhammad T N, Hao M D, et al. Sustainable recovery of soil desiccation in semi-humid region on the Loess Plateau[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(8): 1262-1270.
- [10] Fan J, Gao Y, Wang Q J, et al. Mulching effects on water storage in soil and its depletion by alfalfa in the Loess Plateau of northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2014, 138(22): 10-16.
- [11] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Large-scale spatial variability of dried soil layers and related factors across the entire Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2010, 159(1): 99-108.
- [12] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, et al. Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors[J]. Hydrological Sciences Journal, 2012, 57(2): 265-281.
- [13] 万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1045-1051.
- [14] 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.
- [15] 王志强, 刘宝元, 路炳军. 黄土高原半干旱区土壤干层水分恢复研究[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1944-1950.
- [16] 刘沛松, 贾志宽, 李军, 等. 宁南山区紫花苜蓿土壤干层水分动态及粮草轮作恢复效应[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 183-191.
- [17] 石建华, 喻理飞, 孙保平. 陕北地区退耕还林生态健康评价分析研究: 以吴起县为例[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 332-336.
- [18] Zhang B, Wang D. Exploration of eco-economic development in ecological fragile region: A case study on Wuqi County in Shaanxi Province[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(7): 1524-1531.
- [19] 卢纪元, 朱清科, 陈文思, 等. 陕北黄土区植被特征对坡面微地形的响应[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(1): 53-60.
- [20] 伍玉容, 王洁, 郭建英, 等. 黄土丘陵植被恢复区不同植被类型对土壤物理性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 96-98.
- [21] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [22] Fan J, Shao M A, Wang Q J, et al. Toward sustainable soil and water resources use in China's highly erodible semi-arid Loess Plateau[J]. Geoderma, 2010, 155(1/2): 93-100.
- [23] Li J, Chen B, Li X F, et al. Effects of deep soil desiccation on artificial forestlands in different vegetation zones on the Loess Plateau of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [24] 穆兴民, 徐学选, 陈霖巍. 黄土高原生态水文研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [25] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响[J]. 林业科学, 2010, 46(12): 1-7.
- [26] 卢建利, 陈云明, 张亚莉, 等. 黄土丘陵半干旱区沙棘生长对土壤水分及养分的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 137-145.
- [27] Yao X L, Fu B J, Lü Y H, et al. The multi-scale spatial variance of soil moisture in the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(5): 694-703.
- [28] 常译方, 毕华兴, 许华森, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 227-232.
- [29] 莫保儒, 王子婷, 蔡国军, 等. 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[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1207-1215.
- [30] 程积民, 王惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [31] 梁海斌. 晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤水分特征研究[D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [32] 吕文强, 王立, 党宏忠, 等. 黄土高原坡面带状植被土壤水分有效性的空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 233-240.