

# 退耕还林(草)对黄土高原不同土地利用方式下 土壤剖面水分含量的影响

史君怡<sup>1</sup>, 王国梁<sup>1,2</sup>, 刘国彬<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为了评估退耕还林(草)工程对黄土高原坡耕地土壤剖面水分含量变化的影响,通过整合分析研究了退耕还林(草)工程中,不同土地利用方式对土壤水分含量的影响。结果表明:退耕还林(草)使草原区和森林草原区土壤含水量显著降低,且随深度增加土壤水分含量呈下降趋势;而森林区土壤含水量未发生显著变化,且随深度增加,土壤含水量先增大再减小;退耕还林(草)导致 3 个分区中森林草原区土壤水分亏缺最严重。因此,干旱半干旱区进行植被恢复应依据当地自然条件和树种特性,选择合适植被恢复模式。

**关键词:**黄土高原;退耕还林(草)工程;土壤含水量;土地利用方式

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0081-06

## Effect of Graining for Green on Water Content of Soil Profile Under Different Land Use Patterns in the Loess Plateau

SHI Junyi<sup>1</sup>, WANG Guoliang<sup>1,2</sup>, LIU Guobin<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

**Abstract:** In order to evaluate the slope land soil profile water changes in the Loess Plateau owing to returning farmland to forest (grass) project, the effects of different regions and different land use patterns on water content of different soil profiles in the project of returning farmland to forest (grass) through integration analysis was investigated. The results showed that the soil water content in the steppe and forest steppe zone decreased significantly, and the soil water content decreased with the increase of soil depth; while soil moisture content of the forest zone did not change significantly, and it increased first and then decreased with the increases of soil depth; the soil moisture deficit in forest steppe zone was the most serious among the three zones due to the conversion of returning farmland to forest (grass) project. Therefore, vegetation restoration in arid and semi-arid areas should select the appropriate vegetation recovery mode based on the local natural conditions and species characteristics of vegetation.

**Keywords:** the Loess Plateau; returning farmland to forest and grassland project; soil moisture; land use pattern

生态恢复是全球面临的一个重要的环境问题,植被恢复与重建是人类治理退化生态系统的重要手段和内容<sup>[1]</sup>,而土壤水分是干旱、半干旱地区植被建设及恢复的重要生态限制因素<sup>[2-3]</sup>。日本的宫胁昭早在 20 世纪 70 年代就在城市中进行环境保护林重建研究<sup>[4]</sup>;美国在罗斯福当政期间便实施了“绿腰带”工程;二战后,苏联则提出了规模超过美国的“改造大自

然计划”;我国政府则自 1995 年起在黄土区实施了很多重要的林业生态工程,开展了黄土区生态环境改善和植被恢复工作<sup>[5]</sup>。随着退耕还林(草)政策的实施,黄土高原地区植被总盖度至 2005 年已达 42.2%<sup>[5]</sup>。但受限于营造初期的林业科学认知水平和对土壤水分这一“箍桶”效应中的短板,在防护林营造和退耕还林还草工程建设过程中没有充分考虑到黄土区水土

资源的特点,在黄土区形成了较大面积的小老树林和生产能力差的人工林,对植被修复和土壤水分环境产生了负面影响<sup>[3,6-7]</sup>。

植物生长与土壤水分关系严重失调,使多年生人工林草地出现了土壤旱化,甚至当土壤含水量降低到一定程度时,形成土壤干层<sup>[8]</sup>。人工林流域土壤基流减少或消失等典型现象,显示了目前黄土区植被与土壤水分的“紧张关系”<sup>[3]</sup>。黄土高原土地资源利用方式呈现多种结构,不同土地利用类型的土壤含水量和空间变异情况有显著差异<sup>[9-10]</sup>,充分认识各种土地利用条件下土壤的水分状况及其变化规律是有效利用土地资源的前提<sup>[11]</sup>。

虽然针对干旱半干旱地区植被建设对土壤水分影响相关研究并不少见,然而研究结果仍不尽一致,且均为小范围研究,由于数量限制、研究本身的偶然性等原因,很难客观评价区域植被恢复,尤其是大面积生态恢复的水文效应,存在较大随机性而缺少整合分析<sup>[12]</sup>。Meta 分析为解决该问题提供了可靠方法。本文以黄土高原为研究对象,通过系统搜集相关文献,研究退耕还林(草)工程下不同土地利用方式对土壤水分的影响,旨在为干旱半干旱地区土地合理利用和生态环境建设与发展提供科学依据。

1 研究区概况

黄土高原指黄河中上游主要被黄土所覆盖的地区,位于北纬 33°41′—41°16′,东经 100°52′—114°33′。该区属大陆性季风气候,多年平均降雨量为

200~700 mm,总的趋势是从东南向西北递减。东南部为半湿润区,年降雨量 600~800 mm,年均气温 8~14℃,干燥指数 1.0~1.5;中部为半干旱区,年降水量 400~600 mm,年均温 4~12℃,干燥指数 1.5~2.0;西北部为干旱区,年降水量 100~300 mm,年均温 2~8℃,干燥指数 2.0~6.0。植被自东南向西北依次分布着暖温带落叶阔叶林带的南部亚地带和北部亚地带,与温带草原地带的森林草原、典型草原和荒漠草原 3 个亚地带<sup>[13]</sup>。黄土高原土壤在地域上呈现出地带性分布规律由东南向西北依次出现褐色土→黑垆土、黄绵土、灰钙土→栗钙土→棕钙土→棕漠土→风沙土等。

2000 年,国家启动了退耕还林(草)工程,即将坡度>25°坡耕地退耕还林(草)。部分耕地上进行了造林种草,部分退耕地进行了封育恢复。

2 文献来源与研究方法

Meta 分析是一种较高一级逻辑形式上的定量综合研究方法<sup>[14]</sup>。20 世纪 90 年代后,Meta 分析被引入生态学领域的研究,并得到高度的重视和长足的发展<sup>[15]</sup>。

本文主要采用 Meta 分析和 SPSS 分析相结合的方法,对前人发表的相关独立研究结果进行定量合并分析。文献主要来源有:维普中文科技期刊、中国学术期刊全文数据库、万方数字化期刊全文数据库、中国优秀硕士学位论文全文数据库、中国博士学位论文全文数据库、SpringerLink、SDOL、SCI 科学引文索引数据库。文献筛选条件见表 1。

表 1 文献检索标准

序号	文献筛选标准
1	研究区域为中国黄土高原地区
2	文献数据资料中对照组为坡耕地,试验组为草地(荒草地)、灌木地、林地
3	试验是在 2000 年国家进行退耕还林(草)工程之后进行,起止年份清楚
4	文献数据为具体的数值,数据包含平均值、标准差(标准误)、样本容量、测定地点、时间、年均降雨量、测定土层厚度、分层深度、测定方法等
5	采集数据均在降雨后 10~15 d 内进行,且仅收集 6—9 月测定数据
6	重复报道的数据只选用一种
7	研究地点的地形、降雨量等自然条件基本一致

利用 Meta 分析,效应值计算公式为:

$$ES=\ln R=\ln\left(\frac{X_e}{X_c}\right)=\ln X_e-\ln X_c \quad (1)$$

式中:  $X_e$  为试验组值,表示退耕还林(草)后土壤水分含量;  $X_c$  为来自于同一文献中与  $X_e$  对应的对照组值,表示农耕地土壤含水量。合并分析效应值前,采用卡方检验法进行异质性检验。经检验,本文选用固定模型进行结合效应值计算。计算后,若合并效应量的 95% 置信区间包含 0,则表明效应合并量与 0 的差异无统计学

意义,即试验组与对照组差异无统计学意义;否则,则表明效应合并量与 0 的差异有统计学意义,即试验组与对照组间差异有统计学意义。若结合效应值>0,则植被建设对土壤水分含量有增加效应;结合效应值<0,则植被建设对土壤水分有降低效应<sup>[12]</sup>。

通过严格筛选,本项研究共搜集到黄土高原地区 62 篇符合上述条件的文献作为再分析和研究的对象。其中草原区 15 篇、森林草原区 33 篇、森林区 18 篇(其中有两篇文献此 3 个区都有研究)(图 1)。

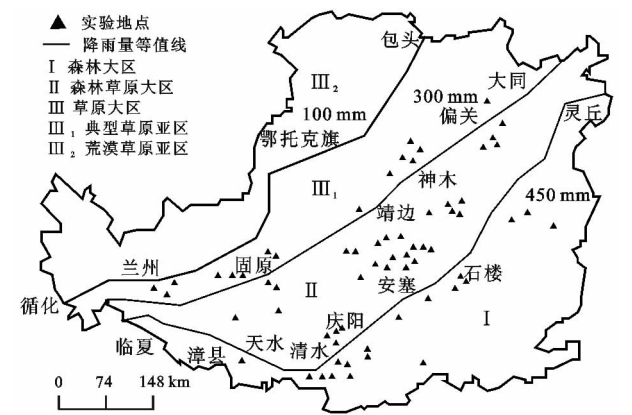


图 1 黄土高原分区与研究样点分布

3 黄土高原区划

根据李锐等<sup>[13]</sup>的植被区划分界线,将该区划分为草原大区、森林草原大区和森林大区(图 1),并将草原区划分为典型草原亚区和荒漠草原亚区。森林—森林草原分界线:位于黄土高原东南部,东起山西省灵丘,南下紫金山,向西南过黄河,南沿清水、天水,向西北过彰县,抵达曲界一线以南地区;森林草原—草原分界线:东起山西大同南部,经偏关、河曲至陕西北端,西至甘肃陇中止于循化;典型草原亚区和荒漠草原亚区分界线:北起内蒙古包头市,沿西南行经库布齐沙漠东南部和鄂托克旗,止于兰州及以西区界。本文草原区只研究典型草原亚区,不涉及荒漠草原亚区。根据 3 个分区的降雨量、气温、蒸发量、干燥度指数等数据,3 个分区分布对应于干旱、半干旱、半湿润区。

4 结果与分析

根据植被根系分布特征和降雨对土壤含水量影响深度特征,将坡耕地退耕为草地分 0—20,20—40,40 cm 以下 3 个层次;退耕为灌木林分 0—20,20—40,40—60,60 cm 以下 4 个层次;退耕为乔木林分 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100 cm 以下 6 个层次。

4.1 典型草原亚区退耕还林(草)对土壤水分的影响

典型草原亚区坡耕地退耕为草地,原坡耕地平均含水量为 11.97%,转变为草地后为 10.82%,显著降低 9.64%。随土层深度增加,原坡耕地和退耕草地土壤含水量均呈降低趋势;其中 0—20,20—40 cm 土壤含水量无显著变化,但 40 cm 以下土层土壤水分显著降低 17.23%,和原坡耕地对应土层相比,随土层深度增加,土壤含水量降低效应增大。

坡耕地退耕为灌木地,原坡耕地平均含水量为 11.97%,转变为灌木地后为 10.66%,显著降低 14.67%。随土层深度增加,原坡耕地和退耕灌木地土壤含水量呈降低趋势;其中 0—20,20—40,40—60 cm 土壤含水量无显著变化,但 60 cm 以下土壤水分显著降低 31.19%,与原坡耕地对应土层相比,60 cm 以下土壤含水量降低效应最大,40—60 cm 降低效应最小。

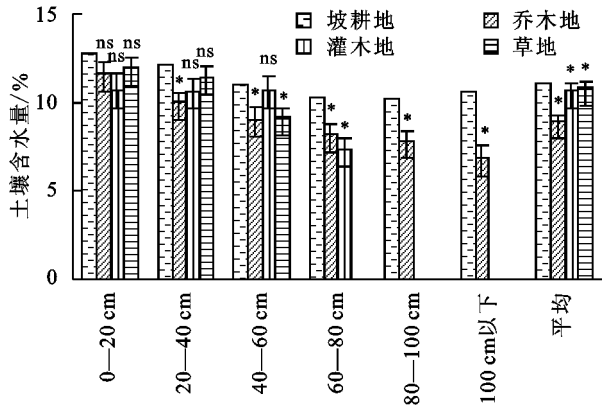
坡耕地退耕为乔木地,原坡耕地平均含水量为 11.10%,转变为乔木地后为 8.97%,显著降低 19.20%。随土层深度增加,乔木地土壤含水量呈减小趋势;其中 0—20 cm 土层土壤含水量无显著变化,但 20—40,40—60,60—80,80—100,100 cm 以下各层土壤水分显著降低 15.65%,18.09%,19.94%,23.09%,35.35%,与原坡耕地对应土层相比,随土层深度增加,土壤含水量的降低效应呈增加趋势。

由上可知,退耕还林使得该区土壤含水量总体均显著下降,且建设为乔木林下降幅度最大,而建设为草地下降幅度最小,和胡江波<sup>[16]</sup>、马祥华<sup>[17]</sup>等研究一致,该区年降雨量小,气候干燥,降雨对土壤水分补充困难,因而该区植被生长适宜性为:草地>灌木>乔木,草原区不宜建设乔木、灌木林,以恢复小耗水量草本为主。同坡耕地相比,人工林、草地虽减小土壤蒸发和地表径流,但增加了植被蒸腾和截留蒸发,总耗水量增加,土壤含水量降低,加剧土壤干燥化<sup>[18]</sup>,黄土高原土壤水分含量为降低型<sup>[19]</sup>,农地土壤含水量较高<sup>[20]</sup>,退耕后生物量变大,地表结皮增加,入渗减少,土壤含水量降低。

表 2 典型草原亚区退耕还林(草)对土壤水分影响的基本特征

土层 深度/cm	草地					灌木地					乔木地				
	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限
0—20	15	3.13	-0.12	-0.43	0.19	6	5.45	-0.66	-1.41	0.10	11	3.26	-0.40	-0.96	0.17
20—40	14	3.39	-0.21	-0.51	0.10	7	3.69	-0.62	-1.29	0.05	11	1.97	-0.69	-1.22	-0.16
40—60	18	2.61	-0.40	-0.71	-0.09	7	4.28	-0.45	-1.12	0.23	8	3.30	-0.78	-1.34	-0.22
60—80	—	—	—	—	—	7	3.03	-1.21	-1.92	-0.51	7	2.63	-0.79	-1.34	-0.24
80—100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	2.47	-0.86	-1.40	-0.31
100 以下	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14	3.12	-1.14	-1.78	-0.49
总体	47	3.00	-0.24	-0.42	-0.07	27	4.31	-0.57	-0.97	-0.17	62	2.79	-0.76	-0.99	-0.53

注:S 为标准差,D 是各个研究效应的加权平均,Du 是 95%置信区间上限,DI 是 95%置信区间下限,下表同。



注: \* 为土壤水分变化效应显著, ns 为不显著, 下同。

图2 典型草原区坡耕地退耕为乔、灌木、草土壤剖面水分变化

#### 4.2 森林草原区退耕还林(草)对土壤水分的影响

森林草原区坡耕地退耕为草地,原坡耕地平均含水量为 12.83%,转变为草地后为 9.28%,显著降低 27.69%。随土层深度增加,退耕草地土壤含水量均呈降低趋势;其中 0—20,20—40,40 cm 以下各层土壤水分分别显著降低 20.96%,26.78%,34.50%;和原坡耕地对应土层相比,随土层深度增加,土壤含水

表3 森林草原区退耕还林(草)对土壤水分影响的基本特征

土层 深度/cm	草地					灌木地					乔林地				
	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限
0—20	13	2.47	-0.85	-1.41	-0.30	15	3.08	-0.43	-0.76	-0.10	13	3.16	-0.49	-0.83	-0.15
20—40	14	2.89	-1.25	-1.70	-0.81	16	3.02	-1.03	-1.34	-0.72	14	3.19	-1.13	-1.45	-0.81
40—60	22	2.96	-1.64	-2.10	-1.18	16	2.86	-1.55	-1.87	-1.22	14	3.09	-1.36	-1.69	-1.03
60—80	—	—	—	—	—	16	2.77	-1.56	-1.88	-1.24	14	3.46	-1.36	-1.69	-1.03
80—100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13	3.25	-1.24	-1.58	-0.90
100 以下	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	3.31	-2.07	-2.55	-1.58
总体	49	2.81	-1.29	-1.57	-1.02	63	3.14	-1.15	-1.31	-0.99	79	3.26	-1.20	-1.35	-1.06

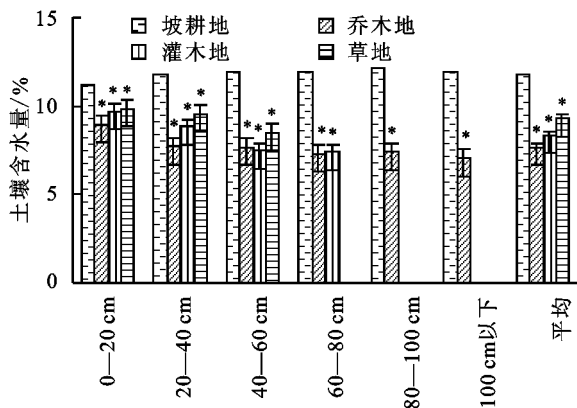


图3 森林草原区坡耕地退耕为乔、灌木、草土壤剖面水分变化

#### 4.3 森林区退耕还林(草)对土壤水分的影响

森林区坡耕地退耕为草地,原坡耕地平均含水量为 16.12%,转变为草地后为 16.06%,土壤含水量无显著变化。其 0—20,20—40,40 cm 以下土壤水分均

量降低效应增大。

坡耕地退耕为灌木地,原坡耕地平均含水量为 11.80%,转变为灌木地后为 8.32%,显著降低 29.45%。随土层深度增加,退耕灌木地土壤含水量均呈降低趋势;其中 0—20,20—40,40—60,60 cm 以下土壤水分分别显著降低 13.46%,25.30%,38.16%,38.72%;和原坡耕地对应土层相比,随土层深度增加,土壤含水量降低效应增大。

坡耕地退耕为乔林地,原坡耕地平均含水量为 11.80%,转变为乔林地后为 7.68%,显著降低 34.93%。其中 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100 cm 以下土壤水分分别显著降低 19.98%,34.58%,35.56%,38.92%,39.04%,41.08%;和原坡耕地对应土层相比,随土层深度增加,土壤含水量整体降低效应增大。

由上可知,退耕还林(草)使该区土壤水分总体呈降低趋势且建设为乔木林下降幅度最大。该区不宜大面积恢复乔木林,可在沟道、阴坡下部等恢复乔木林,以营造草灌混交林为主。

无显著变化;和原坡耕地对应土层相比,40 cm 以下土壤含水量降低效应最大,0—20 cm 土壤含水量呈增加效应。

坡耕地退耕为灌木地,原坡耕地平均含水量为 15.80%,转变为草地后为 14.79%,土壤含水量无显著变化。其中 0—20,20—40,40—60,60 cm 以下土壤水分均无显著变化;和原坡耕地对应土层相比,20—40 cm 土壤含水量降低效应最大,40—60 cm 土壤含水量降低效应最小。

坡耕地退耕为乔林地,原坡耕地平均含水量为 16.67%,转变为草地后为 17.54%,土壤含水量无显著变化。其中 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100 cm 以下各土层土壤含水量均无显著变化;和原坡耕地对应土层相比,0—20 cm 土壤含水量呈降低效应,其余各层均增加,且 80—100 cm 增加效应最明显。

由上可知,退耕还林(草)对该区土壤水分未发生显著影响,可满足乔灌草植被生长,因此该区可营造乔灌草复合型植被。加以考虑植被气候分区,水分不是该区植被恢复的限制因素,森林具有更好的水源涵

养和固持水土功能,因而最好恢复为森林,但鉴于黄土高原地区蒸发量远远高于降雨量的气候特点,应选择低耗水树种且造林密度不宜过大,使得土壤水分实现良性循环利用。

表 4 森林区退耕还林(草)对土壤水分影响的基本特征

土层 深度/cm	草地					灌木地					乔木地				
	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限	样本数	S	D	Du 上限	DI 下限
0—20	8	4.55	0.05	−0.56	0.66	10	4.41	−0.40	−1.06	0.25	15	0.95	−0.01	−0.57	0.56
20—40	7	2.68	−0.09	−0.67	0.48	7	2.21	−0.46	−1.07	0.15	12	2.09	0.20	−0.41	0.82
40—60	11	4.12	−0.22	−0.81	0.37	6	1.99	−0.10	−0.71	0.50	12	3.33	0.14	−0.49	0.76
60—80	—	—	—	—	—	10	3.08	0.20	−0.52	0.91	11	5.51	0.17	−0.59	0.94
80—100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11	5.83	0.38	−0.41	1.16
100 以下	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15	3.80	0.11	−0.88	1.09
总体	26	3.64	−0.09	−0.43	0.25	33	3.15	−0.22	−0.54	0.11	67	3.42	0.15	−0.13	0.43

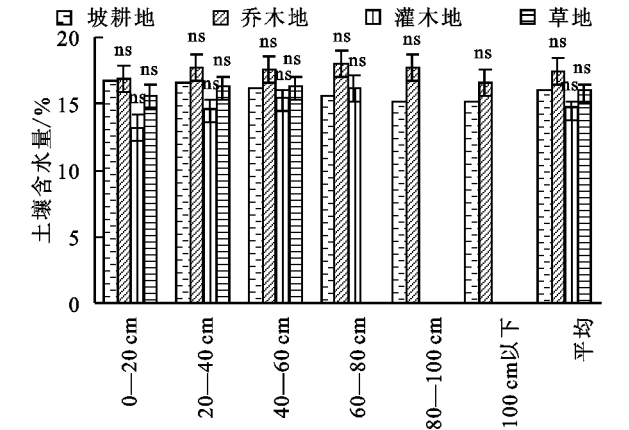


图 4 森林区坡耕地退耕为乔、灌、草土壤剖面水分变化

4.4 退耕还林(草)对不同分区和不同土地利用方式下土壤水分的影响

土地的不同利用方式会改变土壤性质和植被对地表的覆盖,从而影响土壤含水量<sup>[20]</sup>。草原区和森林草原区,草地和乔木地土壤含水量具有显著差异,而森林区灌木地和乔木地具有显著差异(表 5),这可能是由于草原区和森林草原区降雨量小蒸发量大,乔木大量蒸腾耗水,消耗土壤水分;森林区,降雨量足够乔木生长且其充分发挥了截留降水、涵养水源作用,而灌木相较草本蒸腾量大,相较乔木又保持水分效应差,因而其消耗土壤水分最大。

表 5 不同土地利用方式土壤水分差异比较

分区	土地利用方式		
	草地和灌木地	灌木地和乔木地	草地和乔木地
草原区	a	ab	b
森林草原区	a	ab	b
森林区	ab	b	a

注:表中字母不同代表差异性显著,字母相同代表差异性不显著。

表 6 不同分区土壤水分差异比较

草原区和 森林草原区	森林草原区 和森林区	草原区和 森林区
a	b	c

注:表中字母不同代表差异性显著,字母相同代表差异性不显著。

5 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 在草原区和森林草原区,随深度增加土壤含水量呈下降趋势,这和尹光彩<sup>[21]</sup>、王孟本<sup>[22]</sup>等研究结果一致,这可能是由于随着自然群落的演替和发育,枯枝落叶或腐殖质增多,改良了表面土壤,蓄水能力加强,表层水分得到恢复<sup>[23]</sup>;但是森林区研究结果与此相反,地表土壤含水量相对较低,后呈增加趋势,这和宋娟丽<sup>[24]</sup>等对黄土高原南部刺槐林的研究结果一致。在不同分区,出现这种差异,可能是由于气候条件和土壤导致的。土壤颜色越深,吸收热量越多,温度越高,蒸发量越大<sup>[25]</sup>,根据有关参考资料,黄土、棕土和黑土的蒸发量分别比白土大 7%,19%和 32%<sup>[26]</sup>。根据前文所叙述的区划信息,森林区以褐色土和黑垆土为主,蒸发量大,导致地表土壤含水量低。

(2) 本文研究 3 个分区均为乔木林 100 cm 以下深度的土壤含水量值最低、波动范围最小,这和余雷等<sup>[25]</sup>研究结果一致。这可能是由于随着群落演替,植物大部分是深根系,通过吸收更深层的水分来维持生长,深层土壤水分逐渐消耗<sup>[23]</sup>,造成土壤干燥化程度加深,而该区小量降雨无法补充深层水分亏缺,长此以往,可能导致土壤干层的出现<sup>[27]</sup>。

(3) 本研究的 3 个分区,森林草原区土壤含水量最小且 3 个分区相互之间土壤含水量均有显著差异,这和张哲等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。植被恢复导致土壤

水分变化与地域紧密相关,退耕还林(草)在不同分区恢复植被类型不同,且造成土壤水分变化不同,湿润地区退耕还林(草)反而可能增加土壤水分。

## 5.2 结论

(1) 草原区不宜建设乔木、灌木林,以恢复小耗水量草本为主。森林草原区不宜大面积恢复乔木林,可在沟道、阴坡下部等恢复乔木林,以营造草灌混交林为主。森林区可营造乔灌草复合型植被,最好恢复为森林,但应选择低耗水树种且造林密度不宜过大,使得土壤水分实现良性循环利用。

(2) 3个分区均为乔木林 100 cm 以下深度的土壤含水量值最低、波动范围最小,森林草原区土壤含水量最小且 3 个分区相互之间土壤含水量均有显著差异。

在进行植被恢复、林地建设工程时,应根据气候和土壤因地制宜选择适生植物,不可一味求林,做到适地适树,合理发展;同时,注意涵养水源,实施好水土保持措施,提高水分利用效率。

## 参考文献:

- [1] 张健,刘国彬. 黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 207-217.
- [2] 何修道. 科尔沁沙地樟子松人工林土壤水分动态变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [3] 王舒. 晋西黄土区不同尺度土壤水分分布及其对降雨的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [4] Miyawaki A, Fujiwara K, Okuda S. The status of nature and re-creation of green environment in Japan[M]// Vegetation Ecology and Creation of New Environment. Kawagana, Japan: Tokai University Press, 1987.
- [5] 张晓烨,陈军,赵耀. 退耕还林对陕北地区生态环境的影响[J]. 北京农业, 2011(9): 48-51.
- [6] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: Relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert[J]. Science China: Life Sciences, 2014, 57(5): 539-548.
- [7] 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [8] 刘赛可. 黄土高原半干旱区人工柠条林地土壤水分的动态变化模型[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [9] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土丘陵区土地利用与土壤水分的时空关系[J]. 自然资源学报, 2001, 16(6): 521-524.
- [10] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 715-720.
- [11] Wang L, Zhang Q, Niu X W, et al. Effects of different land-uses on soil physical and chemical properties in the Loess Plateau of Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(4): 53-56.
- [12] 李刚,刘立超,高艳红,等. 基于 Meta 分析的中国北方植被建设对土壤水分的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2462-2470.
- [13] 李锐,杨文治,李壁成,等. 中国黄土高原研究与展望[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [14] 程新,黄林,李昆太. Meta 分析: 一种新的文献综述方法[J]. 广东农业科学, 2010, 37(6): 376-378.
- [15] 郭明,李新. Meta 分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 911-919.
- [16] 胡江波,杨改河,贺桂芹,等. 不同植被恢复模式土壤水分生态效应研究[J]. 中国水土保持, 2007, 2007(10): 29-31.
- [17] 马祥华,焦菊英,温仲明,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 17-21.
- [18] 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.
- [19] 杨新民. 黄土高原灌木林地水分环境特性研究[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 8-13.
- [20] 杨永东,张建生,蔡国军,等. 黄土高原丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分动态变化[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 149-151.
- [21] 尹光彩,周国逸,唐旭利,等. 鼎湖山不同演替阶段的森林土壤水分动态[J]. 吉林大学学报, 2003, 24(3): 62-68.
- [22] 王孟本,李洪建. 林分立地和林种对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 43-46.
- [23] 刘海威,张少康,焦峰. 黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分效应[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 31-39.
- [24] 宋娟丽,姚军,吴发启. 黄土高原南部刺槐林地的土壤水分变化规律研究[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(1): 47-50.
- [25] 余雷,张一平,沙丽清,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林土壤含水量变化规律及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 332-336.
- [26] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003(2): 26-29.
- [27] 郭军权,卜耀军,张广军. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤水分研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(4): 1-4.
- [28] 张哲,焦峰,梁宁霞,等. 延河流域不同植被带土地利用方式的土壤水分分析评价[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 74-77.