

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

王 力^{1,2,*}, 卫三平^{1,2,3}, 吴发启¹

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 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; 3. 山西省吕梁市水利局, 山西 离石 033001)

摘要: 调查了黄土丘陵沟壑区燕沟流域刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 林地、辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 林地、荒草地、农地等不同植被类型条件下 7 种地类的土壤水分环境, 分析不同植被类型对水分环境的生长响应。结果认为, 各地类均存在一定程度的水分亏缺, 亏缺量由大到小依次为: 阳坡刺槐林地 991.57mm、阳坡荒草地 941.21mm、阴坡刺槐林地 866.53mm、阳坡辽东栎林地 815.89mm、阴坡荒草地 790.27mm、阴坡辽东栎林地 745.20mm、农地 325.55mm。土壤水分的交换深度农地达 320cm, 阴坡荒草地为 240cm, 阴坡辽东栎林地 200cm, 阴坡刺槐林地和阳坡辽东栎林地均为 160cm, 阳坡荒草地为 140cm, 阳坡刺槐林地 120cm。试验期间, 林地、荒草地和农地分别约有 10%、14%、30% 的降水储存于土壤中, 林地、荒草地 600cm 深土壤水库可利用水量 62.6~309.0mm, 与农地 728.6mm 相比土壤水库的调节能力很有限。受林木耗水量和土壤供水能力的双重影响, 阳坡刺槐林枯梢现象严重, 有整株枯死林木; 阴坡刺槐林有明显的枯梢, 但没有整株枯死的林木; 辽东栎林也存在枯梢现象, 但较刺槐林轻微, 林木生长仍然十分旺盛。人工林地植被较高的截留和蒸腾耗水是造成土壤干燥化的主要原因, 在植被建设中应遵循区域植被的演替规律, 以水定植, 尽量选择低耗水的适生乡土树种, 采取自然修复为主、人工栽植为辅的措施, 同时实施好水土保持措施。黄土丘陵区天然辽东栎林是当地植被演替的顶级群落, 林地土壤的干燥化是黄土高原气候整体趋于旱化造成的, 并不是人为干扰导致植被过度耗水造成的, 这种土壤干燥化不宜归属于干层的范畴。判别土壤干层应以当地稳定天然植被群落的生物量水平和土壤水分状况为基准。

关键词: 黄土丘陵沟壑区; 土壤水分环境; 土壤水库; 土壤干化; 植被生长响应

文章编号: 1000-0933(2009)03-1543-11 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Soil water environment and vegetation growth in the hilly and gully region of the Loess Plateau: a case study of Yangou Catchment

WANG Li^{1,2,*}, WEI San-Ping^{1,2,3}, WU Fa-Qi¹

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China

3 Bureau of Water Conservancy in Liliang City, Lishi 033001, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1543 ~ 1553.

Abstract: Soil water environments were surveyed in acacia woodland, *Quercus liaotungensis* woodland, grassland and farmland in the Yangou Catchment of the hilly and gully region of the Loess Plateau, and vegetation growth feedback on soil water conditions was discussed. We found that soil water deficits decreased in the order: acacia woodland on south-facing slopes (991.57 mm), grassland on south-facing slopes (941.21 mm), acacia woodland on north-facing slopes (866.53 mm), *Quercus liaotungensis* woodland on south-facing slopes (815.89 mm), grassland on north-facing slopes (790.27 mm), *Quercus liaotungensis* woodland on north-facing slopes (745.20 mm), and farmland (325.55 mm). The exchange depths of soil water decreased in the order: farmland and grassland on north-facing slopes (320 cm), *Quercus liaotungensis*

基金项目: 西北农林科技大学 2007 青年学术骨干支持计划资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (40501031, 90502006)

收稿日期: 2008-08-06; **修订日期:** 2008-12-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn

woodland on north-facing slopes (240 cm), acacia woodland on north-facing slopes (200 cm), *Quercus liaotungensis* woodland on south-facing slopes (160 cm), grassland on south-facing slopes (140 cm), and acacia woodland on south-facing slopes (120 cm). During the experimental period, about 10% of precipitation was stored in woodland soil, about 14% was stored in grassland soil, and about 30% was stored in farmland. The available water in the 600 cm deep soil reservoir in woodland and grassland was only 62.63–309.00 mm, much less than that present in farmland, which was 728.65 mm, and thus the soil reservoirs in woodland and grassland had less regulative capacity than that in farmland. As a consequence of both the water consumption by vegetation and the limited water supply from the soil, the proportion of tree branches dying appeared to be serious, even resulting in some entire trees dying, in acacia woodland on south-facing slopes. There were also dying branches in acacia woodland on north-facing slopes, but no entirely dead trees. There were few dying branches in *Quercus liaotungensis* woodland, but overall the trees grew exuberantly. Higher rainfall interception and transpiration rates were the main causes leading to soil desiccation in artificial woodland. Therefore, native tree species that consume less water should be selected according to local natural vegetation succession and measures used to restore vegetation under natural conditions should be the main focus, while artificial planting should be supplemental, in the establishment of vegetation in the hilly region of the Loess Plateau. *Quercus liaotungensis* in the hilly region is the climax community and it was the overall drought climate on the Loess Plateau that led to its soil desiccation rather than excessive soil water consumption by the vegetation, and thus it is not suitable to simply ascribe soil desiccation to dried soil layers. Distinguishing dried soil layers should be based on the biomass and soil water content of local, stable, natural vegetation communities.

Key Words: loess hilly and gully region; soil water environment; soil reservoir; soil desiccation; feedback of vegetation growth

土壤水分是土壤形成和发育的重要因素^[1],也是植物吸水的主要给源,直接影响植被的生长发育、结构类型、分布特点以及群落的稳定性,反之,植被对土壤水分的变化也具有适应性和反作用的特征。不同植被类型的土壤-植被-大气系统水分传输特征不同,必然造就不同的土壤水分环境。在降水量低、地表水资源匮乏的黄土高原地区,土壤水是极为宝贵而有限的水资源,是区域植被生长最主要的限制性因素,因此定量研究该区不同类型植被条件下的土壤水分状况与植被的相互作用关系,探讨土壤水分严重亏损的成因,对区域植被恢复与重建、实现生态环境的良性循环具有重要意义。本文选择陕北黄土丘陵沟壑区天然辽东栎林、人工刺槐林、荒草地、农地 4 种主要植被类型为研究对象,研究不同类型植被覆盖条件下土壤水分环境以及植被生长的响应,分析植被生长和土壤水分消长的互动规律以及植被的耗水量,揭示土壤干化成因,旨在为黄土丘陵沟壑区乃至类似地区林草植被建设提供科学依据。

1 研究地概况

试验地选在陕北延安市南部的燕沟流域。流域总面积 46.88 km²,位于 N36°28′~36°32′,E109°20′~109°35′,属黄土高原丘陵沟壑区第Ⅱ副区,地形主要以黄土梁状丘陵为主,沟壑密度 4.8 km·km⁻²,土壤侵蚀模数 6 000~9 000 t·km⁻²·a⁻¹,为强度水土流失类型区。流域处于暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡带,多年平均降水量 536.61 mm(1961~2001 年平均),年平均气温 9.8℃,≥10℃积温 3 207℃,年日照时数 2 472 h,无霜期约 170 d。成土母质为黄土,土壤以黄绵土为主,占 90%以上。流域内零星残存的天然次生林覆盖率不足 10%,现有人工林主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn)、杨树(*Populus* Linn)、柠条(*Caragana microphylla* Lam),经济林主要为苹果(*Malus pumila* Mill)^[2]。

2 研究方法

2.1 标准地调查

共选择 7 种地类,分别是阳坡刺槐林、阴坡刺槐林、阳坡辽东栎林、阴坡辽东栎林、阳坡荒草地、阴坡荒草

地和农地(受条件限制农地只选择了阴坡 1 种地类)。刺槐林是该区最主要的人工植被,试验地刺槐于 1979~1980 年栽植;辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)林为该区天然植被的顶级演替群落;荒草地为天然生长的草灌植被群落。农地 2006 年种植马铃薯(*Solanum tuberosum* L.),2007 年种植谷子(*Setaria italica* L.),常规大田管理。试验从 2006 年 5 月 27 日开始至 2007 年 10 月 31 日结束。每种地类布设 2 块标准地(林地为 20 m×20 m,其他地类为 10 m×10 m),采用常规方法调查试验地基本情况(表 1)。

表 1 试验地基本情况

Table 1 The basic feature of experimental plots

地类 Land type	阳坡刺槐林 AWSS	阴坡刺槐林 AWNS	阳坡辽东栎林 QWSS	阴坡辽东栎林 QWNS	阳坡荒草地 GSS	阴坡荒草地 GNS	农地 Farmland
海拔 Elevation(m)	1195	1195	1317	1323	1195	1195	1235
坡度 Gradient(°)	34	25	21	23	34	17	24
坡向 Aspect(°)	130	70	120	320	130	70	80
纬度 Latitude	N36°30"	N36°30"	N36°28"	N36°28"	N36°30"	N36°30"	N36°30"
经度 Longitude	E109°30"	E109°30"	E109°34"	E109°34"	E109°30"	E109°30"	E109°30"
树高 Height(m)	6.91	11.85	6.07	6.83	—	—	—
胸径 DBH(cm)	10.16	14.02	18.83	21.75	—	—	—
密度(株·hm ⁻²) Density(Plant·hm ⁻²)	900	1025	931	987	—	—	25400(马铃薯) 300000(谷子)
主要植物群落 Main vegetation community	刺槐、狼牙刺、 杠柳、铁线莲、 铁杆蒿、茭蒿、 长芒草、紫苑、 委陵菜等	刺槐、黄刺梅、 杠柳、陕西莢 迷、悬钩子、 野葡萄、铁杆 蒿、茭蒿、 野菊花、隐子 草等	辽东栎、黄刺 梅、虎榛子、 丁香、山桃、 荀子、铁杆蒿、 胡枝子、苔草 等	辽东栎、黄刺 梅、虎榛子、 丁香、中华绣 线菊、小叶 锦鸡儿、荀子、 铁杆蒿、胡枝 子、苔草等	刺槐、狼牙 刺、杠柳、铁杆 蒿、茭蒿、长 芒草、 胡枝子、紫苑、 委陵菜、冰草 等	刺槐、杠柳、 悬钩子、铁杆 蒿、茭蒿、 长芒草、胡枝 子、紫苑、委陵 菜等	马铃薯(2006 年) 谷子(2007 年)

阳坡刺槐林 *Acacia woodland in south-facing slope* (AWSS); 阴坡刺槐林 *Acacia woodland in north-facing slope* (AWNS); 阳坡辽东栎林 *Q. liaotungensis woodland in south-facing slope* (QWSS); 阴坡辽东栎林 *Q. liaotungensis woodland in north-facing slope* (QWNS); 阳坡荒草地 *Grassland in south-facing slope* (GSS); 阴坡荒草地 *Grassland in north-facing slope* (GNS); 杠柳 *Periploca sepium*, 黄刺梅 *Rosa xanthina*, 悬钩子 *Rosa pungens*, 野菊花 *Flos chrysanthemi*, 中华绣线菊 *Spiraea chinensis* Maxim, 小叶锦鸡儿 *Caragana microphylla* Lam, 狼牙刺 *Sophora davidii*, 铁线莲 *Clematis heracleifolia*, 铁杆蒿 *Artemisia sacrorum*, 茭蒿 *Artemisia giraldii* Pamp., 长芒草 *Stipa bungeana* Trin., 紫苑 *Aster tataricus*, 委陵菜 *Potentilla chinensis*, 陕西莢迷 *Viburnum dilatatum*, 野葡萄 *Vitis amurensis* Rupr., 隐子草 *Cleistogenes Chinensis*, 虎榛子 *Ostryopsis davidiana* Decaisne, 丁香 *Syzygium aromaticum*, 山桃 *Prunus davidiana*, 荀子 *Cotoneaster horizontalis*, 胡枝子 *Lespedeza bicolor* Turcz., 苔草 *Carex tristachya*, 冰草 *Agropyron cristatum*

2.2 观测项目及观测方法

2.2.1 气象要素

在林外荒草地上安装 1 台美国 Davis 仪器设备公司生产的便携式小气候站(Vantage Pro Weather Station),连续观测记录气温、气压、相对湿度、风速、降水、太阳辐射,风速观测高度为 2 m,其他要素观测高度为 1.5 m。同时在阴、阳坡荒草地上各安装 1 台标准雨量筒观测降水量,用于校正小气候站降水量观测值。

2.2.2 植被生长特征

刺槐林和辽东栎林标准地,对林木每木检尺,测量林分平均胸径、树高、冠幅。试验所选林地均为成林,树高、胸径变化很缓慢,因此只在 2006 年试验期初测定 1 次。林下灌木和荒草地灌木,在标准地内每种灌木选 3 株固定标准株,每月测定 1~2 次标准株的地径、高度、冠幅,落叶后停测。林下草本和荒草地草本,在标准地内选择 3 块 1 m×1 m 的样方,分草种测量高度,计算出草本层平均高度,然后分草种收割、称重,同时取样烘干,换算出干物质重量,每月测定 1~2 次,落叶后停测。农地作物,在标准地选择 10 株固定标准株,每月测定 1~2 次标准株的高度、冠幅,落叶后停测;在作物成熟时,将 10 株标准株的地上部分和地下部分以及果实全部收割、称重,并取样烘干,换算出干物质重量。

2.2.3 土壤机械组成和容重

取各地类土壤剖面不同层次原状土样(100 cm 以上分别在 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm 土层取样,100 cm 以下视土质变化分层取样),2 次重复,在实验室用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度仪测定土壤机械组成。用环刀取各地类土壤剖面不同层次土样(取样层次同上),3 次重复,及时称量湿重,烘干至恒重后称量干重,计算容重。

2.2.4 土壤含水量

每块标准地沿顺坡方向上下部分别选 2 点,用钻头直径 5 cm 的土钻打 600 cm 深的竖洞(同时观测土质随深度的变化情况,并记录),埋设 630 cm 长铝质中子管(地表外露 30 cm 高),用 CNC-503D 型中子仪测定土壤含水量(本文土壤含水量全部用体积含水量来表示)。每月上、中、下旬测定 3 次,大于 10 mm 降雨后加测 1 次。在埋设中子管时用土钻分层取土用烘干法测定土壤含水量(用测定的容重换算为体积含水量),标定中子仪,并做出标定曲线。

2.2.5 地表径流量

在每种地类标准地内各布设 1 个径流小区,共 14 个(2 重复)。小区面积 5 m×20 m,长边顺坡修建。小区四周用 30 cm 宽的 PVC 板围起来,PVC 板埋入土中 15 cm,高出地面 15 cm,防止地表径流在小区内外的交换。小区下方安放二级径流桶收集地表径流,产流后及时测量径流量,并取样测定泥沙含量。

2.2.6 植被耗水量

植被耗水量主要由植物同化耗水、蒸腾、冠层截留蒸发、土壤蒸发 4 部分组成。本文利用 SVAT 模型模拟了 7 种地类 2006 年 5 月 27 日~2007 年 10 月 31 日的土壤蒸发、植被蒸腾、冠层截留蒸发量,模拟过程和模型详细描述见卫三平等^[3]和 Jansson 等^[4]。同化耗水仅占植被总耗水量的 0.15%~0.20%^[5],忽略不计,只考虑蒸腾、冠层截留蒸发、土壤蒸发 3 项。

3 结果分析

3.1 不同植被类型土壤水分动态

3.1.1 土壤储水量动态

试验地 0~600 cm 剖面土壤储水量动态变化见图 1。土壤机械组成的测定结果表明,各地类 100 cm 以上土壤均为砂壤土,100 cm 以下除个别层次为粘壤土外其余层次也都为砂壤土,地类间土壤质地基本一致。农地平均土壤储水量高达 1 109.65 mm,远远高于林地和荒草地。各地类土壤储水量季节变化规律一致,在 5~6 月份土壤储水最少,9~10 月份储水最多。2006 年 6~10 月份降水 345.92 mm,2007 年为 513.65 mm,分

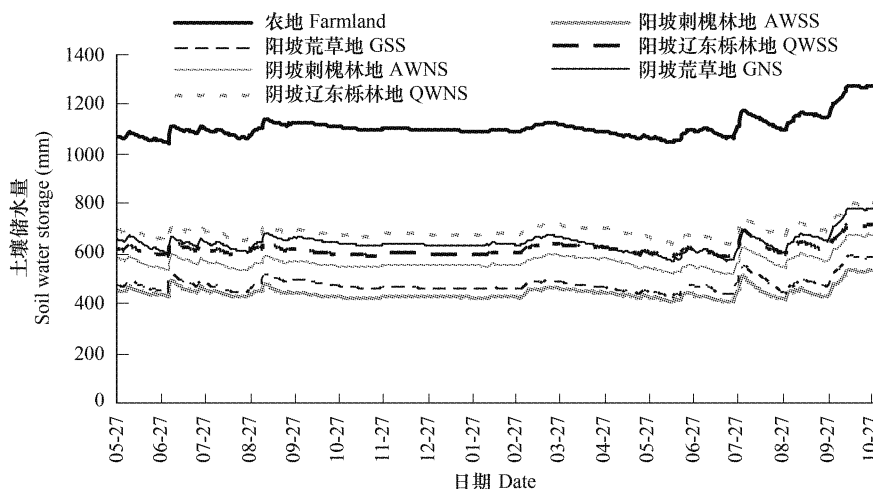


图 1 土壤储水量动态

Fig. 1 The trend of soil water storage

别为延安市同期多年平均值的 82.32% 和 122.24%, 因此 2006 年雨季后土壤储水量并没有明显的增加, 而 2007 年各地类土壤储水量都明显增加。与试验期初 2006 年 5 月 27 日土壤储水量相比, 整个试验期间农地土壤储水增加最多, 为 198.65 mm, 阴坡荒草地为 121.85 mm, 阳坡荒草地 111.46 mm, 阴坡辽东栎林地 104.13 mm, 阳坡辽东栎林地 95.70 mm, 阴坡刺槐林地 89.94 mm, 阳坡刺槐林地最少, 仅为 76.13 mm。

以田间持水量为基准, 试验地各地类土壤水分亏缺量由大到小依次为: 阳坡刺槐林地 991.57 mm、阳坡荒草地 941.21 mm、阴坡刺槐林地 866.53 mm、阳坡辽东栎林地 815.89 mm、阴坡荒草地 790.27 mm、阴坡辽东栎林地 745.20 mm、农地 325.55 mm(表 2)。

表 2 试验地土壤储水量与亏缺状况

Table 2 The soil water storage and water deficit in experimental plots

地类 Land type	土壤储水量(mm) Soil water storage	土壤水亏缺量(mm) Soil water deficit	土壤储水增量(mm) Increment of soil water
阳坡刺槐林地 AWSS	443.63	991.57	76.13
阴坡刺槐林地 AWNS	568.67	866.53	89.94
阳坡辽东栎林地 QWSS	619.31	815.89	95.70
阴坡辽东栎林地 QWNS	690.00	745.20	104.13
阳坡荒草地 GSS	493.99	941.21	111.46
阴坡荒草地 GNS	644.93	790.27	121.85
农地 Farmland	1109.65	325.55	198.65

3.1.2 土壤剖面水分分布

2006 年 5 月至 2007 年 10 月各地类平均土壤含水量见图 2。在 600 cm 深的剖面上, 农地土壤水分呈增加的趋势, 林地、荒草地随深度的变化不明显, 只是因土层物理特征的差异而出现高低起伏的变化。农地土壤含水量基本间于田间稳定湿度与田间持水量(体积含水量 23.92%^[6])之间, 其他地类的土壤含水量基本间于田间稳定湿度(体积含水量 13.39%^[6])和凋萎湿度(试验地实测平均体积含水量 6.35%)之间。农地 460 ~ 540 cm 出现黏土层, 土壤湿度很大, 高于田间持水量。阴坡荒草地、阴坡辽东栎林地、阴坡刺槐林地的土壤水分高于阳坡辽东栎林地、阳坡荒草地, 阳坡刺槐林地的土壤水分最低。300 ~ 460 cm 深土层, 阳坡刺槐林地土壤含水量低于凋萎湿度, 说明阳坡刺槐林群落过度地消耗了深层土壤水分, 而且长时间得不到补充。

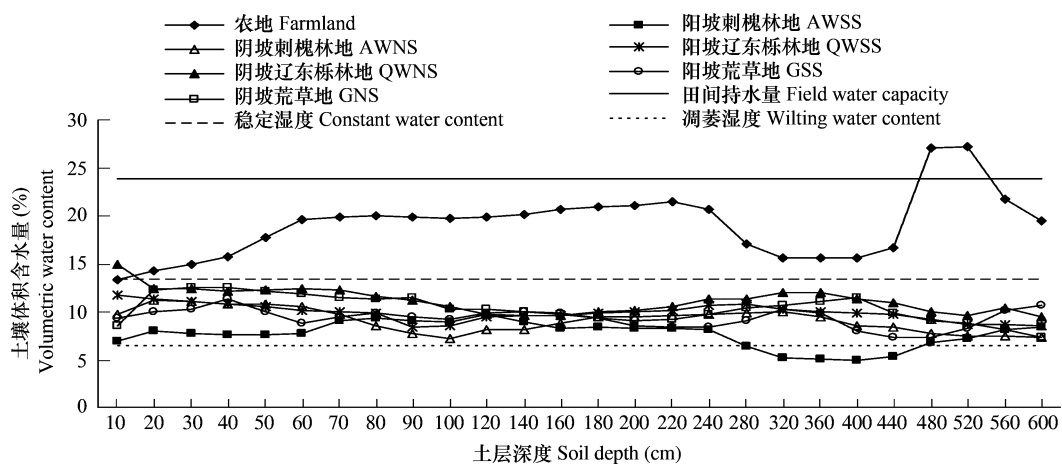


图 2 土壤剖面水分分布

Fig. 2 The distribution of soil water in soil profile

3.1.3 土壤剖面水分交换的深度

将 2006 年试验开始时(5 月 27 日)、2006 年雨季后(10 月 31 日)、试验 1 周年(2007 年 5 月 27 日)、2007

年雨季后(10月31日)的土壤剖面水分状况进行对比(图3)。

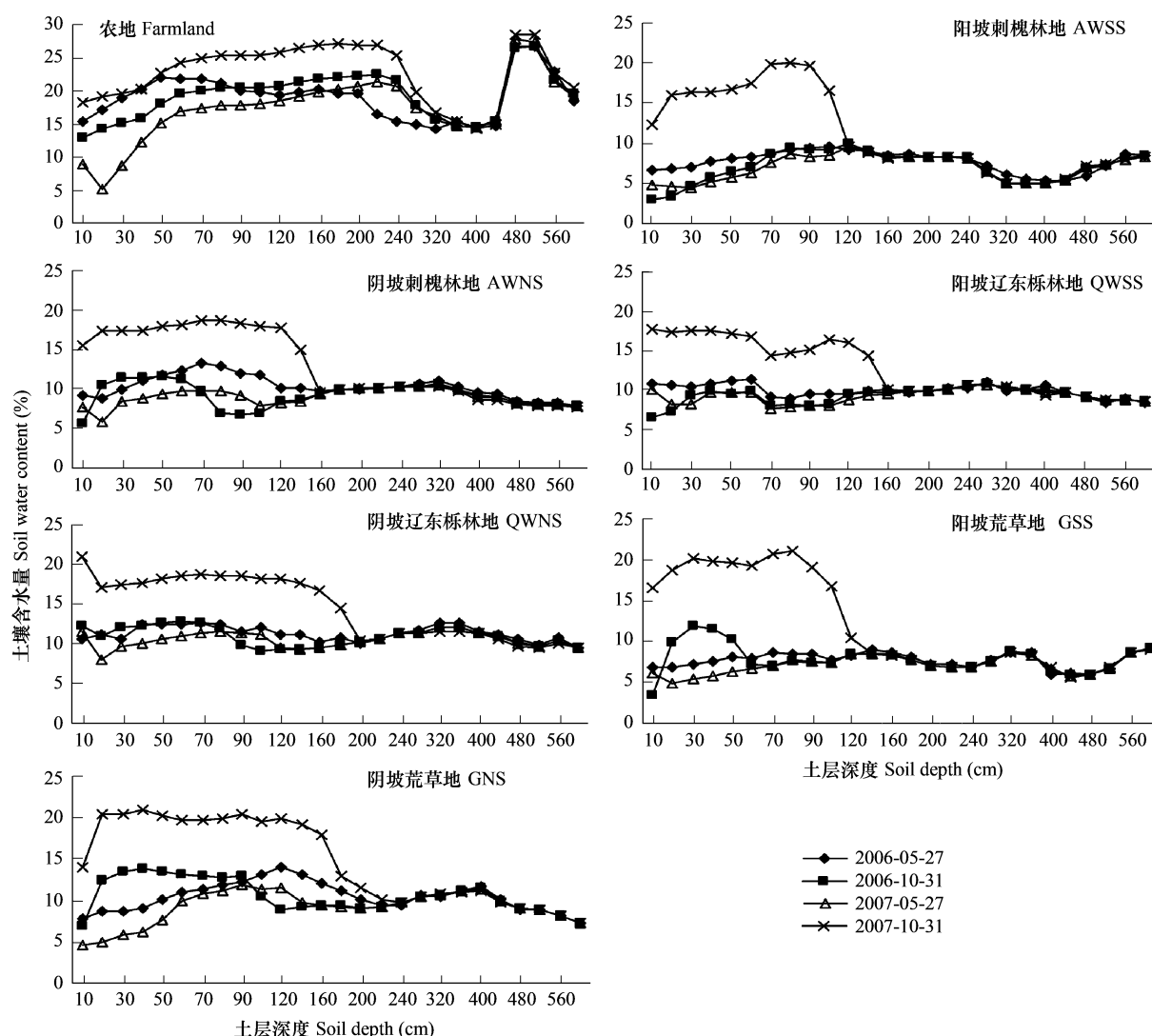


图3 土壤剖面水分入渗深度

Fig. 3 The water infiltration depth in soil profile

从图3可以很清楚地看出各地类土壤水分的交换深度:农地可达320 cm,阳坡刺槐林地120 cm,阴坡刺槐林地和阳坡辽东栎林地均为160 cm,阴坡辽东栎林地200 cm,阳坡荒草地140 cm,阴坡荒草地240 cm。黄土丘陵区气候干旱,土壤较为干燥,土壤中水分的运动通常是以水势梯度为主的非饱和水流,其流动速度取决于土壤湿度和导水性。随着土壤含水量(体积分数)的降低非饱和导水率显著下降,水分运动变得十分缓慢。农地土壤含水量显著高于林地和荒草地,土壤水分的运移较快,降水的入渗深度比林地和荒草地深80~200 cm。林地和荒草地土壤含水量较低,不仅水分运移较慢,而且降水主要被上层土壤吸收,在水分再分布过程中很快又被蒸散消耗,导致降水入渗深度变浅,降水入渗深度以下的土壤水分得不到补充、交换。当深层水分过度消耗而接近于凋萎湿度时,植被已基本不能从深层土壤获得更多的水分,只能利用降水入渗深度以上的水分,依靠当年的降水维持生长,成为一种“被动式”的生长,使植被生长量随降水丰欠而波动。

3.1.4 土壤水库调节能力

黄土深厚而多孔,其非饱和带土层并非一种简单的水循环介质,而是具有巨大容量的“土壤水库”。土壤水库中储存的水分是植物直接的水分来源,能使间歇性的不均匀降水变为向植被的连续均匀供水,并对植被

的生理需水进行调节。土壤水库还可以通过反复的充水、失水将丰水季节(年)储存在深层土壤中的水分调配到枯水季节(年)供植被利用。土壤水库的总库容相当于饱和持水量所容纳的水量。凋萎湿度以下的土壤储水,不能为植物利用,称为土壤水库的死库容。田间持水量与凋萎湿度之间土壤所含水分为有效水分,为土壤水库的有效库容。土壤水库的有效调节库容为土壤实际含水量与田间持水量之间的水分储量^[7]。2006 年 5 月至 2007 年 10 月份试验地各地类 0~600 cm 深土壤水库特征见表 3。

表 3 试验地土壤水库特征

Table 3 The soil reservoir properties in experimental plots

地类 Land type	总库容(mm) Total storage	死库容(mm) Dead storage	有效库容(mm) Usable storage	有效调节库容(mm) Effective regulation storage	可利用土壤水量(mm) Available water in soil
阳坡刺槐林地 AWSS	2956.8	381.00	1054.20	991.57	62.63
阴坡刺槐林地 AWNS	2956.8	381.00	1054.20	866.53	187.67
阳坡辽东栎林地 QWSS	2956.8	381.00	1054.20	815.89	238.31
阴坡辽东栎林地 QWNS	2956.8	381.00	1054.20	745.20	309.00
阳坡荒草地 GSS	2956.8	381.00	1054.20	941.21	112.99
阴坡荒草地 GNS	2956.8	381.00	1054.20	790.27	263.93
农地 Farmland	2956.8	381.00	1054.20	325.55	728.65

阳坡刺槐林地土壤水库的调节库容最大,达 991.57 mm,其次是阳坡荒草地、阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡荒草地和阴坡辽东栎林地,农地最小仅为 325.55 mm。林地和荒草地土壤干燥,土壤含水量低,具有很大的蓄水潜力,但这 6 种地类有效库容中土壤水的可利用量只有 62.63~309.00 mm,与农地 728.65 mm 相比,土壤水库对植被用水的调节能力很有限,抵御干旱的能力较弱。土壤水库的调节作用既要求有足够的有效库容,又要求有一定的补给水源,二者缺一不可都不能起到应有的调节作用^[8]。林地和荒草地土壤水库的调节库容大,但由于其土壤剖面深层得不到充足水源的补偿,这些库容根本起不到调节作用。土壤干化后,一方面导致土壤水库有效库容中可调节水量和可利用水量的降低,另一方面又导致深层土壤充水极度困难,使土壤水库 70.69%~94.06% 的调节能力持久性地丧失(最大有效调节库容为 1 054.20 mm)。

将现有土壤水库中可利用水量减去试验期间土壤补充的水量,阳坡刺槐林地、阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡荒草地、阴坡荒草地、农地分别为 -13.50、97.73、142.61、204.87、1.53、142.08、530.00 mm。土壤水库在得不到及时补充的条件下农地仍有 530 mm 的可利用水分,阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阴坡荒草地有 100~200 mm 左右可利用的水分,阳坡荒草地仅有 1.53 mm 的水分可以利用,阳坡刺槐林地土壤水库没有水分可以供给植物利用。由此可见,农地土壤水库的调节能力最强,其次是阴坡辽东栎林地、阳坡辽东栎林地、阴坡荒草地、阴坡刺槐林地,阳坡刺槐林地和阳坡荒草地土壤水库几乎没有调节能力。阳坡刺槐林地和阳坡荒草地土壤水库中的可利用水量几乎全部由试验期间土壤储水增量补充,如果不能得到及时的补充土壤水库将失去供水能力,土壤水库的调节能力非常微弱,土壤水分环境十分脆弱,遇到大旱之年植被将遭到严重的破坏。

3.1.5 不同植被类型的耗水量动态

农地耗水量动态变化较为缓和,林地、荒草地变化较为剧烈。10 月至翌年 4 月份植被耗水最少,耗水量变化十分平缓,5~9 月份植被耗水最旺盛,变化也十分剧烈。1 年中,1 月份植被耗水强度最弱,7~8 月份最强烈。阳坡刺槐林地耗水量为 897.57 mm,大于阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地,后三者的耗水量相差不大,分别为 888.33、883.31、874.88 mm。阴坡荒草地的耗水量略小于阳坡荒草地,分别为 848.35、851.14 mm,明显高于农地(682.00 mm)。试验期间降水总量为 979.02 mm,为同期延安市多年平均值 956.81 mm 的 1.02 倍。农地、阳坡刺槐林地、阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡荒草地和阴坡荒草地的耗水量分别占降水量的 69.66%、91.68%、90.74%、90.22%、89.36%、86.94%、86.65%,

可见林地绝大部分降水被消耗,只有 10% 左右的降水储存在土壤中,荒草地约 14% 左右的降水储存于土壤,农地只消耗了约 70% 的降水,有约 30% 的降水储存于土壤中。

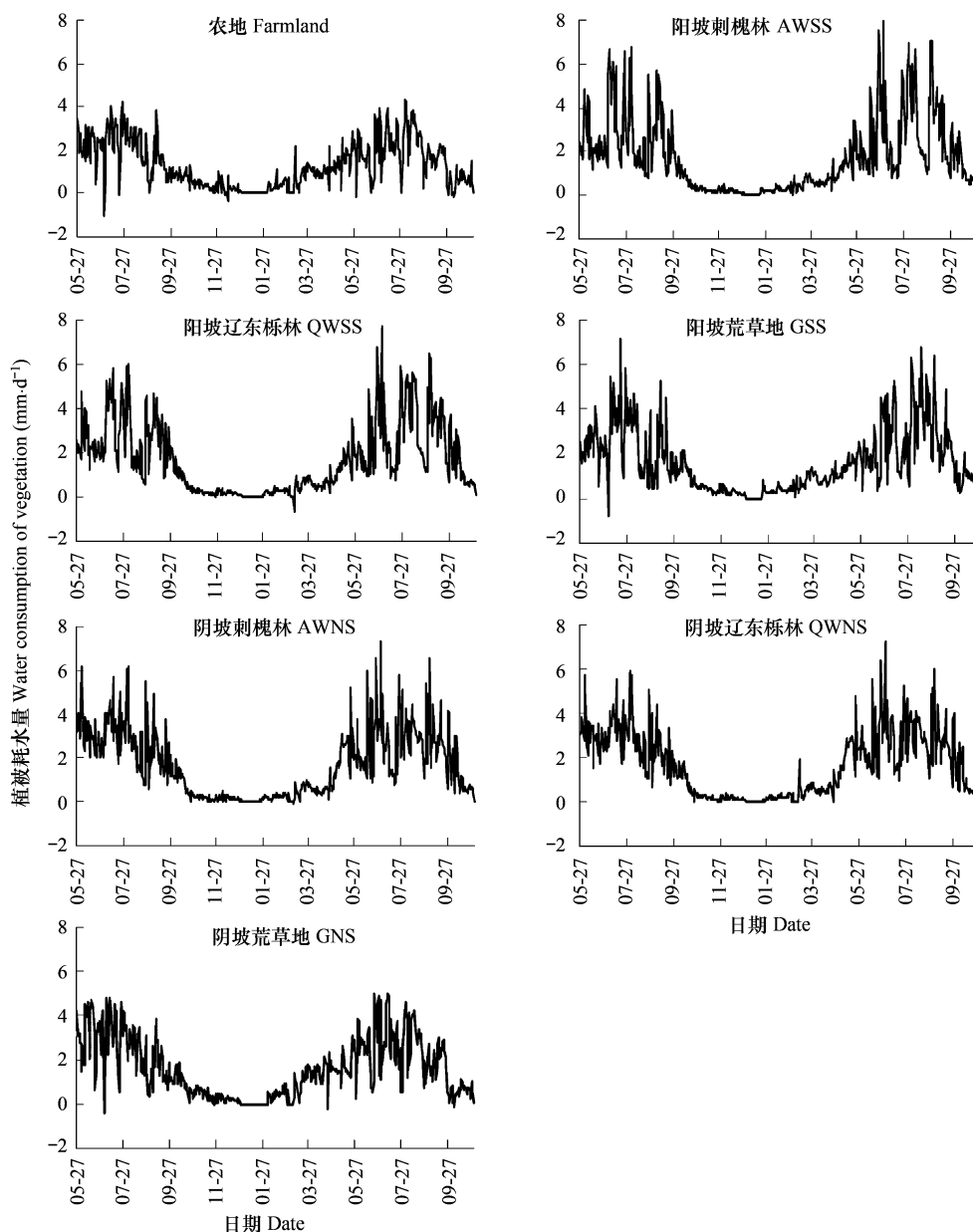


图4 试验地植被耗水量动态

Fig. 4 The trend of water consumption of vegetation in experimental plots

3.1.6 土壤干燥化

杨文治等^[9]认为土壤干层的土壤湿度上限为稳定湿度,下限为凋萎湿度,即土壤湿度在稳定湿度以下就认为形成干层。以此为标准,农地整个土壤剖面不存在干层,而其他地类均出现了干层。多数学者^[10,11]把土壤干层归结为黄土高原气候整体趋于旱化和植被过度耗水所导致土壤强烈干化的产物,天然林地、人工林地、荒草地均存在不同干化程度的干层。根据延安地区自然植被地带分布和植物群落演替规律,天然辽东栎林是当地植被演替的顶极群落,适应性强,群落结构比较稳定,更新良好^[12,13]。可以认为辽东栎林地的土壤干化主要是气候干旱化加剧林分蒸散而造成的,而人工林地、荒草地土壤的干化则是气候干旱和植被过度耗水共同导致。这样,以农地土壤水分为背景值(剔除了黏土层高含水量的影响)计算出气候干旱对黄土丘陵区土

壤干化的贡献率是 70.74%,植被过度耗水的贡献率是 29.26%,即气候干旱和植被过度耗水对干层形成的贡献率是 7:3。不难看出干层形成的主要原因在于气候的旱化,植被耗水是在气候旱化的驱动下进一步加剧了土壤的干化程度。需要说明的是:这里的植被过度耗水主要是指植被群落密度过大、生产力过高、植物本身的强耗水特性等原因引起植被的过度蒸腾耗水。气候干旱也会增加植被的蒸腾耗水,但这归属于气候原因。与农地相比,人工林地、荒草地减小了土壤蒸发量和地表径流量,但增加了植被的蒸腾和截留蒸发,总耗水量增加,导致土壤储水出现负平衡,是加剧土壤干燥化进而产生干层的主要原因。

3.2 植被生长对土壤水分环境的响应

不同的植被类型形成不同的土壤-植被-大气系统水分传输过程,造就不同的土壤水分环境,反过来植被生长又响应于不同的土壤水分环境,植被生长与土壤水分环境构成一个反馈调节系统。

3.2.1 植被对土壤水分的利用率

大气降水渗入土壤中的部分主要消耗于土壤蒸发、植被蒸腾、深层渗漏和增加土壤储水,其中被植物吸收利用的主要是用于蒸腾的水量。试验地,农地、阳坡刺槐林地、阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡荒草地、阴坡荒草地土壤接纳的降水量分别为 899.32、819.25、758.97、806.37、775.77、901.51、904.60 mm;植被对土壤水分的利用率分别为,农地作物 22.81%、阳坡刺槐林 39.91%、阴坡刺槐林 45.30%、阳坡辽东栎林 41.90%、阴坡辽东栎林 44.06%、阳坡荒草地 35.54%、阴坡荒草地 43.14%。农地作物生育期短,根系较浅,对土壤水分的利用率最小,开发利用潜力较大。阴坡地类土壤水分条件较好,土壤蒸发较轻,植被对土壤水分的利用率最高,其中刺槐林的利用率最高,荒草地最低,辽东栎林居中。阳坡地类植被对土壤水分的利用率明显低于阴坡同地类,其中辽东栎林最高,刺槐林次之,荒草地最低。总之,土壤含水量高、植被生长茂盛,则对土壤水分的利用率也较高。

3.2.2 植被蒸腾对土壤水分的响应

植被的蒸腾受土壤水分状况的影响较大,土壤含水量低,土壤的供水能力小,植被蒸腾就会受到抑制。试验期间农地、阳坡刺槐林地、阴坡刺槐林地、阳坡辽东栎林地、阴坡辽东栎林地、阳坡荒草地和阴坡荒草地植被蒸腾量分别为 205.10、326.93、343.82、337.87、341.84、320.37、390.25 mm。农地土壤水分条件最好,作物的蒸腾耗水除在 2006 年 6 月中下旬、8 月下旬以及 2007 年 6 月中旬、7 月上中旬降水较少的时期受到限制外,其余时间作物蒸腾强度的变化并不随降水量的变化而波动,主要与根系发育、自身生长耗水有关,但由于农作物生长周期短,蒸腾量并不大。阴坡荒草地、阴坡刺槐林地、阴坡辽东栎林地、阳坡辽东栎林地的土壤水分条件仅次于农地,土壤水库的调节能力较大,植被蒸腾受限轻微,蒸腾量较大;阳坡刺槐林和阳坡荒草地土壤含水量最低,植被蒸腾严重受限,土壤中用于蒸腾的水分最少。

3.2.3 植被生长对土壤水分的响应

在干旱的黄土丘陵区,植被生长状况是土壤水分条件优劣最好的反映。2006 年试验地各地类植被生长状况见表 4。

农地作物是人为控制最严格的植被类型,虽然土壤储水最多,但作物的利用率最低,作物的生物量最小,2006 年马铃薯生物量仅高于辽东栎林下的草本植物。反过来讲,也正是因为农地作物生物量小、耗水量低,农地才有可能积蓄较多的水分。阴坡荒草地、阴坡刺槐林地、阴坡辽东栎林地、阳坡辽东栎林地的土壤水分条件明显优于阳坡刺槐林地和阳坡荒草地,植被长势也较好。阴坡刺槐林的密度、树高、胸径明显大于阳坡刺槐,同样阴坡辽东栎的密度、树高、胸径也大于阳坡辽东栎。阴坡荒草地的灌木高度、冠幅、地径以及草本植物的生物量大于阳坡荒草地。由于阴坡刺槐林、阳坡辽东栎林和阴坡辽东栎林的郁闭度较高,下层草本植物生长较少,生物量显著小于阳坡刺槐林和荒草地。辽东栎林分中乔木密度比阴坡刺槐林分小,但林下灌木的密度远高于阴坡刺槐林分,而且长势也明显优于阴坡刺槐林分。辽东栎林分是延安黄土丘陵区的天然次生林,是植被演替的顶级群落,结构稳定,更新良好。从植被的总体生长量来看,试验地植被群落的生物量由大到小依次为阴坡辽东栎林、阴坡刺槐林、阳坡辽东栎林、阳坡刺槐林、阴坡荒草地、阳坡荒草地、农地。受林木耗水

量和土壤供水能力的双重影响,阳坡刺槐林枯梢现象严重,有整株枯死的林木;阴坡刺槐林有明显的枯梢,但没有整株枯死林木;辽东栎林也存在枯梢现象,但较刺槐林轻微,林木生长仍然十分旺盛。

表 4 试验地植被生长对比

Table 4 The contrast of vegetation growth in experiment plots

地类 Land type	植被 Vegetation	高度 Canopy height (m)	胸径(地径) DBH (Base diameter) (cm)	冠幅 Crown diameter (m)	密度 (株·hm ⁻²) Density (plant·hm ⁻²)	地上部分生物量 Biomass of aboveground part (g·m ⁻²)
阳坡刺槐林	刺槐 <i>Acacia</i>	6.91	10.16	2.95	900	—
AWSS	林下灌木 <i>Shrub</i>	0.82	1.32	0.62	1005	—
	林下草本 <i>Herb</i>	0.33	—	—	—	176.26
阴坡刺槐林	刺槐 <i>Acacia</i>	11.85	14.02	3.97	1025	—
AWNS	林下灌木 <i>Shrub</i>	1.16	1.64	1.31	1374	—
	林下草本 <i>Herb</i>	0.48	—	—	—	75.30
阳坡辽东栎林	辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	6.07	18.83	4.13	931	—
QWSS	林下灌木 <i>Shrub</i>	1.91	3.37	1.68	5800	—
	林下草本 <i>Herb</i>	0.26	—	—	—	46.83
阴坡辽东栎林	辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	6.83	21.75	4.68	987	—
QWNS	林下灌木 <i>Shrub</i>	2.23	4.64	2.14	8900	—
	林下草本 <i>Herb</i>	0.28	—	—	—	34.69
阳坡荒草地	林下灌木 <i>Shrub</i>	0.86	1.45	0.68	1216	—
GSS	林下草本 <i>Herb</i>	0.37	—	—	—	186.50
阴坡荒草地	林下灌木 <i>Shrub</i>	1.18	1.68	1.24	1507	—
GNS	林下草本 <i>Herb</i>	0.39	—	—	—	262.38
农地 <i>Farmland</i>	马铃薯 <i>Potato</i>	0.43	—	0.45	25400	51.73

4 结论与讨论

(1) 各地类均存在一定程度的水分亏缺,亏缺量由大到小依次为:阳坡刺槐林地 991.57 mm、阳坡荒草地 941.21 mm、阴坡刺槐林地 866.53 mm、阳坡辽东栎林地 815.89 mm、阴坡荒草地 790.27 mm、阴坡辽东栎林地 745.20 mm、农地 325.55 mm。土壤水分的交换深度农地达 320 cm,阴坡荒草地为 240 cm,阴坡辽东栎林地 200 cm,阴坡刺槐林地和阳坡辽东栎林地均为 160 cm,阳坡荒草地为 140 cm,阳坡刺槐林地 120 cm。试验期间,林地、荒草地和农地分别约有 10%、14%、30% 的降水储存于土壤中,林地、荒草地 600 cm 深土壤水库可利用水量 62.6~309.0 mm,与农地 728.6 mm 相比土壤水库的调节能力很有限。受林木耗水量和土壤供水能力的双重影响,阳坡刺槐林枯梢现象严重,有整株枯死林木;阴坡刺槐林有明显的枯梢,但没有整株枯死的林木;辽东栎林也存在枯梢现象,但较刺槐林轻微,林木生长仍然十分旺盛。

(2) 农地退耕还林后植被类型发生了质的变化,林地虽然减小了土壤蒸发量,但增加了植被的蒸腾和截留蒸发,总耗水量增加,土壤储水量减少,土壤水库的调节能力下降。与农地相比林地过多地消耗了土壤深层水分,不利于土壤水分的良性循环,但林地土壤有机质含量高,土壤疏松,地表枯枝落叶较多,植被残茬常年覆盖,有效拦蓄了地表径流,明显提高了降水入渗率,减弱了土壤侵蚀,水土保持效益显著,特别是生长年代较长的天然辽东栎林地,水土流失十分轻微。试验期间,农地产流 31.98 mm,径流含沙率 12.06 kg·m⁻³;刺槐林地产流(阴坡和阳坡刺槐林地平均)3.03 mm,径流含沙率 3.98 kg·m⁻³;辽东栎林地没有产流。尽管黄土丘陵区人工林分生长不是很好,生产力低下,但是人工林地的水土保持生态效益是农地无法相比的,因此在水土流失极其严重的地区,植树造林恢复植被仍然是水土保持的一条有效途径。

(3) 与农地和荒草地相比,人工林地植被截留蒸发和蒸腾量显著增加,加之林木根系较深,林地植被过度地消耗了深层土壤水分,恶化了土壤水文循环,导致土壤水分交换深度变浅,降水不能补充到深层土壤水库。人工林地植被较高的耗水量是造成土壤干燥化的主要原因,植被截留是不可避免的,减少林地植被的耗水关键是控制植被的蒸腾和土壤蒸发,因此在干旱的黄土丘陵区植树造林,一定要选择低耗水性的树种,而不是选

择根系庞大、抗旱、耐旱但耗水量高的树种,同时充分考虑土壤水分的植被承载能力,造林密度不宜过大。在植被建设中应当依据当地的降水资源和土壤水库的调节能力,遵循区域植被的演替规律合理规划,以水定植,尽量选择低耗水的适生乡土树种,采取自然修复为主、人工栽植为辅的措施,同时实施好水土保持措施。

(4) 黄土丘陵区天然生长的辽东栎次生林长势良好,是植被演替的顶级群落,较为稳定,说明辽东栎林群落是适应当地自然环境的,但辽东栎林地土壤水分也较低,存在一定的干燥化(与农地相比),不过较阳坡刺槐林地轻微,与阴坡刺槐林地差不多。在当地特定的自然条件下,辽东栎林群落的生物量和土壤水分对植被的承载力已经达到了相互适应,是当地自然条件的客观反映,因此不宜简单地将辽东栎林地的这种水分状况称为土壤干层,以农地土壤含水量或土壤稳定湿度判别是否形成土壤干层是值得商榷的,衡量土壤干层的标准应以当地稳定的天然植被群落的生物量水平和土壤水分状况为基准。辽东栎林地土壤的干燥化是黄土高原气候整体趋于旱化造成的,并不是人为干扰导致植被过度耗水造成的,这种土壤干燥化不宜归属于土壤干层的范畴。目前黄土丘陵区主要避免的是人工植被过度耗水造成的土壤干燥化问题。

References:

- [1] Zhu Z X. Soil science. Beijing: Agriculture Press, 1984.
- [2] Xu Y, Sidle R C. Land use change and its regulation of Yangou watershed in Loess Hilly-gully region. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 657—666.
- [3] Wei S P, Wang L, Wu F Q. Water transfer simulation in SVAT system of farmland and forestland in the loess hilly region. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 17—22, 32.
- [4] Jansson P E, David S M. A coupled model of water, heat and mass transfer using object orientation to improve flexibility and functionality. *Environmental Modeling & Software*, 2001, 16: 37—46.
- [5] Tong Y A. Theory and method of water transfer in the system of soil-vegetation-atmosphere. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998.
- [6] Yang W Z, Yu C Z. Management and evaluation on the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1992.
- [7] Guo F T. The soil reservoir and its regulation. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1996, 17(2): 72—80.
- [8] Yang W Z, Shao M A. Study on soil water in the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000.
- [9] Li Y S. The Properties of water cycle in soil and their effect on water cycle for land in the loess region. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 3(2): 91—101.
- [10] Li Y Y, Shao M A. Climatic change, vegetation evolution and low moisture layer of soil on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(1): 72—77.
- [11] Wang L, Shao M A, Wang Q J, *et al.* Review of research on soil desiccation in the Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 27—31.
- [12] Wang L, Wang Q, Wei S, *et al.* Soil desiccation for Loess soils on natural and regrown areas. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2467—2477.
- [13] Pang M, Hou Q C, Xue Z D, *et al.* Study on soil moisture characteristic of vegetation in different succession Stage in Yanan Experimental Area. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(2): 138—141.

参考文献:

- [1] 朱祖祥. 土壤学. 北京: 农业出版社, 1984.
- [2] 徐 勇, Roy C. Sidle. 黄土丘陵区燕沟流域土地利用变化与优化调控. *地理学报*, 2001, 56(6): 657—666.
- [3] 卫三平, 王力, 吴发启. 黄土区农林地 SVAT 系统水分传输模拟研究. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 17—22, 32.
- [5] 同延安. 土壤-植物-大气连续体系中水运移理论与方法. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- [6] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992.
- [7] 郭凤台. 土壤水库及其调控. *华北水利水电学院学报*, 1996, 17(2): 72—80.
- [8] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 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.
- [10] 李裕元, 邵明安. 黄土高原气候变迁、植被演替与土壤干层的形成. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(1): 72—77.
- [11] 王力, 邵明安, 王全九, 等. 黄土区土壤干化研究进展. *农业工程学报*, 2004, 20(5): 27—31.
- [13] 庞敏, 侯庆春, 薛智德, 等. 延安研究区主要自然植被类型土壤水分特征初探. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 138—141.