

陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤水分生态环境

王延平^{1,2}, 邵明安², 张兴昌²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要:通过定点土壤水分测定与对比分析,研究了陕北黄土区 35~45°陡坡地人工植被的土壤水分亏缺状况、年际、年内动态变化规律、干燥化特征及其补偿恢复特征。结果表明:陡坡地多年生人工植被的土壤水分亏缺极为严重,贫水年 0~10m 土层贮水量仅相当于田间持水量的 26.2%~42.0%,丰水年贮水量也仅占田间持水量的 27.0%~43.3%;亏缺次序为:柠条>刺槐>苜蓿>侧柏>杨树>油松>荒坡>杏>枣>农地。年际间同一植被土壤水分含量的变化主要发生在 200cm 以上土层内,变异程度随土壤深度的增加而减弱。同一生长季,各种植被 0~120cm 土层含水量的变异系数都较大,但植被间差异较小;120cm 以下土层,变异系数较小,但植被间差异较大。陡坡地多年生植被均有永久干层存在,但深层土壤干燥化强度因植物种类和生长年限而存在明显的差异。雨季土壤水分的补偿和恢复深度为 1.0~1.4m,但不同植被的土壤贮水增量和补偿度有较大差异。同一植被丰水年的雨水补偿深度比干旱年可增加 60cm 以上,5m 土层贮水增量增加 3 倍以上。在自然降雨条件下,陡坡地多年生人工植被的土壤贮水亏缺状况不能得到改善,土壤干化现象也不可能有所缓解。

关键词:陕北黄土区;陡坡地;多年生人工植被;土壤水分生态环境

文章编号:1000-0933(2008)08-3769-10 中图分类号:S152.7+5 文献标识码:A

Soil moisture ecological environment of artificial vegetations in steep slope of loess region in North Shaanxi Province

WANG Yan-Ping^{1,2}, SHAO Ming-An², ZHANG Xing-Chang²

1 College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3769~3778.

Abstract: By means of located monitoring and comparatively analysis, soil water deficient situation, soil moisture dynamic variation laws, soil aridizations and soil water compensation features under condition of different artificial vegetations have been studied in 35—45° steep slope of loess region in North Shaanxi. The results showed that: soil water was extremely deficient under condition of perennial artificial vegetations in steep slope. soil water storage (0—10m) was only equal to 26.2%—42.0% of field capacity in dry years, and in rainy years it was also only equal to 27.0%—43.3% of field capacity. The order of soil water deficit was: Caragana microphylla > locust > alfalfa > Chinese arbor-vitae > poplar > Chinese pine > wild land > apricot > Chinese date > farm land. Annual variations of soil moisture with same vegetation

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90502006);西北农林科技大学“创新团队”资助项目;陕西省科技攻关资助项目(2005K01-G14-03)

收稿日期:2007-04-28; **修订日期:**2007-11-07

作者简介:王延平(1968~),男,陕西子长人,博士生,副研究员,主要从事植被与土壤水分生态研究. E-mail: ylwangyp@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90502006); “Innovation Team” Program of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry; Supporting Program from Shaanxi Province (No. 2005K01-G14-03)

Received date: 2007-04-28; **Accepted date:** 2007-11-07

Biography: WANG Yan-Ping, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in ecology such as relationship between vegetation and soil moisture. E-mail: ylwangyp@163.com

were weakened with soil depth increasing, and happened mainly in 0—200 cm soil layers. In same growth season, all CV (Coefficient of Variation) of soil moisture under different vegetations were bigger and concentrated comparatively in 0—120 cm soil layers, but difference of CV in different vegetations was small; below 120 cm soil layers, CV were smaller, but difference of CV in different vegetations was bigger. Permanent soil dry layers always happened under condition of perennial vegetations in steep slope, but the difference of soil aridization intensity was obvious among different vegetations and growth years. Soil water compensation and recovery depths in rainy season were 1.0—1.4 m, but the soil water storage increment and compensation degree in different vegetations were dramatically different. Soil water compensation depth in same vegetation in rainy years was increased over 60 cm than in dry years, while the soil water storage increment in 5 m soil layers was increased over 3 times. Under natural precipitation, the soil water deficit in artificial vegetations in steep slope cannot be reduced, soil aridization also cant be relieved.

Key Words: loess region in North Shaanxi; steep slope; perennial artificial vegetations; soil moisture ecological environment

土壤水分是限制黄土高原地区植物生长和生存的关键因子,其含量高低对植物的生长发育、群落类型和分布特点具有严重影响。而植被又是影响土壤水分最活跃最积极的因素,尤其是多年生人工林草植被,由于对土壤深层储水的过度消耗而长期得不到降水入渗补给,土壤水分循环出现负平衡,导致深层土壤干燥化。许多学者对黄土高原不同植被类型土壤水分生态功能^[1]、植物群落水分生态环境^[2~6]和人工植被的土壤干化问题进行了研究^[7~15]。陕北黄土区是黄土高原地区水土流失最严重的区域,年土壤侵蚀模数 1.6 万 t/(km²·a) 以上,其入黄沙量占到黄河总输沙量的 56%,25°以上陡坡地占总土地面积的 51.55%,是该区植被重建和治理水土流失的重点和难点。但专门针对陡坡林草地土壤水分系统的研究报道少见,陡坡地植被建设成效低、恢复慢的问题突出存在。为了更好地掌握陡坡地植被生存和生长的土壤水分生态环境特征,给陡坡地人工植被的选择、合理规划和土壤水分的有效利用提供可靠的理论依据,我们对陡坡地多年生乔、灌、草植被的土壤水分进行了系统性定量研究。对于进一步认识植被和土壤水分的相互作用规律,促进区域植被恢复和生态环境建设具有重要意义。

1 研究区概况

陕北黄土区梁峁起伏,沟壑交错,沟壑密度达 7.26km/km²。地面组成物质分为基岩和土状堆积物两部分。土壤为黄绵土,土质疏松,侵蚀强烈。温带半干旱大陆性季风气候,温差大,日照充足。据多年观测统计,年平均温度 8.4℃,≥10℃积温 3470℃,日照时数 2716h,无霜期 160~170d。1976~2006 年平均降雨量 420.3mm,降水年变化率大,丰水年占 30.0%,平水年占 40.0%,枯水年占 30.0%(降水量比平均降水量增加 10% 以上为丰水年,降水量比平均降水量降低 10% 以上为欠水年^[16]),丰水年平均降水 79 次,平水年 75 次,枯水年 68 次。降水季节分配不均,主要集中在 6~9 月份,占总降雨量的 74.3%,且多以暴雨的形式出现,雨强大,不利于雨水下渗储存。年蒸发量高达 1577mm,春旱、伏旱、冬旱时常发生,常有大风、沙尘暴。陡坡地的利用方式主要有多年生人工林草地、农地和荒坡 3 种。

2 研究方法

在野外全面踏查的基础上,沿佳米—米子公路从东向西选定分布较为广泛、具有较好代表性的 35~45°

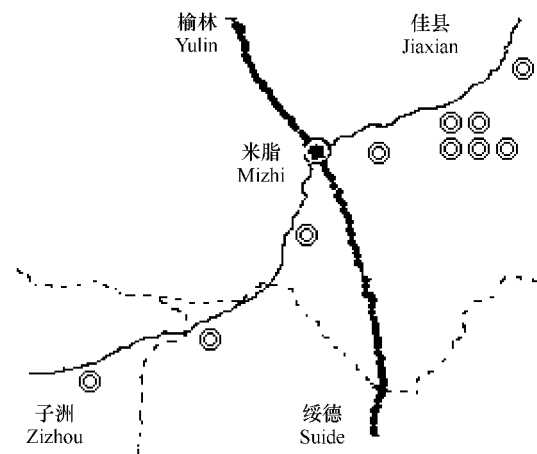


图 1 样地分布示意图

Fig. 1 The distribution of the sample lands

陡坡成林植被类型(表 1)为样地,分布见图 1。样地土壤均为黄绵土,平均容重 $1.33\text{g}/\text{cm}^3$,平均田间持水量 20.75%。定点测定土壤水分和调查相应的植被生长情况。以农地和荒坡地为对照,通过分析土壤水分时间和空间数量变化特征,讨论陡坡地多年生人工植被的土壤水分环境状况。在样地中心采用土钻取土测定土壤水分,钻深为 5m,每月取样 1 次,并在持续干旱期末和土壤封冻前增测 10m 土层含水量。每次取样重复 2 次。测定采用重量法,用烘箱在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下连续烘干 10 h,再用精度为 0.001g 的电子天平称重,计算土壤水分的质量百分含量。土壤容重和土壤田间持水量用环刀法测定。土壤贮水量按 $W_c = 0.1\theta_m \cdot V \cdot H$ 计算,式中, W_c 为土壤贮水量(mm); θ_m 为质量含水量(%); V 为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土层深度(cm)。土壤有效水分贮存量(土壤中含有的大于凋萎湿度的水分贮存量) $= 0.1(\theta_m - \theta_k) \cdot V \cdot H$, θ_k 为凋萎湿度。土壤水分亏缺量 Da (mm) = 土壤田间持水量 F_c (mm) - 土壤实际贮水量 W_c (mm),土壤水分亏缺度 $DSW(\%) = Da/F_c \times 100\%$ 。雨季末土壤贮水增量 ΔW (mm) = 雨季末土壤实际贮水量(mm) - 雨季初土壤实际贮水量(mm),土壤贮水补偿度 $CSW(\%) = \Delta W/Da \times 100\%$ [17]。

表 1 样地基本情况

Table 1 The condition of different sample lands

采样地 Sample site	植被类型 Vegetation type	生长年限 Growth year(a)	密度 Density (m × m)	坡位 Slope position	坡向 Aspect	坡度 Gradient (°)	海拔 Elevation (m)
子洲佛殿堂 Zizhou fudiantang	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	28	3×1.5	中上 Middle slope	阳坡 Sunny	39	1026
米脂泉家沟 Mizhi quanjiagou	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	26	1.5×1.2	中上 Middle slope	半阳坡 Semi-sunny	36	998
米脂艾家峁 Mizhi aijiamao	侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	48	1.5×1	中上 Middle slope	阳坡 Sunny	35	1027
米脂泉家沟 Mizhi quanjiagou	杨树 <i>Populus simonii</i>	26	3×1.5	中上 Middle slope	半阳坡 Semi-sunny	38	1009
米脂泉家沟 Mizhi quanjiagou	杏树 <i>Prunus armeniaca</i>	13	5×4	中上 Middle slope	半阳坡 Semi-sunny	35	963
米脂磨石沟 Mizhi moshigou	枣树 <i>Ziziphus jujuba</i>	15	5×4	上 Upper slope	半阳坡 Semi-sunny	36	977
米脂庙沟 Mizhimiaogou	柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	32	1.2×1	中上 Middle slope	阳坡 Sunny	40	1031
绥德梁崖窑 Suide liangyayao	苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	8	1×0.5	上 Upper slope	阳坡 Sunny	35	977
米脂王家硷 Mizhi wangjiajian	荒坡 Wild land			上 Upper slope	阳坡 Sunny	42	933
米脂泉家沟 Mizhi quanjiagou	农地 Farm land			中上 Middle slope	半阳坡 Semi-sunny	35	1076

3 结果分析

3.1 陡坡地不同植被类型土壤水分的总体特征

3.1.1 不同植被类型土壤水分的亏缺特征及年际变化

在地形条件基本一致情况下,土壤水分的分布主要受大气降水、气候、植被类型和人为活动等因素决定。表 2 结果表明,陕北黄土区降雨量小,陡坡地多年生人工植被土壤水分呈极为严重的亏缺状态,且由于降水量的年际变化大,不同降水年份有明显差异。贫水年 0~10m 土层贮水量仅为 543.4~871.5mm,相当于田间持水量的 26.2%~42.0%,而丰水年贮水量也仅有 559.1~897.9mm,占田间持水量的 27.0%~43.3%。亏缺程度和黄土高原其它地区相比要严重的多 [17~21]。由于降雨量及其分配影响水分入渗深度和强度,年际间陡坡地各种植被土壤水分的变异程度均表现为随土壤深度的增加而减弱的特征(表 3),土壤贮水量的变化主要发生在 2m 以上土层内,0~1m 土壤贮水量变幅最大,达 27.6~54.9mm。2004、2005 年连续两年为贫水(干旱)年,降雨量分别为 297.5mm 和 312.9mm,但从 2004 年 11 月至 2005 年 11 月 10m 土层贮水量减少了 6.3~

表 2 不同植被土壤水分的年际变化

Table 2 Annual changes of soil moisture content in different vegetations

植被类型 Vegetation type	测定时间 Measuring time	土层深度及含水量 Soil depth(m) and soil moisture (%)										储水量 Wc (mm)	储水增量 ΔW (mm)	亏缺量 De (mm)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
刺槐	2004-11-05	5.34	4.75	5.42	6.89	6.38	6.85	6.63	6.92	6.8	6.02	620.0		1454.8
<i>Robinia pseudoacacia</i>	2005-11-03	4.76	4.69	5.39	6.90	6.43	6.82	6.56	6.89	6.82	5.90	611.6	-8.4	1463.2
	2006-11-05	7.52	5.25	5.45	6.77	7.55	6.94	6.77	7.04	6.51	5.93	657.3	45.7	1417.5
油松	2005-11-02	8.48	5.91	7.30	7.89	6.96	7.19	8.32	9.55	9.29	9.13	800.2		1274.6
<i>Pinus tabulaeformis</i>	2006-11-03	12.28	9.12	6.44	6.52	6.41	7.25	8.36	9.54	9.24	9.08	842.4	42.2	1232.4
侧柏	2005-11-03	7.16	4.67	4.65	5.16	5.00	5.58	6.95	7.29	7.81	8.38	626.8		1448.0
<i>Platycladus orientalis</i>	2006-11-06	11.88	6.24	4.77	5.05	5.34	5.12	6.72	6.96	7.48	8.07	676.3	49.5	1398.5
杨树	2005-11-02	8.11	7.29	9.03	6.98	6.12	6.58	7.42	8.55	8.90	9.43	784.1		1290.7
<i>Populus simonii</i>	2006-11-03	10.95	9.57	8.32	7.36	5.85	6.37	7.45	8.39	8.81	9.7	827.7	43.6	1247.1
杏	2004-11-05	10.88	9.42	8.23	8.35	7.86	7.51	8.19	8.39	7.66	8.52	850.1		1224.7
<i>Prunus armeniaca</i>	2005-11-02	10.01	9.23	8.53	8.47	7.92	7.42	8.28	8.01	7.62	8.46	839.5	-10.6	1235.3
	2006-11-04	14.43	9.32	7.45	7.40	7.27	7.05	8.27	8.59	7.59	8.26	856.3	16.8	1218.5
枣	2005-11-03	8.45	5.98	6.79	9.08	10.83	6.36	8.12	8.93	11.02	11.59	871.5		1203.3
<i>Ziziphus jujuba</i>	2006-11-07	12.14	7.44	6.24	6.02	6.23	5.50	9.91	12.44	11.91	11.96	897.9	26.4	1176.9
柠条	2004-11-06	6.68	5.32	5.21	6.46	5.52	4.76	4.81	4.79	5.63	5.79	549.7		1525.1
<i>Caragana korshinskii</i>	2005-11-03	6.30	5.08	4.94	7.55	5.84	4.50	4.66	4.43	5.39	5.65	543.4	-6.3	1531.4
	2006-11-02	10.94	5.22	4.95	5.64	4.37	4.52	4.55	4.77	5.09	5.86	559.1	15.7	1515.7
苜蓿	2004-11-06	7.75	4.82	5.56	5.77	6.48	5.91	6.32	6.35	7.91	7.89	647.6		1427.2
<i>Medicago sativa</i>	2005-11-03	7.32	4.59	5.45	6.1	6.39	6.09	6.23	6.21	7.65	7.84	638.7	-8.9	1436.1
	2006-11-05	10.27	7.06	4.67	5.07	5.62	5.9	5.96	6.34	7.95	8.52	673.6	34.9	1401.2
荒坡	2005-11-03	7.77	5.40	5.76	5.71	8.09	8.38	8.51	10.46	10.83	11.61	825.2		1249.6
Wild land	2006-11-05	13.26	6.85	4.86	5.74	6.66	7.09	8.57	10.37	10.41	11.69	855.0	29.8	1219.8
农地	2005-11-02	11.20	13.02	13.5	14.44	14.85	13.84	13.89	15.01	15.65	16.48	1418.8		656.0
Farm land	2006-11-02	14.26	15.5	14.43	14.11	14.49	13.74	14.4	14.70	15.84	16.88	1483.5	64.7	591.3

表 3 生长季陡坡地植被土壤水分的垂直变化

Table 3 The vertical changes of soil moisture in different vegetations in steep slope in growing season

植被类型 Vegetation type	项目 Item	土层深度 Soil depth(cm)							
		0 ~ 40	40 ~ 80	80 ~ 120	120 ~ 160	160 ~ 200	300	400	500
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	平均含水量 Mean(%)	7.05	6.18	3.91	4.07	4.29	4.98	6.17	5.88
	标准差 Std Dev	5.04	4.73	0.80	0.41	0.47	0.50	0.41	0.51
	变异系数 CV (%)	71.51	76.64	20.55	9.95	10.94	10.04	6.71	8.72
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	平均含水量 Mean(%)	10.02	8.90	7.12	6.48	6.27	6.21	6.51	6.32
	标准差 Std Dev	5.86	5.70	2.91	1.40	0.82	0.25	0.45	0.57
	变异系数 CV (%)	58.50	64.11	40.81	21.66	13.06	3.95	6.95	9.08
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	平均含水量 Mean(%)	8.21	7.84	6.35	4.43	4.21	4.58	4.50	4.44
	标准差 Std Dev	4.81	5.71	4.38	1.12	0.44	0.79	0.52	0.47
	变异系数 CV (%)	58.55	72.83	69.00	25.39	10.42	17.36	11.56	10.50
杨树 <i>Populus simonii</i>	平均含水量 Mean(%)	9.80	9.86	8.00	6.76	6.97	7.27	7.30	6.00
	标准差 Std Dev	5.49	5.51	3.39	0.88	0.41	0.57	1.07	0.71
	变异系数 CV (%)	56.05	55.87	42.39	12.94	5.93	7.79	14.72	11.79
杏 <i>Prunus armeniaca</i>	平均含水量 Mean(%)	10.98	10.24	8.53	7.91	7.94	7.42	7.54	7.35
	标准差 Std Dev	6.03	5.03	2.25	0.67	0.87	0.75	0.61	0.79
	变异系数 CV (%)	54.88	49.17	26.32	8.44	10.94	10.11	8.04	10.68
枣 <i>Ziziphus jujuba</i>	平均含水量 Mean(%)	9.64	9.32	7.68	5.88	5.59	5.63	5.71	5.87
	标准差 Std Dev	5.62	5.74	3.44	1.12	0.54	0.41	0.42	0.47
	变异系数 CV (%)	58.33	61.60	44.71	18.97	9.60	7.37	7.29	7.96
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	平均含水量 Mean(%)	8.96	7.78	5.21	4.22	4.17	4.45	5.14	4.60
	标准差 Std Dev	6.12	5.47	1.97	0.40	0.43	0.43	0.61	1.19
	变异系数 CV (%)	68.30	70.33	37.76	9.47	10.27	9.60	11.95	25.81
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	平均含水量 Mean(%)	8.72	7.39	6.32	4.58	4.23	4.79	5.57	5.88
	标准差 Std Dev	5.30	5.93	4.76	1.56	0.23	0.39	0.56	0.68
	变异系数 CV (%)	60.74	80.16	75.30	34.09	5.39	8.21	10.14	11.52
荒坡 Wild land	平均含水量 Mean(%)	10.10	7.98	6.24	5.65	4.67	4.97	5.45	6.39
	标准差 Std Dev	5.57	4.84	1.66	0.63	0.41	0.37	0.55	0.99
	变异系数 CV (%)	55.10	60.69	26.68	11.19	8.84	7.40	10.13	15.47
农地 Farm land	平均含水量 Mean(%)	11.37	11.21	11.14	12.40	12.68	11.82	12.65	13.06
	标准差 Std Dev	3.86	5.71	4.94	2.12	1.04	0.69	0.29	0.43
	变异系数 CV (%)	33.92	50.94	44.36	17.12	8.23	5.86	2.30	3.27

10.6mm,这是由于干旱年份降雨的补给远远小于土壤水分的消耗所致。不同植被类型的生理耗水量不同,土壤水分亏缺的程度不同,亏缺次序为:柠条>刺槐>苜蓿>侧柏>杨树>油松>荒坡>杏>枣>农地。柠条、刺槐、苜蓿、侧柏、杨树、油松的贮水量明显低于荒坡和农地,而经济林(枣、杏)的贮水量则高于荒坡但远低于农地,这是由于各种植被的生长年限、生理特性和人为活动等综合因素决定的(表2)。同时由于不同植被类型对土壤水分利用的深度和强度不同,土壤贮水量的减幅有所差异,耗水量大的杏树、苜蓿和刺槐减幅大于荒坡和退化衰老的柠条。2006年为丰水年,降雨量达500.9mm,各种植被类型的贮水量从2005年11月至2006年11月间增加了15.7~64.7mm,杏树和退化衰老柠条的增幅较小,而农地增幅最大(表3),原因是当年杏树逢结果大年,大量消耗了根际区(0~200cm)的土壤水分;而退化衰老柠条地,植被盖度低,对雨季降水产生的径流拦蓄能力差,雨水下渗补充到1m以下土层的量很小所致。

3.1.2 生长季不同植被类型土壤水分特征

生长季(4~11月份)内,陡坡地各种植被的5m土层贮水量随着降雨量的变化而上下波动,但其变化滞后于降雨量的变化(图2)。4月初~6月底,由于降雨少,气温回升很快,表层土壤蒸发潜力很大,加之植物生长发育耗水强度大,土壤水分消耗大于补给,贮水量逐渐减少;7~8月份,由于降雨量增多,土壤水分得以补偿和恢复,贮水量逐渐增加,9~10月份达到最高;以后降雨量迅速减少,而蒸腾蒸发还在不断消耗水分,土壤贮水量又逐渐减少。但由于不同植被类型的生长发育耗水时间和耗水强度不同,土壤贮水量的起伏变化幅度不尽相同,随时间而异。方差分析表明,农地、柠条地与其它植被的土壤平均贮水量之间差异显著($P < 0.05$),刺槐、侧柏、苜蓿之间差异不显著,杏、枣、油松、荒坡之间差异不显著,枣、油松、杨树之间差异不显著,刺槐、侧柏、苜蓿与杏、枣、油松、荒坡和杨树之间差异显著。

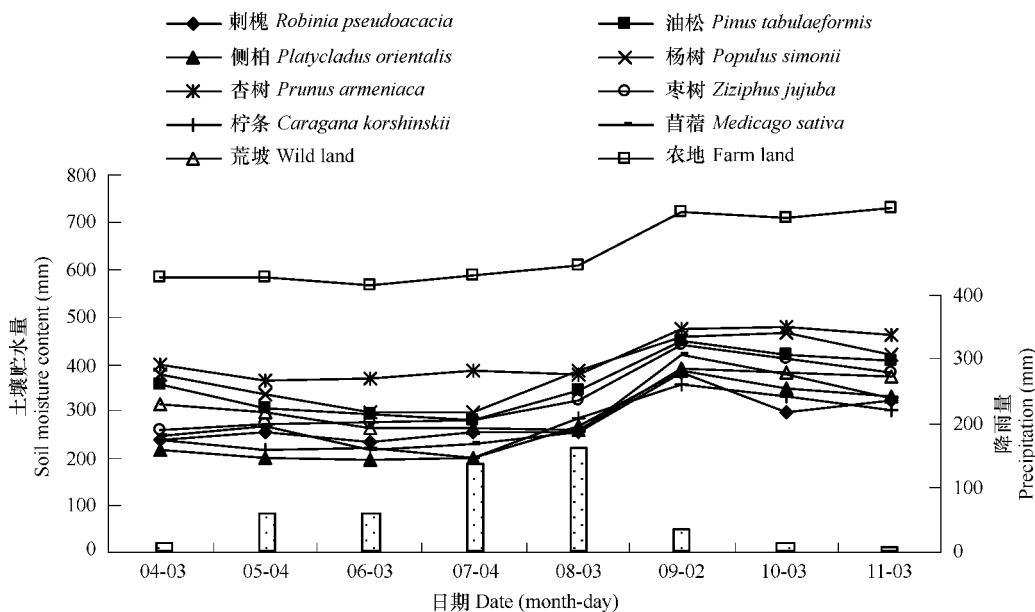


图2 不同植被的土壤贮水量动态变化与降雨量变化比较

Fig. 2 Dynamics of precipitation and soil moisture in different vegetations

生长季内,陡坡地植被的土壤含水量受土壤结构、植物根系分布深度及耗水量、降水等综合因素的影响,在空间分布上存在一定的差异。变异系数 CV 可以反映这个特征。从表3可以看出,各种植被剖面土壤含水量的 CV 值数均表现为随土壤深度加深递减的趋势,表明土壤越深,其含水量变化程度越小。在0~120cm土层范围内,CV值大且较为集中,土壤水分变化强烈,但各种植被差异不大,说明该层土壤水分的变化主要是由于与外界交换频繁,受到降水、径流和蒸发等影响程度大而引起的。120cm以下土层,CV值显著减小,土壤水分相对稳定,且各种植被的含水量的变异系数差异较大,说明该层土壤水分的差异主要是植物根系分布和

耗水规律不同而造成的。农地的变异系数显著小于多年生植被和荒坡地,这是由于农作物根系分布浅、水分利用层次浅、生育期短、耗水量较小所致。

3.2 陡坡地人工植被的土壤干燥化特征

在黄土高原地区,由于降雨量小,有限的土壤水分补给量远小于林草植被的消耗量,几乎所有的人工乔、灌木和紫花苜蓿等多年生豆科牧草都能使土壤形成干燥化土层^[10,11]。本文将判断土壤干层的上限指标——土壤稳定湿度定为 5.7,占田间持水量的 36.5%;将其下限指标——凋萎湿度定为 3.6%^[22]。将 0~2.0m 内的干层称为临时干层,将 2.0m 以下的干层称为永久干层^[11]。

一般来说,剖面土壤水分含量与植被类型、降水下行入渗、年限是密切相关的。植被类型不同,根系分布深度及密度具有很大的差异,导致土壤的蒸发和植被的蒸腾不同,所造成的土壤干燥化程度和土壤水分的分布也不同。从图 3 可以看出,除农地外,陡坡地各种植被类型均产生了不同程度的干化层,10m 土层内土壤剖面含水量均呈现“高一低一较高”到趋于稳定的特征,但深层土壤干燥化强度因植物种类和生长年限而存在明显的差异,这与李玉山的研究结果相一致^[7]。刺槐、油松、侧柏和杨树 4 种乔木生态林均因密度大,耗水强烈,生长年限长,土壤水分亏缺量逐年积累增加,产生了永久性干层。28 年生刺槐地的土壤干层厚度达到 8.6m,10m 土层平均含水量仅为 5.66%,有效水分储存量 205.5mm,土壤干化程度要比树龄相近的油松和杨树严重的多,主要依靠天然降水调节和维持生命,中上部枝梢已大量干枯;就同为针叶树种的侧柏和油松相比,48 年生侧柏林的干层厚度达 8.2m,10m 土层平均含水量 5.64%,有效水分储存量 203.58mm,26 年生油松的土壤干层厚度也达到 5.6m,有效水分储存量 334.0mm,10m 土层平均含水量 5.94%,含水量显著高于侧柏 ($P < 0.05$),说明生长年限是剖面土壤水分含量高低的主要影响因子之一;26 年生杨树与油松的干层厚度一致,但 0~3.6m 土层含水量明显高于其他 3 个树种,有效水分储存量 325.1mm,这可能是其密度较小的原因。就树龄相近的杏树和枣树两种经济林而言,杏树的干层厚度为 6.6m,枣树的干层厚度达 5.8m,4.6m 以上土层杏树地的含水量明显高于枣树地,但 8m 以下土层则明显低于枣树地,这可能是大鱼鳞坑拦蓄径流下渗的结果。可见,陡坡植被建设工作中加强对高龄乔木林地采取修补保水工程、降低密度、平茬等水分调控措施促进土壤水分恢复是非常必要的。灌木柠条林根系深,密度大,生长年限长,耗水严重,整个剖面土壤干旱程度已达到了极限,10m 土层平均含水量仅 4.89%,有效水分储存量仅有 129.0mm,导致群落整体衰败,部分已经死亡。仅 8 龄苜蓿地干层厚度达 6.6m,10m 土层平均含水量仅 6.08%,有效水分储存量 247.5mm,生长弱,产量低,这表明陡坡地种植苜蓿的可行性尚需探讨。荒坡地在 6.0m 以内存在着强烈耗水层,出现干化,但含水量明显高于其它植被,6.0m 以后土壤含水量逐步回升。农地的含水量显著高于各种多年生林草地 ($P < 0.05$),未产生干层,这是由于农地休闲期长、农作物耗水少和常年耕作易于雨水下渗所致。在人工造林时,要特别注意当地土壤水分是否能达到不同树种的生长对水分的要求,科学合理利用有限的水资源,才能实现植被建设之目的。

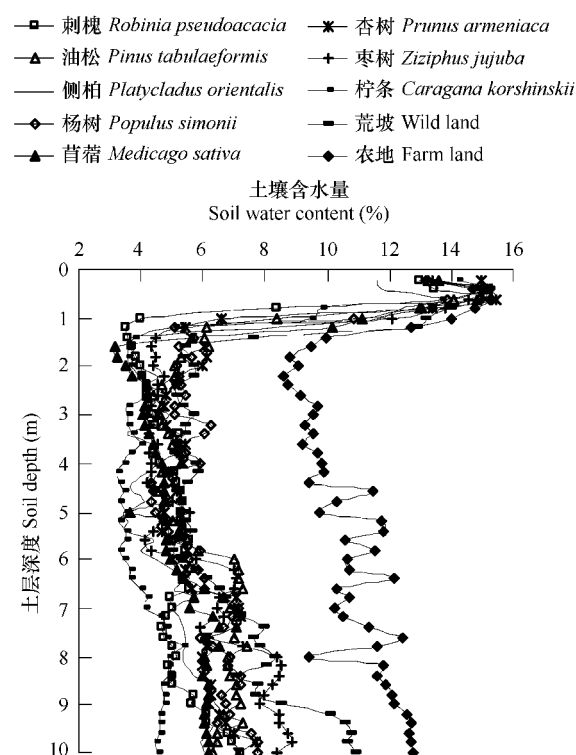


图 3 不同植被土壤垂直剖面含水量分布

Fig. 3 Vertical diversity of soil moisture in different vegetations

主要影响因子之一;26 年生杨树与油松的干层厚度一致,但 0~3.6m 土层含水量明显高于其他 3 个树种,有效水分储存量 325.1mm,这可能是其密度较小的原因。就树龄相近的杏树和枣树两种经济林而言,杏树的干层厚度为 6.6m,枣树的干层厚度达 5.8m,4.6m 以上土层杏树地的含水量明显高于枣树地,但 8m 以下土层则明显低于枣树地,这可能是大鱼鳞坑拦蓄径流下渗的结果。可见,陡坡植被建设工作中加强对高龄乔木林地采取修补保水工程、降低密度、平茬等水分调控措施促进土壤水分恢复是非常必要的。灌木柠条林根系深,密度大,生长年限长,耗水严重,整个剖面土壤干旱程度已达到了极限,10m 土层平均含水量仅 4.89%,有效水分储存量仅有 129.0mm,导致群落整体衰败,部分已经死亡。仅 8 龄苜蓿地干层厚度达 6.6m,10m 土层平均含水量仅 6.08%,有效水分储存量 247.5mm,生长弱,产量低,这表明陡坡地种植苜蓿的可行性尚需探讨。荒坡地在 6.0m 以内存在着强烈耗水层,出现干化,但含水量明显高于其它植被,6.0m 以后土壤含水量逐步回升。农地的含水量显著高于各种多年生林草地 ($P < 0.05$),未产生干层,这是由于农地休闲期长、农作物耗水少和常年耕作易于雨水下渗所致。在人工造林时,要特别注意当地土壤水分是否能达到不同树种的生长对水分的要求,科学合理利用有限的水资源,才能实现植被建设之目的。

3.3 陡坡地植被土壤水分的补偿和恢复特征

3.3.1 同一年份不同植被土壤水分的补偿和恢复

土壤水分的补偿和恢复是降雨入渗补给与系统耗水共同作用的结果。弄清雨季土壤水分补偿和恢复的特点,有助于采取合理的措施,促进土壤干层的恢复。雨水的下渗补偿深度是评判雨季土壤水分补偿的重要指标,理论上雨季前后土壤含水增量为零时即为雨水补偿的最大深度,但由于雨水下渗和深层土壤水分的上移运动同时存在,所以此值显然不够准确,本文将土壤水分亏缺补偿度等于5%时,即土壤水分含量上下变化幅度稳定时的上幅值定为雨水补偿的最大深度。图4显示了2006年雨季始末各种植被不同土层的水分补偿度的变化。可以看出,雨季结束后陡坡地各种植被的土壤水分均有不同程度的补偿和恢复,但由于坡度陡、径流水流失快、下渗少,雨水补偿的深度仅为1.0~1.4m,农地、苜蓿、侧柏的补偿深度较深,为1.4m,油松、杨树、刺槐、杏树、枣树和荒坡次之,为1.2m,而柠条仅为1.0m。雨季末土壤水分亏缺补偿度因受雨季初土壤水分含量、冠层截留、地面管理措施以及系统耗水等方面的影响也有较大差异。5m土层内,侧柏的土壤贮水增量最大,为183.9mm,杏树最小,为79.5mm,其次序为侧柏>苜蓿>油松>枣>杨树>柠条>农地>荒坡>刺槐>杏,土壤水分亏缺补偿度则农地最高,为22.33%,杏树最低,为10.03%,其次序为农地>侧柏>苜蓿>油松>枣>杨树>柠条>刺槐>荒坡>杏。0~2m土层内,农地的土壤水分亏缺补偿度最高为46.4%,刺槐最低,为27.9%,其次序为农地>油松>枣>苜蓿>杨树>侧柏>杏>柠条>荒坡>刺槐,而2~5m土层内,各种植被的土壤水分恢复度均很低,杏树甚至出现负补偿,这是由于杏树耗水量大,过分消耗了土壤深层水分,天然降水有限的入渗量在补偿上部土层贮水亏缺后,没有多余的水分继续向下运移补偿,使土层中、下部产生一个相对干燥(水势较低)层次,从而使更深层水分不断向这一水势相对较低的层次移动的结果。

3.3.2 不同降水年份同一植被土壤水分的补偿和恢复

由于陕北黄土区降水年际变化幅度大,雨季过后同一植被的土壤贮水增量、降水补偿深度与土壤贮水亏缺的补偿、恢复程度,因雨季降水量的而存在较大差异。从图5可以看出,在丰水年(年降水量达483.4mm,雨季降水量301.5mm),柠条林地主要根系分布层土壤贮水增量较大,而下层则急剧减少、丰水年土壤贮水补偿深度仅1.0m,0~5m土层贮水亏缺补偿度在0.31%~84.84%之间,平均补偿度只有15.16%,即土壤贮水亏缺量的84.84%仍未得到补偿恢复;干旱年(年降水量297.5mm,雨季降水量119.2mm)土壤贮水补偿深度只有0.6m,贮水亏缺补偿度在0.64%~42.53%之间,0~5m土层雨季土壤贮水增量为23.9mm,比丰水年的75.7mm少51.8mm,平均补偿度只有4.94%,即

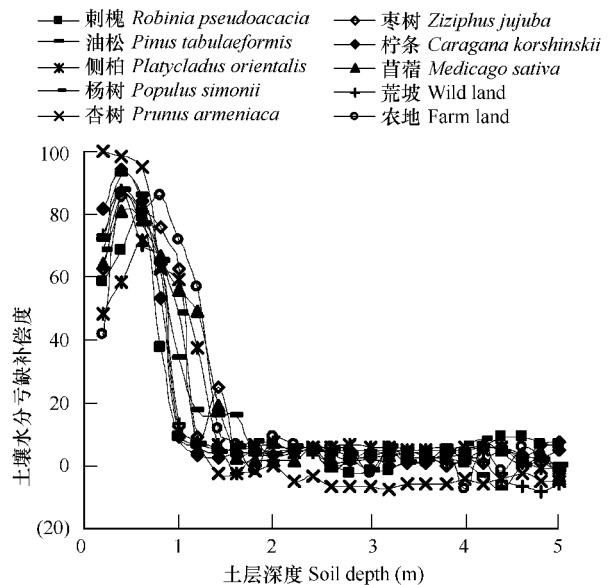


图4 雨季末不同植被的水分补偿度比较

Fig. 4 Soil water compensation degree in different vegetations at the end of rainy season

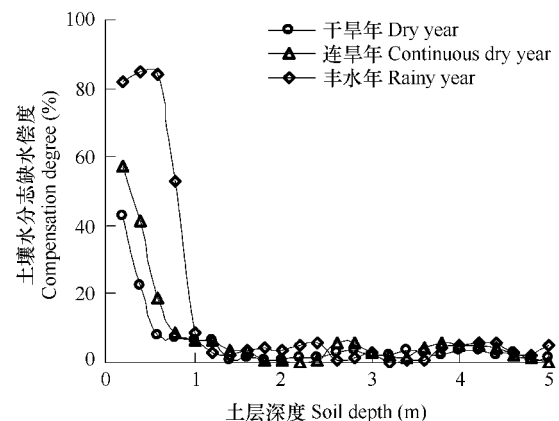


图5 不同降水年份柠条地的水分补偿度

Fig. 5 Soil water compensation degree in Caragana korshinskii site in different rainfall years

土壤贮水亏缺量的 95.06% 无法得以补偿恢复。连旱年(年降水量 312.9mm, 雨季降水量 178.5mm), 因雨季降雨量比干旱年大, 土壤贮水补偿深度为 0.8m, 贮水平均补偿度 7.744%, 但 0~5m 土层贮水量减少了 6.3mm, 说明在连旱年尽管降雨量有所增加, 但柠条人工林地土壤贮水不仅未能得到补偿与恢复, 而且土壤贮水亏缺度进一步增大。经成对数据比较统计检验, 丰水年与干旱年、丰水年与连旱年的土壤贮水增量和贮水亏缺补偿度均有显著差异($P < 0.05$), 而干旱年与连旱年无显著差异。说明在自然条件下, 陕北黄土区人工林地的土壤贮水亏缺状况不能得到改善, 土壤干化现象也不可能有所缓解。

4 结论

在陕北黄土区, 由于降雨量小、年际年内变率大, 陡坡地多年生植被土壤水分亏缺极为严重, 且不同降水年份有明显差异。贫水年 0~10m 土层贮水量仅相当于田间持水量的 26.2%~42.0%, 而丰水年也仅占田间持水量的 27.0%~43.3%; 年际间同一植被土壤剖面含水量的变化主要发生在 200cm 以上土层内, 变异程度随土层加深而减弱, 同一生长季内各种植被的土壤贮水量具有明显的季节变化特征。植被类型不同, 土壤水分亏缺的程度不同, 亏缺次序为: 柠条 > 刺槐 > 苜蓿 > 侧柏 > 杨树 > 油松 > 荒坡 > 杏 > 枣 > 农地。由于不同植被类型对土壤水分利用的深度和强度不同, 年际间土壤贮水量的增减幅度不同。同一生长季, 各种植被 0~120cm 土层含水量的变异系数都较大, 但植被间差异较小; 120cm 以下土层, 变异系数较小, 但植被间差异较大。

陡坡地多年生人工植被均存在永久干层。10m 土层内土壤剖面含水量均呈现“高-低-较高”到趋于稳定的特征, 但深层土壤干燥化强度因植物种类和生长年限而存在明显的差异。32 年生灌木柠条林的干层深达 10m, 乔木生态林的干层深度为 5.6~8.6m, 草木的干层深度为 6.6m, 略比经济林严重, 而荒坡地也因强烈耗水层的存在, 干层深度达到 6.0m, 但含水量明显高于其它植被。

雨季陡坡地多年生人工植被的土壤水分均有不同程度的补偿和恢复。丰水年雨水补偿的深度为 1.0~1.4m, 不同植被类型的土壤贮水增量和亏缺补偿度有较大差异。同一植被丰水年的雨水补偿深度比干旱年可增加 60cm 以上, 5m 土层贮水增量增加 3 倍以上。

在自然降雨条件下, 陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤贮水亏缺状况不能得到改善, 土壤干化现象也不可能有所缓解。因此, 建议采用降低植被群落密度, 控制群落生产力和修复水土保持工程等措施维持植物蒸腾耗水和土壤水分补偿之间的水分平衡, 实现群落的持续稳产、高产, 充分发挥其生态和经济效益。

References:

- [1] 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.
- [2] Wang M B, Li H J. Quantitative study on the soil water dynamics of various forest plantations in the Loess Plateau region in North-Western Shanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(2): 178—184.
- [3] Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest eco system in Loess area. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(4): 289—296.
- [4] Zhao H Y, Wu Q X, Liu G B. Studies on hydro-ecological effects of artificial Chinese pine stand in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 376—379.
- [5] Huang M B, Kang S Z, Li Y S. Evolution of moisture environment of small watershed in gully region of the Loess Plateau. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, 10(4): 411—414.
- [6] Yang W Z, Shao M A. Study on soil moisture on the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 2000, 30—114.
- [7] Li Y S. Effects of forest on water circle on the loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 427—432.
- [8] Sun C Z, Huang B L, Chen H B. Interaction between soil water conditions and different kinds of artificial plant cover in the Loess Plateau. *J of Beijing For Univ*, 1998, 20(3): 7—14.
- [9] Yang W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern region of China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(1): 78—84.
- [10] Hou Q C, Han R L. A preliminary study on dried soil layer problem of plantation site and grassland in Loess Plateau. *Water and Soil Conservation*

of China, 1999, (5):26—29.

- [11] Wang L, Shao M A, Hou Q C. Preliminary research on measured indexes of dried soil Layer. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 87—90.
- [12] Wang L, Shao M A, Hou Q C, *et al.* The analysis to dried soil layer of artificial Robinia pseudacacia forestry land in the Yanan Experimental Area. Acta Bot. Boreal-Occident. Sin., 2001, 21(1):101—106.
- [13] Mu X M, Xu X X, Wang W L, *et al.* Impact of artificial forest on soil moisture of the deep soil layer on Loess Plateau. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2):211—217.
- [14] Wu Q X, Yang W Z. Forest and grassland vegetation construction and its sustainable development in the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1998, 50—51.
- [15] Yang W Z, Tian J L. Essential exploration of soil aridization in Loess Plateau. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):1—6.
- [16] Hao M D, Wei X R, Dang T H. Effect of long-term applying zinc fertilizer on wheat yield and content of zinc in dryland. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3):377—380.
- [17] Wang J X, Huang B L, Luo W X. Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit planted forest site of the drought-prone Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11):2395—2401.
- [18] Duan Z H, Xiao H L, Song Y X. Soil Water Deficit and Control in Planted Forest in Lanzhou Suburb on Western Loess Plateau. Journal of Desert Research, 2006, 26(4):527—531.
- [19] Wang L, Shao M A, Wang Q J, *et al.* Comparison of Soil Desiccation in Natural and Acacia Forests in the Ziwuling Mountain of Loess Plateau. Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin., 2005, 25(7):1279—1286.
- [20] Wang L, Shao M A, Li Y Y. Study on Relationship between Growth of Artificial Robinia pseudoacacia Plantation and Soil Desiccation in Loess Plateau of Northern Shaanxi Province. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(1):84—91.
- [21] Wang Z Q, Liu B Y, Hai C X, *et al.* Analysis of soil water content of different vegetation types in the North-Western part of Shanxi Province. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(4):53—59.
- [22] Yang W Z, Yu C Z. Ecological Reconstruction and Evaluation of Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1991.

参考文献:

- [1] 李玉山. 黄土区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.
- [2] 王孟本, 李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究. 生态学报, 1995, 15(2):178—184.
- [3] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学, 1996, 32(4):289—296.
- [4] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 黄土高原人工油松林水文生态效应. 生态学报, 1996, 23(2):376—379.
- [5] 黄明斌, 康绍忠, 李玉山. 黄土高原沟壑区小流域水分环境演变研究. 应用生态学报, 1999, 10(4):411—414.
- [6] 杨文治, 邵明安, 编著. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000. 30—114.
- [7] 李玉山. 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 2001, 16(5):427—432.
- [8] 孙长忠, 黄保龙, 陈海滨, 等. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(3):7—14.
- [9] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32(1):78—84.
- [10] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕峰. 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.
- [11] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探. 水土保持学报, 2000, 14(4):87—90.
- [12] 王力, 邵明安, 侯庆春, 等. 延安试区人工刺槐林地的土壤干层分析. 西北植物学报, 2001, 21(1):101—106.
- [13] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 等. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(2):211—217.
- [14] 吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998. 50—51.
- [15] 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.
- [16] 郝明德, 魏孝荣, 党廷辉. 旱地小麦长期施用锌肥的增产作用及土壤效应. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):377—380.
- [17] 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. 生态学报, 2004, 24(11):2395—2401.
- [18] 段争虎, 肖洪浪, 宋耀选. 黄土高原西部兰州市郊人工林地水分亏缺与调控研究. 中国沙漠, 2006, 26(4):527—531.
- [19] 王力, 邵明安, 王全九, 等. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比. 西北植物学报, 2005, 25(7):1279—1286.
- [20] 王力, 邵明安, 李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究. 林业科学, 2004, 40(1):84—91.
- [21] 王志强, 刘宝元, 海春兴, 等. 晋西北黄土丘陵区不同植被类型土壤水分分析. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4):53—59.
- [22] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1991.