

# 半干旱黄土区水平阶整地人工油松林地 土壤水分和养分状况

李萍, 朱清科, 谢静, 王晶, 王露露, 郑学良

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室 北京林业大学, 北京 100083)

**摘要:** 水平阶整地是半干旱黄土高原丘陵沟壑区普遍应用的一种抗旱造林措施。为研究水平阶整地措施对人工油松林的影响,对 20 a 高密度人工油松林样地的土壤水分和养分状况进行了研究。结果表明,雨季末各样地 0—160 cm 土层的平均土壤含水量为 5.43%,其中 0—60 cm 土层为 6.94%,60—160 cm 土层为 4.53%,雨季对各样地的土壤水分补给量很小;碱解氮、速效磷、速效钾、有机质和全氮具有表聚性,尤其是 0—10 cm 土层表聚性显著,全磷和全钾表聚性不明显;各样地 pH 值均大于 8;0—100 cm 土层的全磷、速效磷、全钾和速效钾平均含量为中等水平,有机质、全氮、碱解氮为低或很低水平。结果说明在半干旱黄土区降水量不足的情况下,人工植被密度如果过大,会恶化土壤水分和养分的状况,所以人工疏伐就成了人工林后期管理和经营中必要的环节。

**关键词:** 水平阶; 低效林; 土壤水分; 土壤养分; 密度; 疏伐

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0060-06

中图分类号: S225.91<sup>+2</sup>

## Soil Moisture and Nutrient Levels in Artificial *Pinus Tabulaeformis* Forest by Level Terracing in Semiarid Loess Plateau

LI Ping, ZHU Qing-ke, XIE Jing, WANG Jing, WANG Lu-lu, ZHENG Xue-liang

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification

Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Level terracing is a common forestation practice in the semiarid hilly-gully area of the Loess Plateau in China. To study the impacts of the practice on artificial forests, soil moisture and nutrient condition in a 20-year-old dense artificial *Pinus tabulaeformis* forest was evaluated. The average soil moisture content at the end of rainy season was found to be 6.94% in the 0—60 cm layer and 4.53% in the 60—160 cm layer, while it was 5.43% in the whole soil profile (0—160 cm). This indicates that the soil moisture level is not replenished significantly during rainy season. Alkali solution N, available P and K, organic matter, and total N were significantly concentrated within 10 cm of soil surface, while total P and K showed insignificant surface accumulation. The pH values at all sites were higher than 8. The average contents of total P and K and available P and K in the 0—100 cm layer were all in middle level, but the average contents of organic matter, total N, and alkali-solution N were low or very low. Result from the study suggests that in the semiarid Loess Plateau with insufficient precipitation, dense artificial forest may lead to soil moisture and nutrient condition deteriorating and that artificial thinning is an important work in later stage management of artificial forests.

**Keywords:** level terracing; low-benefit forest; soil moisture; soil nutrient; density; artificial thinning

黄土高原地形破碎、沟壑纵横,生态环境脆弱,受到了全世界生态学者们的关注<sup>[1-2]</sup>。植被恢复是防止土地退化、控制水土流失、彻底改善生态环境的根本性措施<sup>[3]</sup>,但如果树种选择不当或者立地条件利用不

合理,就会降低生态恢复的效果<sup>[4]</sup>。在黄土高原半湿润区、半干旱区和半干旱偏旱区,各类林地、草地和农田 0—10 cm 土层普遍存在不同程度的土壤干燥化<sup>[5]</sup>,土壤水分条件的恶化不仅对现存植被的生长极

收稿日期:2011-08-18

修回日期:2011-09-16

资助项目:“十二五”林业科技支撑计划项目“黄土及华北石质山地水土保持林体系构建技术研究与示范”(2011BAD38B06)

作者简介:李萍(1973—),女(汉族),山东省潍坊市人,博士研究生,主要从事生态恢复、复合农林系统研究。E-mail:liping\_bjfu@hotmail.com。

通信作者:朱清科(1956—),男(汉族),宁夏回族自治区固原市人,教授,博士生导师,主要从事生态恢复、复合农林系统研究。E-mail:zhuqingke@sohu.com。

为不利,而且也在很大程度上影响后续植被的选择和生存,阻碍生态修复的植被恢复进程<sup>[6]</sup>。在干旱半干旱的黄土丘陵区,土壤水分是影响植被恢复和群落演替的主导因子<sup>[7-8]</sup>。在该区营造人工林,应该考虑土壤水分的补偿特征,注意采取适当的间伐措施,保持合理密度,以保证林木有足够的土壤水分营养面积<sup>[9]</sup>。水平阶是该区广泛应用的一种工程整地技术,它通过改变坡度,缩短坡长,从而有效地增加降水入渗,减少土壤侵蚀,提高自然降水的利用率,使光、温度、养分资源得以充分利用,林木生长接近当地生态条件下的最大生产力<sup>[10-11]</sup>。同时随着植被群落演替的进行,植被对环境的适应能力不断增强,植被群落不断改变着土壤水分和养分,并逐步达到稳定状态<sup>[7]</sup>。以往的研究主要针对水平阶整地对土壤水分或养分的影响<sup>[11-13]</sup>,关于该整地模式对人工林地的水分和养分的综合影响研究较少。本文以陕西省吴起县水平阶整地的 20 a 油松人工林地为研究对象,从土壤水分和养分的分布规律方面进行研究,以期综合分析人工整地模式对生态恢复的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

陕西省吴起县地处陕西北部,属半干旱黄土丘陵沟壑区,森林草原过渡带。该区位于东经 107°38′57″—108°32′49″,北纬 36°33′33″—37°24′27″,海拔 1 233~1 809 m,南北长 93.4 km,东西宽 79.89 km,总面积 3 791.5 km<sup>2</sup>,水土流失面积 3 702.2 km<sup>2</sup>,占土地总面积的 97.16%。该区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 7.8℃,极端最高气温 37.1℃,极端最低气温 -25.1℃,平均日照时数为 2 400 h。多年平均降雨量 483.4 mm,雨季集中在 7—9 月份,此期降水量占全年降水量的 50%~80%。多年平均陆面蒸发量 400~450 mm。非农地田间持水量一般在 21%~25%,土壤凋萎湿度 3%~5%,年平均无霜期 146 d。土壤类型主要为黄绵土,占全区总面积的 97.6%。

### 1.2 试验方法

胜利山阴坡和半阴坡从坡顶到坡底全部为 20 a 油松林,除沟坡外均采用水平阶整地。阳坡和半阳坡的整地模式和初植树种与阴坡、半阴坡相同,调查时已全部死亡,无自然更新的油松。油松林死亡后续种的山杏和沙棘混交林,密度较小,生长状况不良,未成林,半阳坡与半阴坡之间自然形成明显的分界线。为保证成活率初植时一般为 1 穴数株,2010 年 10 月下旬进行调查时发现实际成活率很高。采用标准样地法,共设置 9 个样地(其中 7 个为阴坡和半阴坡的油

松林样地,2 个为阳坡和半阳坡的山杏和沙棘混交林样地),分别记录海拔、坡度、坡向、坡位、整地模式等。在 7 个油松林样地各设置 1 个 10 m×10 m 的样方,对样方内林木进行每木(检尺)调查,分别测定树高(H)、胸径(D),并计算林分密度。在所有样地的样方中部连续 3 级水平阶上呈 S 形连续开挖 3 个剖面,按土层深度 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm 分层采集土样,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀在每层中间取原状土样,然后在 105℃ 烘箱内烘干至恒重,待冷却后称重,计算土壤容重。同时每个剖面分层采集土样 3 个,混合后进行土壤养分的测定。其中 pH 值采用 1:2.5 pH 计法;碱解氮采用碱解扩散法;速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 法;速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提—火焰光度法;有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法;全氮采用浓硫酸混合加速剂法;全磷采用 HClO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 法;全钾采用 NaOH 熔融法。土壤含水量的测定采用土钻取土与烘干法相结合的方法,分别测定 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—120,120—140,140—160 cm 共 8 层土壤水分,取样点与土壤养分测定的取样点一致。每个样地设置 3 个 20 cm×20 cm 的样方取枯落物混合后称重,然后 60℃ 烘干后再次称重,计算枯落物的含水量。

用 Excel 对数据进行处理和分析。

## 2 结果与分析

表 1 显示 1 号样地的胸径明显不同于其他样地,1 号样地平均胸径为 7.33 cm,平均树高为 6.63 m;其他 6 个样地油松林平均胸径为 4.04 cm,平均树高 4.63 m。说明平均胸径与林分密度关系密切,密度较小的 1,2,5 和 7 号样地的平均胸径均大于密度较大的其他样地,1 号样地密度最小,平均胸径明显高于其他样地。平均树高最大值也出现在密度较小的 1 号和 5 号样地,其他样地平均树高差异性不大。根据前人研究,陕西黄土高原油松 20 a 胸径和树高的平均值分别为 (7.56±0.28) cm 和 (6.51±0.18) m<sup>[14]</sup>,本研究中除 1 号样地平均胸径接近前人研究外,其他样地胸径和树高的平均值均显著低于前人研究,并且胸径方面差值较大,可以认为 1 号样地接近正常发育林地,其他样地为低效林。7 号样地 0—100 cm 土层平均容重最大,主要因为该样地土质为黄胶土,而其他样地均为黄绵土。7 号样地 0—160 cm 土壤含水量值最大,原因可能是 7 号样地坡脚的位置有利于土壤水分的集蓄,同时也与土壤质地有关。

表 1 样地基本状况

样地	海拔/ m	坡度/ (°)	坡位	坡向	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	油松林平 均胸径/cm	油松林平 均树高/m	平均土壤容 重/(g·cm <sup>-3</sup> )	平均土壤 含水量/%	枯落物/ (t·hm <sup>-2</sup> )	枯落物含 水量/%
1	1 494	18	坡顶	半阴	4 400	7.33	6.63	1.31	5.48	4.58	9.32
2	1 419	29	坡上	半阴	9 200	4.66	4.74	1.28	4.98	5.48	10.41
3	1 421	36	坡上	阴	12 600	3.89	4.77	1.31	5.42	46.95	17.84
4	1 393	30	坡中	阴	12 300	3.77	4.30	1.34	5.82	9.08	14.86
5	1 390	26	坡中	阴	8 900	4.41	5.06	1.29	4.92	9.08	11.92
6	1 404	19	坡中	半阴	11 900	3.47	4.56	1.24	4.67	17.21	14.73
7	1 373	14	坡下	半阴	7 500	4.01	4.34	1.46	6.25	4.69	8.86
8	1 413	26	坡上	阳	—	—	—	1.40	5.10	2.05	8.44
9	1 403	30	坡中	半阳	—	—	—	1.32	6.24	2.64	8.20

从图 1 可以看出上部土壤水分与其他样地相似,中下部突然增加,可能因为黄胶土土壤的凋萎湿度较大。采取水平阶整地的样地枯落物和枯落物的含水量与密度间关系密切,表现为密度较大的样地枯落物和枯落物的含水量也较大,尤其是 3 号和 6 号样地枯落物较多。4 号样地密度较大,枯落物含水量也较大,但该样地内小径级树木较多,枯落物较少。林内枯落物含水量较大说明林地密度较大时,林分郁闭度较高,通过土壤蒸散的水分很少,所以土壤水分的过量消耗主要由植被蒸腾所致。

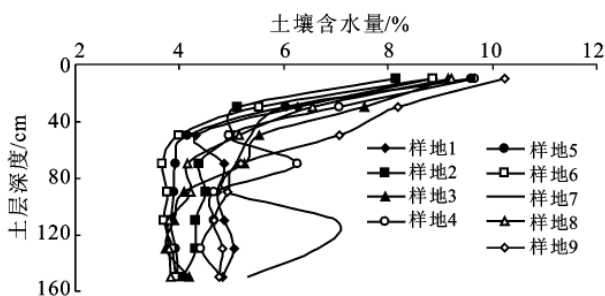


图 1 各样地 0—160 cm 土层土壤含水量分布

## 2.1 各样地土壤含水量分布规律

各样地 0—160 cm 土层的平均土壤含水量为 5.43%,其中 0—60 cm 土层为 6.94%,60—160 cm 土层为 4.53%。由图 1 可以看出,雨季末各样地 0—160 cm 土层的平均土壤含水量很低,0—60 cm 土层是一个快速减少的过程,然后大多一直维持在较低的水平,说明雨季对各样地的土壤水分补给量很小,而

且大多限于 0—60 cm 土层,雨季末各样地 60—160 cm 深层土壤含水量仅能维持在 4% 左右,接近凋萎湿度。0—160 cm 土层土壤含水量由高到低的顺序为:7 号>9 号>4 号>1 号>3 号>8 号>2 号>5 号>6 号样地;其中 0—60 cm 土层土壤含水量由高到低的顺序为:9 号>3 号>4 号>7 号>8 号>5 号>1 号>6 号>2 号样地;60—160 cm 土层土壤含水量由高到低的顺序为:7 号>4 号>1 号>9 号>2 号>3 号>8 号>5 号>6 号样地,顺序的变化说明各林地用水状况的不同(表 2)。1 号样地林分密度最小,但位于坡顶,所以表层(0—60 cm 土层)水分条件较差,但深层(60—160 cm 土层)水分条件较好;2 号样地密度大于 1 号样地,水分条件比 1 号样地差;3 号和 4 号样地密度相近,坡向相同,由于 4 号样地中小径级树木较多,对水分的需求相对较弱,所以 60—160 cm 土层土壤水分状况比 3 号样地好,但 3 号样地 0—60 cm 土层水分状况比 4 号样地好,可能是枯落物较多的原因;5 号样地胸径和树高值均较大,说明林分个体间对水分的需求强烈,所以土壤水分状况较差;6 号样地林相整齐,竞争激烈,所以水分状况很差,0—160 cm 土层土壤含水量最低;7 号样地 0—160 cm 土层土壤含水量最高,0—40 cm 土层土壤含水量迅速减小,但在 100 cm 以下有所增加,说明有深层土壤水分补充;8 号和 9 号样地位于阳坡和半阳坡,强烈的日照条件使土壤水分状况较差,尤其是深层土壤水分状况,说明原有的油松林衰败后土壤水分状况恢复较慢,位于半阳坡的 9 号样地比位于阳坡的 8 号样地水分状况好。

表 2 不同样地平均土壤含水量

土层/ cm	不同样地土壤含水量/%									样地 平均
	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号	9 号	
0—60	6.48	6.09	7.40	7.24	6.60	6.13	7.01	6.98	8.51	6.94
60—160	4.88	4.32	4.24	4.97	3.91	3.80	5.80	3.97	4.87	4.53
0—160	5.48	4.98	5.42	5.82	4.92	4.67	6.25	5.10	6.24	5.43

## 2.2 各样地土壤养分分布规律

将 9 个样地不同土层的各指标平均后发现,碱解氮、速效磷、速效钾、有机质和全氮具有表聚性,尤其是 0—10 cm 土层表聚性显著,全磷和全钾则表聚性不明显(表 3—4)。pH 值大于 8,表现为偏碱性。根据黄土高原丘陵沟壑区人工林地土壤肥力分级<sup>[15]</sup>,0—100 cm 土层的全磷、速效磷、全钾和速效钾含量为中等水平,有机质、全氮、碱解氮均为低或很低水平。温仲明等<sup>[16]</sup>对黄土高原丘陵区自然恢复 20 a 样地的土壤养分进行了测定,对比发现本研究 0—60 cm 土层的全磷含量与温仲明的研究结果均差异性不大;其他养分含量均大于温仲明的研究,其中有机质和全氮的含量差异性较小;碱解氮、速效磷和速效钾含量与温仲明的研究结果差异性大。到 40—60 cm 土层深度,碱解氮、速效磷和速效钾含量仍大于温仲明的研究结果,但有机质、全氮和全磷则表现为含量相近。可见,人工油松林地有利于速效氮、磷、钾的积累,对于全磷影响不大,全氮和有机质则是表层土壤

含量较高,40—60 cm 土层以下影响较小。林地对土壤营养成分的利用不仅限于表层土层,深层土壤养分的状况也严重制约着人工林地的生长发育。调查区人工油松林地密度过大导致对土壤水分的过量消耗,使深层土壤水分得不到有效补充,枯落物和动植物残体分解在表层形成的养分不能到达深层土壤,同时由于林分郁闭度较高,林下植被发育较差,结皮盖度较高,所以营养物质聚集在表层,显示很强的表聚性,人工林根系无法有效利用。深层土壤水分和有机质、氮素、速效磷的严重缺乏使油松林发育不良,形成了低效林。闫玉厚等<sup>[17]</sup>的研究发现,在演替初期,除磷元素外,人工植被下的其他土壤养分都较自然植被为高;但当植被恢复到 20 a 左右,人工植被群落的土壤养分含量则逐渐降低,土壤有机质含量则低于自然植被。主要是因为随着土壤水分的消耗,单纯的降水不能满足人工植被的需要,导致了人工林分生长受限或退化,这与本文的低效林形成原因是土壤水分被过量消耗

表 3 不同土层平均土壤养分剖面分布

土层/cm	pH 值	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )
0—10	8.027	100.242	15.158	142.286	11.232	0.660	0.573	16.739
10—20	8.060	44.190	11.525	77.704	7.169	0.431	0.560	16.934
20—40	8.091	22.413	6.588	70.528	4.501	0.256	0.559	16.820
40—60	8.098	30.196	5.629	63.158	3.763	0.245	0.532	16.770
60—80	8.116	18.522	6.588	62.479	3.263	0.228	0.544	16.966
80—100	8.125	22.338	5.834	62.770	3.727	0.226	0.513	16.942
平均	8.086	39.650	8.554	79.821	5.609	0.341	0.547	16.862

表 4 不同样地 0—100 cm 土层平均土壤养分

样地	pH 值	碱解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )
1	7.855	36.594	10.702	84.637	7.967	0.326	0.524	16.487
2	7.921	30.870	8.748	86.091	6.262	0.371	0.576	16.447
3	8.057	40.860	9.057	74.891	6.543	0.366	0.610	16.742
4	8.101	35.921	7.205	70.673	4.924	0.310	0.544	17.279
5	8.118	31.655	8.234	80.855	4.865	0.374	0.602	17.122
6	8.189	34.686	9.468	74.600	4.854	0.351	0.545	16.577
7	8.228	20.093	7.411	77.655	4.202	0.248	0.491	16.960
8	8.131	40.748	8.954	87.110	5.076	0.373	0.523	17.132
9	8.176	85.424	7.205	81.873	5.789	0.351	0.505	17.009

7 号样地 0—100 cm 土层有机质、全氮、碱解氮和速效磷含量明显低于其他样地,主要是因为该样地的土质为黄胶土,土壤容重大,土壤养分的含量低于其他样地,虽然土壤水分,尤其是深层土壤水分优于

其他样地,但通过植被对土质进行改善较困难。1 号和 2 号样地由于密度较小,尤其是 1 号样地有机质含量最高,pH 值最低。3 号样地密度较大,枯落物远高于其他样地,枯落物含水量也较高,有机质和碱解氮

的含量较高,但由于林分郁闭度高,枯落物的分解速度慢。4、5 和 6 号样地则养分状况差。8 号和 9 号样地为人工林地衰败后的山杏和沙棘混交林,密度较小,虽然位于阳坡和半阳坡,土壤水分状况比阴坡和半阴坡差,但土壤养分状况较好,尤其是 9 号样地的碱解氮含量远高于其他样地。由此可见,过大的油松林密度不利于土壤养分状况的改善。

### 3 讨论

水平阶整地模式是干旱半干旱黄土高原丘陵沟壑区增加蓄水量、减小土壤侵蚀的重要的水土保持工程措施,可以显著增加土壤,尤其是 40—180 cm 土层土壤的水分和养分的含量。在旱季,作物可以比坡面上利用更多的深层水分,减少蒸散损失<sup>[11]</sup>。对于林地,在造林初期减小的径流量会增加林地对降水的拦蓄,并提高土壤含水量,但随着林木的生长,林地的植被蒸腾量会增加,对土壤的补充量减小,所以在干旱半干旱地区的人工林地由于植被蒸腾作用的增加,不仅减少了对土壤含水量的补充,而且会减小河流的径流量,改变流域水文过程<sup>[18]</sup>。

自然演替过程中,如果可利用资源有限,群落中的个体生长就会受限,个体间竞争就会发生。在水分条件作为主要影响因子的干旱半干旱地区,竞争的最终结果是导致水分受胁迫的个体的死亡。受干旱胁迫的树木的死亡机理有两种:气孔关闭导致的碳缺乏死亡和导水失效死亡,都是由于受水分胁迫时植物体发生导水障碍造成的<sup>[19]</sup>。本研究涉及的生态恢复工程人工造林的前期造林密度都比较大,主要是水土保持的需要,另外前期林龄小,需水量小,所以水分过分消耗的问题不是很突出,此时人工林地会通过改善土壤的水分和养分状况,对生态环境起着积极的影响。但是随着树木的生长,资源的可利用量,尤其是供水量逐渐不能满足要求,植被的密度就应该适当减小,从而实现初植密度到经营密度的转变。由于水平阶上树木的树种相同、林龄相同、株行距相同、结构单一等原因使竞争自疏机制无法发生作用促使植被个体死亡,最终导致了低效林的发生。遇到气候干旱加剧,水分胁迫强烈时整个低效林的死亡就会发生,即使在立地条件较适宜的地区,如果种植密度过大,对水分的过度竞争也可能造成大面积的死亡<sup>[20-21]</sup>。侯庆春等<sup>[22]</sup>的研究发现黄土高原地区的低效林面积几乎占到黄土高原地区的 2/5,如此大面积的低效林死亡会对该区的生态环境造成严重影响。

王晗生<sup>[23]</sup>认为环境对植被起着决定性的作用,由于环境承载力的有限性,环境对植物的作用在干旱

半干旱地区尤为明显。通常有多大的环境承载力,就有多大的自然植被支撑量,超过支撑量的多余部分通过环境的筛选,也就是竞争机制被淘汰,这种更加强壮的,更加适应环境的个体的生存使植被群落更加稳定。在水分匮乏的半干旱地区,不同立地类型和微地形的存在可以导致水分分布的异质性,这种水分异质性是促进竞争的发生和自疏实现的根本条件。目前在该区配置的大量密度过大,生产力过高的人工林,本身造成了对水分的过量消耗,实际工作中恰恰又采取了水平阶等集雨措施,这种消除个体差异的人工干预方式导致了人工林无法通过个体竞争促使自疏发生,也使人工林自我更新演替无法进行。王青宁等<sup>[24]</sup>认为由于人工植物群落种的单一性,个体质量水平相当(尤其来源于营养繁殖的苗木),又分布均匀,占有相同的营养空间,因而竞争能力趋同,林木分化和自然稀疏不明显,个体与群体的矛盾比较突出,群落的整体衰落便是个体竞争的后果。人工植物群落反馈机制脆弱,自身调节能力比天然植物群落低,其种群密度不能完全依靠自然竞争来解决,只能更多地依靠人为进行适当调节。

所以在干旱半干旱黄土区,降水量不足的情况下,人工植被密度如果过大,会恶化土壤水分和养分的状况。为避免大面积低效林的衰败对生态环境造成严重影响,必须对现有林地进行人工的后期管理和经营,对现有发育不良的植被按照合理密度进行人工疏林改造;对于后续植被的配置重点则是研究如何充分利用水分分布的异质性,合理配置不同类型结构的植被。

### 4 结论

(1) 在雨季末各样地 0—160 cm 土层的平均土壤含水量为 5.43%,其中 0—60 cm 土层为 6.94%,60—160 cm 土层为 4.53%,雨季对各样地的土壤水分补给量很小,土壤水分的过量消耗主要是植被蒸腾所致的,并且油松低效林衰败后土壤水分状况恢复缓慢。

(2) 碱解氮、速效磷、速效钾、有机质和全氮具有表聚性,尤其是 0—10 cm 土层表聚性显著,全磷和全钾表聚性不明显;各样地 pH 值均大于 8,表现为偏碱性;0—100 cm 土层的全磷、速效磷、全钾和速效钾平均含量为中等水平,有机质、全氮、碱解氮为低或很低水平。人工油松林地有利于速效氮、磷、钾的积累,对于全磷影响不大,全氮和有机质则是表层土壤含量较高,40 cm 土层以下影响较小。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 唐克丽,张科利,雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报,1998,43(2):200-203.
- [2] Hessel R. Consequences of hyperconcentrated flow for process-based soil erosion modelling on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth Surf. Proc. Land, 2006, 31(9):1100-1114.
- [3] Oscar C. An analysis of externalities in agroforestry systems in the presence of land degradation[J]. Ecol. Econ., 2001,39(1):131-143.
- [4] Lamb D, Erskine P D, Parrotta J A. Restoration of degraded tropical forest landscapes[J]. Science, 2005,310(5754):1628-1632.
- [5] 李军,陈兵,李小芳,等. 黄土高原不同降水类型区林地、草地与农田土壤干化效应比较[J]. 土壤学报,2008,45(1):40-49.
- [6] 王志强,刘宝元,徐春达,等. 连续干旱条件下黄土高原几种人工林存活能力分析[J]. 水土保持学报,2002,16(4):25-29.
- [7] 焦峰,温仲明,焦菊英,等. 黄丘区退耕地植被与土壤水分养分的互动效应[J]. 草业学报,2006,15(2):79-84.
- [8] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, et al. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands[J]. Nature, 2002,418:623-625.
- [9] 杨文治,马玉玺,韩仕峰,等. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究[J]. 水土保持学报,1994,8(1):1-9.
- [10] 程积民,杜峰,万惠娥. 黄土高原半干旱区集流灌草立体配置与水分调控[J]. 草地学报,2000,8(3):210-219.
- [11] Liu Xiuhua, He Baolin, Li Zaoxia, et al. Influence of land terracing on agricultural and ecological environment in the loess plateau regions of China[J]. Environ. Earth Sci., 2011,62(4):797-807.
- [12] Dijk V A, Bruijnzeel L A. Terrace erosion and sediment transport model: A new tool for soil conservation planning in bench-terraced steep lands[J]. Environ. Model Softw., 2003,18(8/9):839-850.
- [13] 徐学选,张北赢,白晓华. 黄土丘陵区土壤水资源与土地利用的耦合研究[J]. 水土保持学报,2007,21(3):166-169.
- [14] 焦醒,刘广全. 陕西黄土高原油松生长状况及其影响因素分析[J]. 西北植物学报,2009,29(5):0867-0873.
- [15] 许明祥,刘国彬,卜崇峰. 黄土丘陵区人工林地土壤肥力评价[J]. 西北植物学报,2003,23(8):1367-1371.
- [16] 温仲明,焦峰,刘宝元,等. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2025-2029.
- [17] 闫玉厚,曹炜. 黄土丘陵区土壤养分对不同植被恢复方式的响应[J]. 水土保持研究,2010,17(5):51-53,58.
- [18] Cao Shixiong, Chen Li, Yu Xinxiao. Impact of China's Grain for Green Project on the landscape of vulnerable arid and semi-arid agricultural regions: A case study in northern Shaanxi Province [J]. Journal of Applied Ecology, 2009,46(3):536-543.
- [19] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? [J]. New Phytol., 2008,178(4):719-739.
- [20] Horner G J, Baker P J, MacNally R, et al. Mortality of developing floodplain forests subjected to a drying climate and water extraction[J]. Global Change Biology, 2009,15(9):2176-2186.
- [21] Klos R J, Wang G G, Bauerle W L, et al. Drought impact on forest growth and mortality in the southeast USA: An analysis using forest health and monitoring data[J]. Ecological Applications, 2009,19(3):699-708.
- [22] 侯庆春,黄旭,韩仕峰,等. 关于黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 I:小老树的分布及其生长特点[J]. 水土保持学报,1991,5(1):64-72.
- [23] 王晗生. 植被作用下土壤干化的反馈效应及相关问题讨论[J]. 地理科学进展,2007,26(6):33-43.
- [24] 王青宁,王晗生,周景斌,等. 植被作用下的土壤干化及其发生机制探讨[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(4):163-167.