

黄土丘陵半干旱区典型人工林土壤水分特征

徐敬华¹, 陈云明², 邓 岚¹

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 在黄土丘陵区选取不同林龄典型人工乔木林刺槐、灌木林沙棘、柠条, 并以经过 30 a 多自然演替形成的荒坡草地作为对照, 研究了人工林地土壤水分特点。结果表明, (1) 人工林地总体持水能力较差, 不同类型林地土壤持水能力顺序: 刺槐林 > 沙棘林 > 柠条林, 随着林分的生长, 土壤持水能力均有增强的趋势; (2) 土壤的导水能力随着林龄的增加有明显提高, 林龄较接近时, 刺槐林较沙棘林和柠条林饱和导水率大; (3) 随着林分生长, 林地土壤饱和含水量值增大, 林地蓄水能力增强; (4) 与荒坡对照相比, 人工林改善土壤持水、导水能力的效果不一定有生态系统自我修复作用形成的植被群落好。

关键词: 黄土丘陵区; 人工林; 土壤水分特征曲线; 饱和导水率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)03-0048-05

中图分类号: S157.2

Soil Water Characteristics of Artificial Forest Lands in Loess Hilly Region

XU Jing-hua¹, CHEN Yun-ming², DENG Lan¹

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou, Guangdong 510610, China;

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

Abstract: The soil water characteristics in typical artificial forest lands (*Robinia pseudoacacia*, *Hippophae rhamnoides*, and *Caragana intermedia*) with different ages and the slope grassland as contrast in the loess hilly region are studied. Results show that (1) soil water holding capacity in artificial forest lands is low and by soil water holding capacity, the artificial forest lands have the order of *Robinia pseudoacacia* > *Hippophae rhamnoides* > *Caragana intermedia*. Soil water holding capacity increases as the age increases. (2) Soil water conductivity increases significantly as the age increases and saturated hydraulic conductivity in *Robinia pseudoacacia* land is higher than that in *Hippophae rhamnoides* and *Caragana intermedia* lands at the matured stage. (3) The increase in the saturated soil water content is found with the increase in age. 4) Soil water holding capacity and conductivity in the artificial forest lands are not better than those in slope grassland repaired by itself.

Keywords: loess hilly region; artificial forest; soil water characteristic curve; saturated soil water conductivity

黄土丘陵沟壑区是黄土高原水土流失最为严重、气候相对干旱、生态环境十分脆弱的区域, 恢复重建植被是该区生态建设的核心内容。自 1998 年起, 国家在该区实施了大面积的退耕还林还草工程, 并取得了显著的防治水土流失和改善生态环境的成效^[1-2]。

然而, 由于黄土丘陵区水分条件相对较差, 植被恢复重建的难度较大, 部分人工植被存在生长缓慢, 过早衰退^[3], 生态效益低下等问题^[4], 甚至在一些人工纯林中出现了土壤性质极化的现象^[5], 土壤中也出现了难以恢复的“干层”现象^[6], 严重的可导致大片树木死亡, 这些问题的存在制约着人工林的稳定与可持续发展。

水分作为生态系统中最活跃的因素, 在荒漠化与其逆过程即生态恢复过程中, 起着决定性作用^[7-8]。有关黄土丘陵沟壑区林草地土壤水分的研究较多, 主要集中在林地土壤水分含量、地带性和非地带性分布特点、土壤水分生态分区和土壤干层及其形成等方面^[9-10], 对退耕后植被自然恢复条件下的土壤水分特征也有一定的研究^[11]。但有关人工林地土壤保持水分、供给水分的能力及其影响因子的相关研究则相对较少, 这也是探明植被—土壤相互关系, 植被改变土壤环境的重要内容。

为此, 我们在黄土丘陵半干旱区的陕西安塞县, 选择了该区 3 种典型人工林类型刺槐林、柠条林、沙

收稿日期: 2010-01-06

修回日期: 2010-02-01

资助项目: 陕西省科学院科技计划重点项目“陕北黄土丘陵区植被恢复及动植物多样性保护关键技术”(2008K-04); 国家科技支撑重点项目“植被优化配置与可持续建设技术”(2006BAD09803)

作者简介: 徐敬华(1982—), 男(汉族), 陕西省富县人, 硕士, 研究方向为植被恢复, 开发建设项目水土保持。E-mail: xujinghua168@126.com。

棘林,研究其主要土壤水力性质土壤水分特征曲线、饱和导水率、饱和含水量随林龄、林分类型的变化规律,以期为该区人工植被建设及管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验站的试验示范区内(109°19'E,36°51'N)。该区属典型梁峁状丘陵沟壑区,沟壑密度约为8.06 km/km²;气候属暖温带半干旱气候,年平均气温8.8℃,干燥度1.48,多年平均降雨量为497.0 mm,且存在着明显的旱季和雨季之分,其中6—9月为雨季,多年平均降雨量362.4 mm,占全年降水量的72%。土壤类型为黄绵土,研究区内大部分土壤是在黄土母质上发育而成的黄土幼年土—黄绵土,抗冲抗蚀能力差;在植被分区上属于暖温带森林草原过渡带,天然森林已破坏殆尽,人工乔木林以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和小叶杨(*Populus simonii*)等为主;灌木呈零星分布,主要有柠条(*Caragana intermedia*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等人工林灌丛以及封禁后形成的黄刺玫(*Rosa xanthina*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)等天然灌丛;草本中旱生草本植物群落占绝对优势,主要为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*A. giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等形成的草原和干草原。

2 研究方法

2.1 样地选择

在对纸坊沟流域、墩山试验示范区及县南沟流域的主要人工林详细调查的基础上,选取了土壤类型、

坡度、坡位较为一致的10~30龄刺槐林2个,14~50龄柠条林3个,14~24龄沙棘林2个作为研究样地,并以退耕30a多自然演替形成的芨蒿+铁杆蒿群落形成的草地作为对试样地(见表1)。

2.2 样品采集

在刺槐林地内选取100 m×100 m的标准样方,灌木林地内选取50 m×50 m的标准样方,对试样地内随机选取3个1 m×1 m的样方。在林地样方中部延等高线方向挖3个土壤剖面,对试样地每个样方挖一个剖面,每个剖面上用100 cm³的环刀分别在0—20, 20—40, 40—60 cm每层采取2个原状土样,一个用来测定土壤水分特征曲线,另一个用来测定饱和导水率。

2.3 室内分析方法

饱和含水量采用环刀法^[12-13],土壤水分特征曲线测定采用离心机法^[14],所用离心机为日产CR21G型高速冷冻离心机,测定时温度设定为20℃,不同水吸力,转速及离心时间对应关系见表2。

在测定之前,首先使环刀中的原状土水分达到饱和状态,其处理方法与环刀法测定饱和含水量的方法相同。

饱和导水率采用定水头法,为了使不同温度下所测得的饱和导水率(K_s)值便于比较,按式(1)换算成10℃时的饱和导水率(渗透系数)。

$$k_{10} = \frac{k_t}{0.7 + 0.03t} \quad (1)$$

式中: k_{10} ——温度为10℃时的饱和导水率(渗透系数)(mm/min); k_t ——温度为 t (℃)时的饱和导水率(mm/min); t ——测定时水的温度(℃)。

表1 林地基本情况

群落名称	坡度/坡向/ (°) (°)	坡位	平均胸径/ cm	平均树高/ cm	平均冠幅/ cm ²	造林密度/ m ²	地上生物量/ (g·m ⁻²)	枯落物量/ (g·m ⁻²)	林下植被
10龄刺槐	31 115	梁峁坡中上	20	610	150×225	2×3	1 357	262	芨蒿
30龄刺槐	31 139	梁峁坡中上	35	906	330×280	2×3	6 763	226	长芒草+阿尔泰狗娃花
14龄柠条	26 165	梁峁坡中	—	155	174×171	4×15	189	82	芨蒿
24龄柠条	24 154	梁峁坡中上	—	170	167×159	2×15	630	109	芨蒿+铁杆蒿
50龄柠条	26 210	梁峁坡中下	—	161	145×127	2×15	751	124	芨蒿+铁杆蒿
14龄沙棘	30 59	梁峁坡中上	20	302	215×180	1×15	3 309	260	臭草+铁杆蒿
24龄沙棘	32 66	梁峁坡中下	24	375	225×260	1×15	3 497	330	铁杆蒿+长芒草

注:阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr); 披针苔(*Carex lanceolata*); 臭草(*Chenopodium ambrosioides*)。

表2 应用高速离心机对应不同水势下的转速及时间

水吸力/10 ⁵ Pa	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
转速/(r·min ⁻¹)	0.98	1.39	1.96	2.40	2.77	3.10	4.39	6.20	7.60	8.77	9.60
时间/min	26	36	45	51	55	58	68	77	83	87	93

3 结果与分析

3.1 人工林地土壤水分特征曲线

土壤水分特征曲线是研究土壤水分特征的重要工具,它既可以反映土壤保持水分的状况,又可以表现土壤水分的数量与能量之间的关系^[15-16]。实测的水分特征曲线反映了土壤含水量与土壤水吸力之间存在着幂函数关系,其方程式为:

$$S = AS^{-B} \quad (2)$$

式中: S ——土壤吸力(10^5 Pa); S_w ——土壤含水量(%); A, B ——参数。方程中的参数 A 决定了曲线的高低,即持水能力大小, A 值越大,持水能力越强;参数 B 决定曲线的走向,即土壤含水量随土壤水势降低而递减的快慢。土壤所能保持或释放出的水量在低吸力范围内取决于土壤结构较粗的孔隙分布,主要是毛管力起作用,在中高吸力段主要决定于土壤质地,主要是土壤颗粒的表面吸附起作用^[13]。林分改

变林地土壤水分特征主要是通过林木根系实现的,林木的根系处在不断的变化之中,根系对土壤的穿插,以及其死亡、腐烂、再生等过程构成改良土壤理化性质的主要因素^[17]。

3.1.1 刺槐林地土壤水分特征曲线 不同林龄刺槐林地土壤水分特征曲线如图 1,拟合方程见表 3,结合图 1 和表 3 可以看出,10 龄刺槐林地各层土壤特征曲线差异较小,而 30 龄刺槐林地各层的土壤水分特征曲线差异明显,且随着土层增加,土壤持水能力有增强的趋势。10 龄林地拟合方程中 A 的均值为 12.193, B 的均值为 0.320;在 30 龄林地中, A 均值为 17.69, B 均值为 0.242。随着林分的生长,林地土壤持水能力特征在土壤剖面发生较大变化,各土层之间的差异更加明显。说明随着林龄的增加,刺槐林分的结构和功能等在逐渐发生着变化,特别是地下根系的变化进一步改善了土壤的物理、化学性质,使得土壤的持水能力发生较大变化。

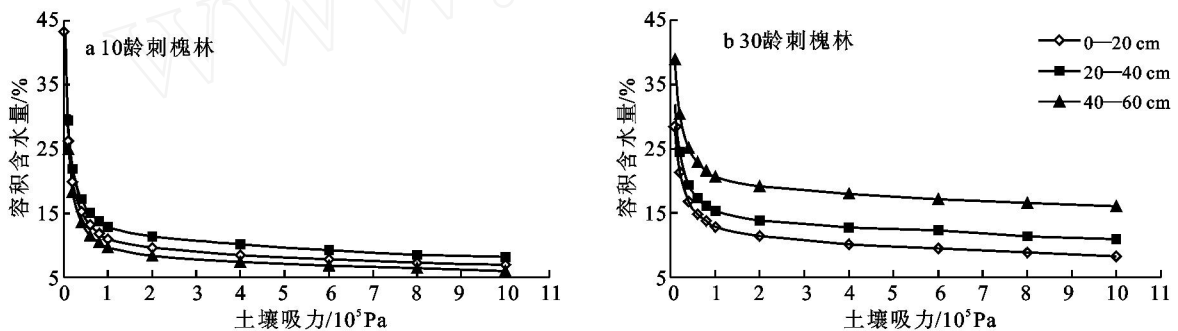


图 1 刺槐林地土壤水分特征曲线

表 3 刺槐林地土壤水分特征曲线拟合

林地类型	土层/cm	拟合方程	相关系数
10 龄 刺槐林	0—20	$= 12.032S^{-0.317}$	- 0.973
	20—40	$= 13.937S^{-0.297}$	- 0.969
	40—60	$= 10.611S^{-0.345}$	- 0.967
30 龄 刺槐林	0—20	$= 13.890S^{-0.282}$	- 0.966
	20—40	$= 16.721S^{-0.245}$	- 0.943
	40—60	$= 22.454S^{-0.199}$	- 0.926

3.1.2 柠条林地 各林地土壤水分特征曲线如图 2 所示,拟合方程见表 4。可以看出,14 龄柠条林地各层土壤水分特征曲线差异较小而 24 龄、50 龄各层差异较大,且与刺槐林地相似,基本上呈现出随土层加深土壤持水能力增强的趋势(图 2)。14 龄林地 A 均值为 12.516, B 均值为 0.319;24 龄林地 A 均值为 12.588, B 均值为 0.320;50 龄柠条 A 均值为 15.129; B 均值为 0.296。

随着林龄的增长,林地土壤的持水能力变化明显,特别是在从 24 龄到 50 龄阶段内变化很大。这说明柠条林从 24 龄到 50 龄林发育过程中林地土壤结构变化大,使得土壤孔隙的结构组成更有利于保持土壤水分。

表 4 柠条林地土壤水分特征曲线拟合

样地类型	土层/cm	拟合方程	相关系数
14 龄 柠条林	0—20	$= 11.590S^{-0.348}$	0.920
	20—40	$= 12.616S^{-0.321}$	0.942
	40—60	$= 13.344S^{-0.291}$	0.928
24 龄 柠条林	0—20	$= 10.697S^{-0.360}$	0.970
	20—40	$= 14.051S^{-0.276}$	0.944
	40—60	$= 13.017S^{-0.321}$	0.963
50 龄 柠条林	0—20	$= 14.191S^{-0.275}$	0.962
	20—40	$= 17.174S^{-0.274}$	0.953
	40—60	$= 14.021S^{-0.340}$	0.985

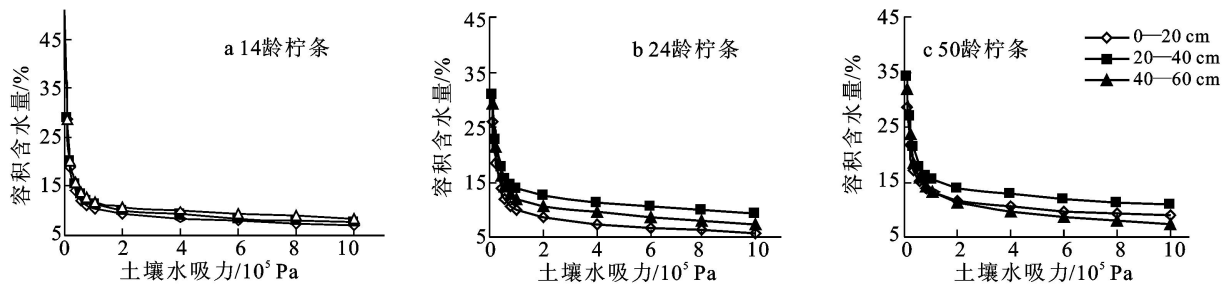


图 2 柠条林地土壤水分特征曲线

3.1.3 沙棘林地 试验区内的沙棘林多分布在阴坡,林分都已郁闭,枯落物量较大。各林地土壤水分特征曲线如图 3 所示,拟合方程见表 5。可以看出,24 龄沙棘林地各层土壤水分特征曲线较 14 龄林地各层差异明显,且随土层加深土壤持水能力有增强的趋势。14 龄林地 A 均值为 11.823, B 均值为 0.309;24 龄沙棘林地中 A 均值为 17.455, B 均值为 0.220。说明随着沙棘林龄的增加,林地土壤结构变化使得土壤持水能力增强,且土壤含水量随土壤吸力的变化率减慢。

表 5 沙棘林地土壤水分特征曲线拟合

样地类型	土层/cm	拟合方程	相关系数
14 龄沙棘林	0—20	$= 13.245S^{-0.273}$	0.925
	20—40	$= 11.363S^{-0.344}$	0.944
	40—60	$= 10.862S^{-0.320}$	0.948
24 龄沙棘林	0—20	$= 20.603S^{-0.191}$	0.974
	20—40	$= 16.900S^{-0.222}$	0.981
	40—60	$= 14.863S^{-0.248}$	0.928

3.1.4 不同类型林分土壤水分特征曲线比较 为了便于比较不同类型林分的土壤持水能力,把土壤水分特征曲线拟合方程中的参数 A 和 B 进行了基本的参数统计,并与荒坡对照样地进行了比较,结果见表 6。由参数 A 的统计可以看出持水能力的顺序为:荒坡 > 刺槐 > 沙棘 > 柠条,说明草地改善土壤持水能力较乔木林强,而乔木林较灌木林强,这与杨永辉等^[13]在南宁黄土丘陵区得出的结论较为相似。各类型林分林龄和土层间持水能力变异大小为:刺槐 > 沙棘 > 荒坡 > 柠条。由参数 B 可以看出随着水吸力的变化,含水量变化快慢的顺序为:柠条 > 刺槐 > 沙棘 > 荒坡,说明林分对土壤结构产生的改变与林分本身的特性关系密切。与荒坡对照相比,刺槐林地、沙棘林地的土壤持水能力较强而柠条林较差,而且人工林地土壤含水量随水吸力的变化也比荒坡对照强烈,也就是说人工林地在改善土壤的持水性能的效果不一定较自然群落好。

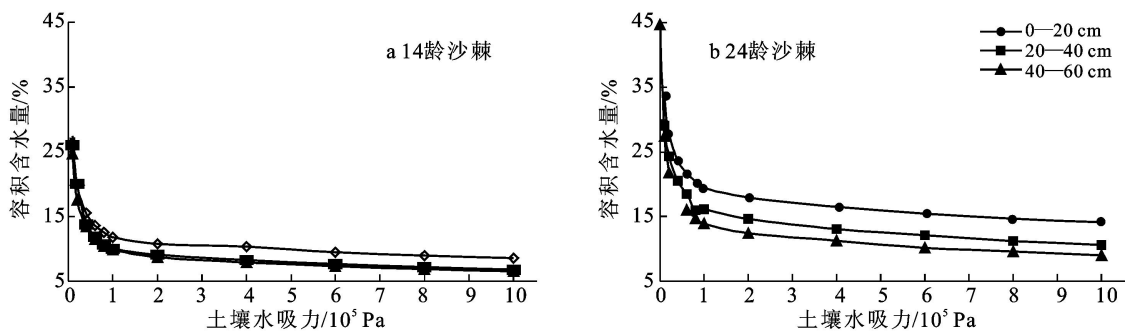


图 3 沙棘林地土壤水分特征曲线

表 6 不同类型林分土壤水分特征曲线拟合参数的变异性

类型	统计例数	最小值		最大值		平均值		标准差		变异系数	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
刺槐林	6	10.611	0.199	22.454	0.345	14.941	0.281	4.216	0.052	0.282	0.186
柠条林	9	10.697	0.274	17.174	0.360	13.522	0.312	1.910	0.034	0.141	0.108
沙棘林	6	10.862	0.191	20.603	0.334	14.639	0.265	3.679	0.056	0.251	0.210
荒坡林	3	15.203	0.188	21.896	0.269	17.665	0.240	3.680	0.045	0.208	0.012

3.2 人工林地土壤饱和导水率

一般来说,林分都有增加土壤入渗的作用。一是枯枝落叶积累避免了地表结皮的形成及土壤表层硬化,同时枯枝落叶的分解,增加了土壤中有机质含量,改善了土壤理化性质。二是根系的穿透和腐烂作用,增加了土壤孔隙度,改善了土壤结构。土壤的饱和导水率是表征土壤入渗性能的重要指标,由图 4 可以看出,人工林地表层土壤饱和导水率大,多数在 1 mm/min 以上,随着土层加深,土壤的饱和导水能力在下降,表层和下面两层差异非常大,特别是在 50 龄柠条林地,表层饱和导水率是 20—40 cm 层的 3.4 倍,说明人工林地表层土壤结构发育,孔隙较多。随着林龄的增加,土壤的导水能力有了明显提高:30 龄刺槐林地饱和导水率平均值是 10 龄刺槐的 1.6 倍,50 龄柠条林分别是 24 龄、14 龄柠条林地的 1.9 倍和 2.1 倍,24 龄沙棘林地是 15 龄的 1.2 倍;不同类型林分比较,柠条林地饱和导水率较大,沙棘林次之、刺槐林较小。因此,人工林改善土壤入渗性能的作用明显,随着林龄增长,土壤饱和导水率增大。与荒坡地相比,除 10 龄刺槐林外,人工林地表层土壤饱和导水率较荒坡地大。

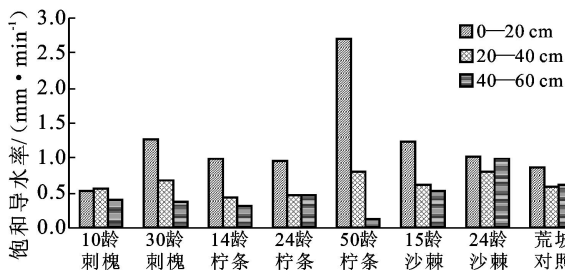


图 4 样地土壤饱和导水率

3.3 人工林地土壤饱和含水量

饱和含水量是“土壤水库”库容值,掌握饱和含水量状况即可大体上了解土壤的持水特性和释水性质,对土壤剖面的水分含量计算、推求土壤给水度等都是一个重要指标。对人工林地及荒坡对照各层土壤饱和含水量的测定见表 7。总体而言,人工林地饱和含水量随土层加深而下降,0—20 cm 层平均土壤饱和含水量为 48.3%,标准差为 3.19,变异系数为 0.07;20—40 cm 层均值为 42.0%,标准差为 3.18,变异系数 4.28;40—60 cm 层均值为 40.1%,标准差为 4.14,变异系数为 0.10。随着林龄的增加人工林地的土壤饱和含水量成上升趋势,在刺槐林地,30 龄饱和含水量是 10 龄的 1.05 倍;在柠条林地,50 龄分别是 24 龄、14 龄的 1.08 倍和 1.05 倍;在沙棘林地,24 龄是 15

龄的 1.01 倍。随着林分的生长林地土壤饱和含水量增加,说明随林龄增长,土壤的蓄水能力提高,对地表、地下径流调控能力增强,而且,30 龄刺槐林地 > 24 龄柠条林地 > 24 龄沙棘林地 > 荒坡对照。

表 7 林地土壤饱和含水量 %

林地类型	土层		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
10 龄刺槐林	44	40	47
30 龄刺槐林	51	44	42
14 龄柠条林	53	40	40
24 龄柠条林	49	39	42
50 龄柠条林	49	51	40
14 龄沙棘林	45	40	40
24 龄沙棘林	47	40	39
荒坡对照	39	41	42

4 结论

(1) 土壤含水量与土壤水吸力之间的关系符合幂函数 $= AS^{-B}$,但参数 A 平均值为 14.674,表明人工林地总体持水能力较差;不同类型林分土壤持水能力顺序为:刺槐林 > 沙棘林 > 柠条林;随着土层加深、随着林龄的增长,林地土壤持水能力均有增强的趋势。

(2) 人工林地表层土壤入渗能力强,饱和导水率多在 1 mm/min 以上,随着土层加深土壤的入渗性能明显下降,而随着林龄的增加,土壤的导水能力有明显提高,30 龄刺槐林较 24 龄沙棘林和 24 龄柠条林饱和导水率大,且人工林地饱和导水率较荒坡对照大。

(3) 人工林地土壤饱和含水量随林龄的增加而增大,且刺槐林地 > 柠条林地 > 沙棘林地 > 荒坡对照。

随着林龄的增长,人工林地土壤的持水、导水能力及蓄水能力有所增强,与荒坡对照相比,人工恢复的植被改善土壤持水、导水能力的效果不一定有按照自然演替规律,通过生态系统自我修复作用形成的植被群落好,在进行人工植被建设时要遵循客观规律,做到适地适树适林,真正起到促进自然恢复,使生态系统进入良性循环的作用。

林分改变土壤水分特征是一个长期而复杂的过程,本文只表明了各类型林分林地土壤的水分特征,对于林分生长特征对林地土壤水土特征的作用机理及量化指标有待于进一步研究。

(下转第 91 页)

级普查机构,主要负责完成气象资料收集,协助做好水土流失野外调查单元范围划定。

(2) 2011年全面实施普查、数据质量检查与审核、数据报送等。县级普查机构主要负责野外调查单元水土流失调查,侵蚀沟道实地核实和水土保持措施统计登记等;省级普查机构主要负责野外调查单元水土流失数据处理,侵蚀沟道提取,水土保持措施数据审核论证等;流域机构主要负责全国侵蚀沟道数据汇总,流域数据抽样评估与审查,技术支持等,水土保持专项工作组和技术协作机构负责技术支持,问题研究与解决方案制订,数据初步汇总处理等。

(3) 2012年数据汇总、结果论证和成果整编发布等,主要由水土保持普查专项工作组、流域机构、技术协作机构等共同完成。

4 普查预期成果

水土保持普查成果包括反映全国水土流失、侵蚀沟道、水土保持措施以及相关影响因素的图件、表格、文字报告和数据库。

(1) 普查报告。全面总结普查工作的组织、实施和技术等,分析我国水土流失及其治理的布局、数量和动态变化。

(2) 普查图件(册)。针对不同范围、不同管理需要,按照全国、流域、行政区划制作相关图件(册),为小流域综合治理、区域水土保持规划、流域规划等提供不同分辨率下的数据支持。

(3) 普查数据库及其管理信息系统。数据库包括气象、地形、土壤、植被、措施等水土流失影响因素数据,水土流失、侵蚀沟道、水土保持措施的数据(包括空间数据和属性数据),普查获得的视频、影像和音像数据等。管理信息系统将实现普查数据的处理与上报、普查数据存储与管理、数据分析与评价、信息查询与应用等功能。

致谢: 本文是依据《第一次全国水利普查实施方案(试用稿)》的“水土保持普查”部分编写而成。在此,对指导和参与实施方案编写、研讨的全体人员表示衷心感谢!

(上接第52页)

[参 考 文 献]

- [1] 杨光,丁国栋,常国梁,等.黄土高原不同退耕还林地森林植被改良土壤特性研究[J].水土保持研究,2006,13(3):204-207.
- [2] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [3] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与可持续发展[M].北京:科学出版社,1998:1-10.
- [4] 梁一民,陈云明.论黄土高原造林的适地适树与适地造林[J].水土保持通报,2004,24(3):69-72.
- [5] 刘增文,段而军,付刚,等.一个新概念:人工纯林土壤性质的极化[J].土壤学报,2007,44(6):1119-1125.
- [6] 王力,邵明安,侯庆春,等.延安市区人工刺槐林地的土壤干层分析[J].西北植物学报,2001,21(1):101-106.
- [7] 上官周平.黄土区水分环境演变与退化生态系统恢复[J].水土保持研究,2005,12(5):92-94.
- [8] 杨文治,田均良.黄土高原土壤干燥化问题探源[J].土壤学报,2004,41(1):1-6.
- [9] 杨文治,马玉玺.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] 邹厚远,张信.关于黄土高原植被恢复的生态学依据探讨[J].水土保持学报,1995,9(4):1-4.
- [11] 赵世伟,周印东,吴金水.子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究[J].水土保持通报,2002,16(4):119-122.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所.土壤物理测定方法[M].北京:科学出版社,1978.
- [13] 华孟,王坚.土壤物理学[M].北京:北京农业大学出版社,1993.
- [14] 史竹叶,赵世伟.黄土高原土壤持水曲线的计算方法[J].西北农业学报,1999,8(6):44-47.
- [15] 雷自栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [16] Jary W A. Soil Physics[M]. Hoboken: John Wiley, 1991:61-64.
- [17] 李勇,朱显谟,田积莹.黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J].科学通报,1992,37(4):366-369.