

人工油松林系统水土保持功能的叠加效应*

赵鸿雁, 吴钦孝, 陈云明

(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 用理论分析和典型观测的方法研究了人工油松林系统水土保持功能的叠加效应。结果表明: 与荒坡灌草小流域相比, 人工油松林系统减小净雨作用明显; 对两次降水而言, 人工油松林系统对径流时间的滞后效应各为荒坡灌草的2.5倍和4.3倍; 对径流动能的减小效应分别为25.0倍和166.4倍; 对挟沙能力的减小效应分别为24.4倍和163.3倍。人工油松林系统能改良土壤, 使其抗冲、抗蚀性能提高, 此种双向作用使人工油松林发挥了良好的水土保持作用。

关键词: 人工油松林系统; 水土保持; 功能; 叠加效应

中图分类号: S714.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2001)04-0041-03

Accumulation Effects on Function of Soil and Water Conservation in Artificial Chinese pine Forest System

ZHAO Hong-yan, WU Qin-xiao, CHEN Yun-ming

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Accumulation effects of soil and water conservation function of artificial Chinese pine forest system have been studied by methods of theory analysis and typical measurement. The results showed compared with bare-slope and bush-grass catchment, the function that artificial Chinese pine forest system increased pure precipitation is evident, effects of artificial Chinese pine forest system to runoff time retarded is 2.5 and 4.3 times of bare-slope and bush-grass catchment, effects of artificial Chinese pine forest system to runoff kinetic increased is 25.0 and 166.4 times of bare-slope and bush-grass catchment, effects of artificial Chinese pine forest system to capacities of runoff carried sediment increased is 24.4 and 163.3 times of bare-slope and bush-grass catchment. Artificial Chinese pine forest system can improved soil structure resulting in soil anti-scourability and anti-erodibility, and its function made artificial Chinese pine forest system to take play a great role of soil and water conservation.

Key words: artificial Chinese pine forest system; soil and water conservation function; accumulation effect

迄今, 国内外关于森林保持水土功能的研究较多^[1,2], 多以森林不同层次(如冠层、地被物层和根层)为主进行的, 并且以静态研究为主^[3,4], 至今皆未涉及到森林系统保持水土功能, 表现在其不同层次同时、连续对次降水过程的影响。穿过冠层的雨滴进入林地地被物层后受其影响, 产、汇流和径流速度减小, 导致径流量、径流的侵蚀能量减小, 使径流携沙能量减小; 地表径流转化为地下径流量的比例增大, 土壤侵蚀量减小; 森林根系及地被物具有改善土壤理化性状, 提高土壤抗冲、抗蚀能力的巨大功能, 使土壤自身抵抗水土流失的能力增强。森林的这种双向调节功能对次降水过程同时、连续的作用, 便产生系统水土保持功能的叠加效应。对它的深入研究不仅可揭示森林系统保持水土的机理, 为防护林建设提供理论依据, 而且为西部生态环境重建中森林所发挥的巨大水土保持和生态环境效应提供正确的评价依据。

1 研究区自然概况

本试验位于陕西省宜川县铁龙湾林场, 地处黄龙山东北缘, 海拔1 500 m, 年平均气温9.8℃, 年降水量574.4 mm, 土壤为灰褐色森林土, 地带性植被为落叶阔叶林。观测的人工油松林为1963年建造, 分布于山坡的东、北、西北向, 初植密度6 000株/hm², 1983年进行间伐, 目前保存1 800株/hm², 平均树高9~10 m, 胸径10~11 cm, 郁闭度0.7~0.8。供观测的小流域包括人工油松林和荒坡灌草小流域。人工油松林小流域面积30.1 hm², 主沟道长400 m, 沟道比降0.125, 基岩类型为页岩, 土壤类型为灰褐土, 沟道走向北, 沟道面积0.10 hm², 梁峁坡

* 收稿日期: 2001-08-12 * 中国科学院知识创新重大项目资助(编号: KZCX1-06-01-03)

作者简介: 赵鸿雁, 男, 生于1962年, 博士, 副研究员。主要从事森林水土保持效益及水文生态环境效应研究。

面积 20.0 hm^2 , 沟坡面积 10.0 hm^2 , 梁峁坡所占小流域的空间几何比为 $2/3$ 。荒坡灌草小流域面积 10.0 hm^2 , 主沟道长 150.0 m , 沟道比降 0.135 , 沟道面积 0.04 hm^2 , 梁峁坡面积 6.8 hm^2 , 沟坡面积 3.16 hm^2 , 基岩类型为页岩, 土壤类型为灰褐土, 沟道走向东北, 梁峁坡所占小流域空间几何比为 $2/3$ 。

2 研究方法

在生长适中的人工油松林及林外, 放置自计雨量计; 在林冠下再放置雨量计, 并在承雨口中放一圆形沙网圈, 在其上铺设与林地一样厚(本试验为 2.0 cm)的枯枝落叶; 修建水平投影面积为 100 m^2 的径流小区, 测定径流量。当次降水发生时, 测定林冠截留、枯枝落叶截留、地表径流过程。调查林地人工造林坑穴的大小及其次降水时的填凹过程, 计算林地土壤入渗过程。

3 结果分析

3.1 森林系统叠加效应的理论

与荒坡灌草流域相比, 地表径流量的大小直接决定径流的汇流乃至携沙和冲刷能力的大小。由坡面径流速度计算公式: $v = k \cdot \alpha^a \cdot q^b$ (随系数和常数不同可分为层流、紊流等公式) 可知, 在 α 一定时, q 的变化使坡面径流速度呈非线性增加或减小, 正因为森林系统不同层次对大气降水同时、连续和协调的影响, 这种减小亦为非线性关系, 非线性减小径流量的结果使径流速度急剧减小, 径流在坡面上的汇流时间延长, 土壤入渗量增加, 地表径流量减小, 此双重作用导致径流能量和冲刷下切、挟沙的能力剧减, 从而显示了森林系统整体的叠加效应。其数理过程用下式描述。

设在次降水过程中, 林冠和枯枝落叶层的瞬间截留量分别为 dI/dt , dI_l/dt ; 因人工造林和坡面不均衡性损失的大气降水为 dp_c/dt , 土壤的瞬间入渗率是 dF/dt , 蒸散量为 dE/dt , 树干茎流率为 ds/dt , 则森林系统对次降水的总损失量用 Δ 表示, 则:

$$\Delta = dI/dt + dI_l/dt + dp_c/dt + dF/dt + dE/dt \quad (1)$$

按次降水率 dp/dt 和径流率 dR/dt 的变化, 由水量平衡方程得到下列方程:

$$dp/dt = \Delta + dR/dt \quad (2)$$

由于坡面不均衡性和人工造林坑穴的影响, 使坑穴的填满过程包含了树干径流, 枯枝落叶层下的净雨量, 坡面部分径流量。据此, 坡面坑穴及其不均衡性蓄满的过程为:

$$dp_c/dt = ds/dt + dp_l/dt + \beta \cdot dR/dt \quad (3)$$

式中: dp_l/dt ——枯枝落叶层下的降水率; β ——系数。

Δ 项是森林系统对净雨的损失率; 在地表径流损失的同时, 坡面径流速度减小; 受枯枝落叶层的作用, 坡面径流速度亦要减小, 这种双重的减小作用使径流在坡面上运动时间延长。可以看出, 森林系统的水土保持叠加效应包括3个方面, 即: 减小径流量, 径流时间滞后和减小径流能量的叠加效应。

3.1.1 径流量减小的叠加效应 由次降水损失的瞬间径流量 Δ 项可知, 径流率由原来的 dR/dt 变为:

$$dR/dt = dp/dt - \Delta \quad (4)$$

坡面薄层径流速度的计算公式为:

$$v_0 = k \cdot \alpha^a \cdot (dR/dt)^b \quad (5)$$

因森林系统的存在, 其薄层径流速度变为:

$$v_1 = k \cdot \alpha^a \cdot (dp/dt - \Delta)^b \quad (6)$$

假定 k 不变, 则因森林系统损失的径流量使径流速度减小, 地表径流转化为地下径流的量增加; 同时, 因森林系统中地表枯枝落叶的作用, 使地表径流速度减小, 延长径流流动的时间, 入渗量增加。正因为地表径流量受此类因子的多重影响, 使径流量急剧减小, 从理论上讲其瞬时减小量为:

$$L_a = k \cdot dR/dt + \Delta + f \quad (7)$$

3.1.2 时间滞后的叠加效应 人工油松林系统对时间的滞后包括径流产, 汇流时间, 洪峰时间和洪水时间延长等几个方面。总之, 时间滞后效应的数理方程为:

$$dR/dt(1 + Y) = dp/dt - \Delta$$

式中: Y 是坑穴对地表径流损失的比率, 取值为 $[0 \sim 1]$ 。该式左端是径流量变化率, 右端是净雨率变化率。

当 $Y = 1$ 时, 坑穴对地表径流完全容纳, 时间的滞后效应为100%;

当 $-1 < Y < 0$ 时, 坑穴对地表径流容纳一部分, 时间滞后效应为100%;

当 $dp/dt - \Delta > 0$ 时, 净雨的滞后效应为 $100 \times \Delta / (dp/dt) \%$;

当 $dp/dt - \Delta < 0$ 时, 净雨的滞后效应为 100% 。

3.1.3 径流能量减小的叠加效应 径流位能是转化为径流动能的源, 是土壤侵蚀潜在能力的度量指标, 在面积 S 、坡长 L 和坡度 α 一定时, 径流位能瞬时减小效应为:

$$E_{pR} = (k \cdot dR/dt + \Delta + f) / 2 \cdot s \cdot g \cdot l \cdot \sin\alpha$$

径流动能是冲刷、挟沙的主要动力, 它直接决定土壤的侵蚀强度。径流位能是由径流深和径流速度二者决定的。令枯枝落叶层、径流量减小等综合影响减小的径流速度为 Δv , 则:

$$E_{pm} = (k \cdot dR/dt + \Delta + f) / 2 \cdot \Delta v^2$$

3.2 人工油松林系统水土保持功能叠加效应分析

人工油松林系统水土保持功能包括林冠层、枯枝落叶层、土壤根系层。林冠和枯枝落叶层具有截留损失降水, 延长径流汇流时间, 防止土壤击溅侵蚀等功能, 因而使人工油松林小流域的产沙量很小, 径流量亦小。

3.2.1 人工油松林系统对净雨的减小量 与荒坡灌草小流域相比, 因人工油松林系统的结构复杂, 对大气降水的截持量较大(表1)。由表中所列出2次降水时的特征值, 计算得出: 对两次次降水而言, 人工油松林系统减小的净雨量分别为23.0 mm 和21.1 mm, 据调查因人工造林坑穴所减少的降水量为3.9 mm; 其它为冠层和枯枝落叶层截留量之和。对两次次降水而言, 荒坡灌草对大气降水的损失量较小, 仅为2.6 mm 和1.6 mm。

3.2.2 人工油松林系统对时间的滞后效应 由表1可见, 两流域洪水历时相差较大。对 N01次降水而言, 人工油松林和荒坡灌草小流域的径流量各为0.1 mm 和0.4 mm, 按坡面薄层径流公式: $v = k \cdot \alpha^{1/2} \cdot q^{2/3}$ 计算, 在 k, α 相同时, 荒坡灌草系统的径流速度比人工油松林系统径流速度大2.5倍, 又因 k, α 和流域大小的差异, 人工油松林的洪水历时为荒坡灌草的25倍多; 由 N02次降水可见, 两者的径流量各为0.3 mm 和2.7 mm, 前者是后者洪水历时的4.3倍, 可见叠加效应比 N01次降水更为明显。

3.2.3 人工油松林系统对径流能量影响的叠加效应

表1 人工油松林和荒坡灌草小流域降水、水文和泥沙值

流域类型	人工油	荒坡灌	人工油	荒坡灌
	松林 N01	草 N01	松林 N02	草 N02
降水量 (mm)	87.1	87.1	53.2	53.2
降雨强度 (mm/min)	0.323	0.323	0.443	0.443
林冠截留 (mm)	13.3	1.8	10.1	1.1
枯枝落叶截留 (mm)	5.8	0.8	7.1	0.5
坑穴填凹 (mm)	3.9	0.0	3.9	0.0
降水历时 (h)	4.5	4.5	2.0	2.0
洪水历时 (h)	13.6	5.0	19.6	3.0
洪水量 (m^3)	35.162	40.818	96.496	269.331
洪峰流量 (m^3/hm^2)	0.0037	0.012	0.024	0.118
洪水量/流域面积 (m^3/hm^2)	1.168	4.082	3.206	26.933
泥沙总量 (t/hm^2)	0.0001	0.0694	0.003	1.6722
树干茎流 (mm)	3.7	0.0	1.8	0.0
损失的净雨量 (mm)	23.0	2.6	21.1	1.6
水土流失量 (mm)	0.1	0.4	0.3	2.7

径流位能表示径流引起土壤侵蚀的潜在程度, 而径流动能是径流冲刷、挟沙能力的动力。据此, 计算单位面积上径流的动能。

$$E_{mR} = 1/2 \cdot s \cdot q \cdot v^2$$

式中: s 单位面积 (m^2); q 径流深 (mm); v 径流速度 (m/s)。

由此式可得出 N01、N02两次降水时, 荒坡灌草小流域的径流动能至少是人工油松林的25倍和166.4倍。

3.2.4 人工油松林系统对土壤侵蚀影响的叠加效应

由雅里加诺夫对径流挟沙能力的计算式可知:

$$p = A \cdot v^5 / (g \cdot h \cdot w)$$

式中: p 径流的挟沙浓度; h 径流深; v 径流速度; g 重力加速度; A 系数; w 泥沙的水力粘度。假定 A, w 一致。

由 N01、N02两次降水的比较研究得出, 荒坡灌草是人工油松林小流域挟沙的24.4倍和163.34倍。但从泥沙总量可见, 人工油松林小流域的泥沙远远低于荒坡灌草小流域。其主要原因是人工油松林地被物层(枯枝落叶层)和根系层^[5,6]对土壤侵蚀有抑制作用, 从而使人工油松林小流域土壤侵蚀量更小。

4 结 论

(1) 人工油松林系统减小径流量的叠加效应体现在林冠、枯枝落叶层的截留, 延长地表径流时间, 增加土壤入渗和坑穴填凹量。(2) 人工油松林系统对时间滞后的叠加效应体现在枯枝落叶层减小径流速度, 延长地表径流的流动时间, 其次是减少净雨深, 使地表径流速度减小。对两次次降水的研究得出, 人工油松林比荒坡灌草小流域径流速度减小2.5倍和4.3倍。(3) 人工油松林对径流能量减小的叠加效应主要体现在径流动能方面, 研究表明荒坡灌草单位面积的径流动能是人工油松林的25倍和166.4倍。(4) 荒坡灌草比人工油松林小流域挟沙能力大24.4倍和43.3倍。人工油松林根系层和地被物层提高土壤抗冲、蚀性能明显。正因为侵蚀能量减小和抗侵蚀能力提高的双向叠加效应, 使人工油松林土壤侵蚀量极小。

下转第58页

2.3 人工降雨条件下覆盖黄麻土工布的水土保持效应

1997年11月进行的人工降雨试验表明(表5),在降雨量为 $1.0\text{mm}/\text{min}$ 的中雨强条件下,盖布苜蓿小区比未盖布苜蓿小区推迟 $9\text{min}49\text{s}$ 产流。在 40min 的降雨时间内,盖布苜蓿小区累计径流量为 6.50L ,累计产沙量为 0.99g ,不同时间段的含沙率最高值为 $0.26\text{g}/\text{L}$,与未盖布苜蓿的累计径流量 147.00L ,累计产沙量 6424.97g ,不同时段最高含沙率 $64.26\text{g}/\text{L}$ 相比,盖布苜蓿小区的累计径流量、累计产沙量分别只占未盖布苜蓿小区的 4.50% , 0.16% ,减少百分率达到 95.58% 和 99.98% 。说明在中雨强条件下,黄麻土工布与苜蓿生长相结合控制土壤侵蚀的能力是相当强的。另外,盖布小区不同产流时间的径流量为 $0.25\sim 1.0\text{L}$,产沙量也仅有 $0\sim 0.33\text{g}$,与对照相比,盖布的产沙量几乎可以忽略。

表5 人工降雨条件下不同处理产流产沙过程(1997年)

时间 (min)	未盖布苜蓿处理			盖布苜蓿处理			盖布减少百分率		
	径流量(L)	含沙率(g/L)	产沙量(g)	径流量(L)	含沙率(g/L)	产沙量(g)	径流量(%)	含沙率(%)	产沙量(%)
产流时间	1min12s			11min1s			9min49s		
4	6.50	9.47	61.53				100	100	100
7	8.50	43.31	368.14				100	100	100
10	10.00	56.49	564.92				100	100	100
13	11.00	64.26	706.86	0.75	0.26	0.20	93.18	99.69	99.97
16	12.50	55.48	693.44	0.50	0.06	0.03	96.00	99.71	99.99
19	13.00	55.71	724.23	0.50	0.16	0.08	96.15	99.71	99.99
22	12.50	40.66	508.20	0.50	0.13	0.07	96.00	99.68	99.99
25	12.50	22.26	278.25	0.50	0.07	0.03	96.00	99.69	99.99
28	14.00	49.80	697.25	1.00	0.00	0.00	92.86	100.0	100.0
31	13.50	36.66	494.85	0.50	0.26	0.13	96.30	99.29	99.97
34	14.00	25.64	358.95	1.00	0.33	0.33	92.86	98.71	99.91
37	13.50	51.64	697.13	1.00	0.10	0.10	92.59	99.81	99.99
40	5.50	49.31	271.23	0.25	0.10	0.03	95.45	99.80	99.99
累计/平均	147.00		6424.97	6.50		0.99	95.58		99.98
停流时间	40min5s			41min3s					

参考文献:

- [1] 胡立勇,汪在芹,丁树文,等. 黄麻土工布控制土壤侵蚀的持续效应研究[J]. 水土保持学报, 1999, 5(2): 1- 6.
- [2] 汪在芹,胡立勇,廖国胜,等. 黄麻土工布对土壤抗侵蚀性能的影响[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(5): 31- 34.

上接第43页

参考文献:

- [1] Gupta M K, et al. Soil erosion index in silyer fir and spruce forest under differential forest covers in Himachal prdesh[J]. Indian journal of soil conservation, 1998, 26(1): 1- 5.
- [2] Sharma K D, Murthy J S R. A practical approach to rainfall-runoff modeling in arid zone drainage basins[J]. Hydrological Sciences Journal, 1998, 43(3): 331- 348.
- [3] Ziemer R R. Storm flow response to road building and partial cutting in streams of northern California[J]. Water Resource Research, 1981, 17(4): 907- 917.
- [4] Dunne T. Critical data requirements for prediction of erosion and sedimentation in mount ain drainage basins[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(4): 795- 808.
- [5] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等. 植物根系与土壤抗冲性[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 11- 18.
- [6] 吴钦孝,赵鸿雁. 黄土高原油松林地产流产沙及其过程研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 151- 157.
- [7] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. 水土保持学报, 1998, 4(2): 23- 28.
- [8] 陈云明,等. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 57- 61.
- [9] 金小麒. 乌江流域主要林分类型的生态经济功能的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 64- 68.
- [10] 王佑民. 中国林地枯落物持水土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108- 113.