

半干旱区微集水系统土壤水分调控效果研究

董彦丽¹, 张富¹, 杨彩红¹, 吴东平², 李旭春², 张佰林²

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 定西市水土保持研究所, 甘肃 定西 743000)

摘要: 分析了定西市安定区以隔坡水平阶为主体的径流调控工程和梯田(对照)的土壤水分与植被生长状况及 11 a 累积土壤水分水量平衡特征。结果表明, 隔坡水平阶工程保存完好, 产流区(25 m²)年均产流 0.3 m³, 产沙 3.96 kg, 被蓄水区全部拦蓄, 有效控制了水土流失, 增加了水资源量, 缓解了林草植被水分供应不足状况。2 m 土层含水量与植被生长成反比。梯田土壤含水率最高, 但农作物受旱减产最大; 隔坡水平阶产流区土壤含水率较低, 紫花苜蓿减产较大, 蓄水区土壤含水率最低, 但侧柏林生长旺盛。隔坡水平阶(林草带状混交)年均蒸散量为 428.6 mm, 较梯田高 2.2 mm。

关键词: 径流调控工程; 微型集水系统; 退耕还林; 径流林业; 土壤水分; 隔坡水平阶

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0035-05

中图分类号: S152.7, S157.2

Regulation and Control Effects of Soil Moisture for Micro-catchment Water Harvesting System in Semiarid Area

DONG Yan-li¹, ZHANG Fu¹, YANG Cai-hong¹, WU Dong-ping², LI Xu-chun², ZHANG Bai-lin²

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: Soil moisture and vegetation growth, as well as the balance of accumulated soil moisture over eleven years, were analyzed for runoff regulation and control projects on level terrace with slope and the terrace as contrast in Anding District, Dingxi City. Results indicated that the level terrace with slope was preserved perfectly, where annual average runoff and sediment yields in runoff generating area(25 m²) were 0.3 m³ and 3.96 kg, respectively. Runoff and sediment were totally retained by impounding area, which effectively controlled soil and water loss, increased water resources, and relieved the water shortage for tree and grass water demands. Soil water content in the 2 m layer varied inversely with vegetation growth. In the terrace as contrast, soil water content was highest, but the reduction of crop yield by drought reached the maximum. In the level terrace with slope, soil water content was lower and alfalfa yield was reduced greater in runoff generating area. In impounding area, however, soil water content was the lowest, while the growth of platycladus orientalis was strong. Annual average evapotranspiration for the level terrace with slope(forests and grass mixed by belts) was 428.6 and 2.2 mm higher than that for the terrace as contrast.

Keywords: runoff regulation and control project; micro-catchment water harvesting system; conversing cropland to forestland; runoff forestry; soil moisture; level terrace with slope

土壤水是陆地生态系统中水体的重要组成部分, 大气降水是土壤水的主要来源。由于半干旱区降雨量少、蒸散量大, 暴雨集中、水土流失严重, 有限的土壤供水难以满足人工林生长需求, 土壤出现“干化”现象, 许多人工林因水分亏缺而衰败, 土壤供水能力成为半干旱区影响人工林生长发育的最大限制因

子^[1-4]。近些年, 针对梯田^[5]、水平沟^[6]和鱼鳞坑^[7]等单项整地措施的土壤水分及水土保持效应研究较多, 在综合研究径流调控工程方面, 则主要集中在建设小流域径流调控体系^[8], 优化设计和布局工程结构^[9], 社会经济效益^[10]及提高降水资源利用率^[11-12]等方面。

收稿日期: 2012-11-16

修回日期: 2013-01-07

资助项目: 甘肃农业大学 SRTP 基金项目“径流调控工程土壤水分变化及综合效益研究”(20110518)

作者简介: 董彦丽(1986—), 女(汉族), 甘肃省景泰县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 546774540@qq.com。

通信作者: 张富(1961—), 男(汉族), 甘肃省定西县人, 博士, 研究员, 主要从事小流域水土保持防治措施对位配置研究。E-mail: fuzhang001@163.com。

定西市安定区地处西北黄土高原半干旱丘陵地区,土层深厚,地下水埋藏较深,天然降水是土壤水的唯一来源,也是植物生长发育的主要限制因子。为解决该地区土壤供水不足问题,安定区率先在退耕还林工程中采用以隔坡水平阶为主体的微集水径流调控工程,以降雨径流的富集叠加利用为核心,从林草措施合理搭配、植物措施与径流调控工程对位配置入手,通过拦蓄降水径流,减少水土流失,提高土壤含水量,增加土壤水分供给,以达到或促进径流林业可持续发展的目的^[8,13-15]。对安定区径流调控工程实施初期的研究表明^[9,13-15],径流聚集工程能够有效改善土壤水分环境,提高造林成活率和林木生长量,但在径流调控工程实施的后续效果方面研究较少。安定区 2008—2011 年连续 4 a 遇到频率为 75% 以上的中等干旱灾害,本研究通过实时调查径流调控工程隔坡水平阶的拦泥蓄水、土壤增墒效果和林草植被生长发育状况,总结退耕还林工程微集水系统土壤水分调控的实际效果,了解连续干旱对土壤贮水量和植被生长影响程度,以期为今后优化径流聚集工程设计及林草措施配置提供借鉴和参考。

1 研究区概况

安定区位于甘肃省中部,总面积 3 638 km²,海拔 1 750~2 580 m;年均气温 6.3 °C,极端最高气温 30.5 °C,极端最低气温 -20.1 °C,平均相对湿度 64%,无霜期 144 d;多年平均降水量 420 mm,多集中在 7—9 月,占年降水量的 60%~80%,年均蒸发量 1 536 mm。土壤类型以黄绵土为主,多为粉质壤土,土层深厚,土质较松,适耕性强。

2 研究方法

(1) 样地选择。选择赵家铺流域 2001 年实施完成的退耕还林(草)径流调控工程隔坡水平阶为研究区,以梯田(农地)作为对照。隔坡水平阶隔坡为产流区(种植紫花苜蓿),水平阶(营造侧柏林)拦蓄隔坡径流为蓄水区,样地海拔 2 032 m,半阴坡中部;对照地梯田海拔 1 996 m,农作物为马铃薯。

(2) 径流调控工程设计标准。工程按降水保证率 75% ($P \geq 75\%$) 设计;工程拦蓄标准为 200 年一遇最大 24 h 暴雨径流;设计聚流比按照《甘肃省小流域水土流失综合防治工程建设技术规程》(DB62/T346—94)要求为:安全聚流比 \geq 增产聚流比 ≥ 1 ;设计林木需水量为 1.3~2.6 m³/株;根据水土保持功能的不同,将单个水平阶宽度(此处等于侧柏林株距 5 m)与所对应的隔坡长度(此处等于侧柏林行距 6.5 m)

作为隔坡水平阶的一个单元,一个隔坡水平阶单元分为产流区和蓄水区 2 个区。产流区隔坡长 5 m,宽 5 m,面积 25 m²;蓄水区水平阶面宽 1.5 m,长 5 m,面积 7.5 m²;每个单元控制面积 32.50 m²。

(3) 径流、泥沙观测。观测点位于安家沟径流试验场,观测小区面积 5 m×10 m,坡度 15°,农坡草地,草种为紫花苜蓿,海拔 2 010 m,半阴坡中部。每次降雨产生径流后,先量算径流池内水的总体积,计算径流量;搅拌均匀后重复 3 次取水和泥沙的混合样品,沉淀后取泥沙烘干,计算对应的产沙量^[16]。观测时间为 2002—2011 年。

(4) 林草植被调查。调查径流调控工程不同工程部位(产流区、蓄水区)林草植被高度、胸径、冠幅、生长量和保存率等。用树冠投影法测定林木郁闭度,用方格网法测定植物盖度(样方面积 2 m×2 m)。调查时间为 2011 年 8 月 16 日。

(5) 土壤容重及土壤水分测定。用环刀法测定 0—100 cm 内土壤容重,每 10 cm 取样 1 个,3 次重复。采用烘干法测定 0—200 cm 土层不同工程部位(产流区、蓄水区),0—60 cm 内每 10 cm 取样 1 个,60—200 cm 内每 20 cm 取样 1 个,3 次重复。测定时间为 2011 年 8 月 16 日。

(6) 蒸散量计算。试验区位于黄土高原,土层深厚,土壤水分循环不受地下水的影响,而且生长季内炎热干旱的气候使得气态水的凝结量几乎为 0^[12],依据水量平衡原理,在无灌溉条件下,水量平衡方程为:

$$E = 0.1 \times M \times R \times H \quad (1)$$

式中: E ——贮水量(mm); M ——土壤含水量(%); R ——土壤容重(g/cm³); H ——土层深度(cm)。

$$\Delta W = E_{t1} - E_{t2} \quad (2)$$

式中: ΔW ——某一时段内土壤贮水量变化值(mm); E_{t1} ——末期土壤贮水量(mm); E_{t2} ——基期土壤贮水量(mm)。

$$ET = P - Q - \Delta W \quad (3)$$

式中: ET ——蒸散量(mm); P ——降雨量(mm); Q ——降雨产生地表径流量(mm)。

3 结果与分析

3.1 降雨量分析

降雨年际变化。2001—2011 年研究区降雨量见图 1。按照《甘肃省小流域综合治理工程技术管理规程(实行)》中对不同频率年降水量($P\%$)的划分标准,定西市丰水年(10%)、中等丰水年(25%)、中水年(50%)、中等干旱年(75%)、干旱年(90%)的降雨量标准分别为 590,510,431,361,304 mm。以此为据,

2001—2011 年属于中等丰水年的只有 2003 年,属于中水年的有 3 a(2005,2006 和 2007 年),属于中等干旱年的有 5 a(2001,2004,2008,2010 和 2011 年),属于干旱年的有 2 a(2002 和 2009 年)。2003 年降雨量最高达 536.5 mm,2009 年降雨量最低为 324.7 mm。2001—2011 年,11 a 平均降雨量为 405.1 mm,整体上介于中等偏旱,不同频率年降水量 P 介于 50%~75%。

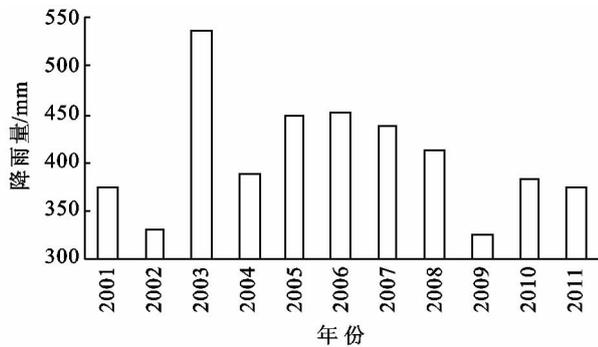


图 1 研究区降雨量年际变化

降雨量年内变化。1—4 月多年平均降雨量较少,占年降雨量的 12.3%;降雨主要集中在 5—9 月,占年降雨量的 76.0%;10—12 月占年降雨量的 11.68%

(图 2)。2010 年 10 月—2011 年 6 月间几乎无 ≥ 10 mm 的有效降水,8 个月共降雨 91.6 mm,是同期平均数的 65%。

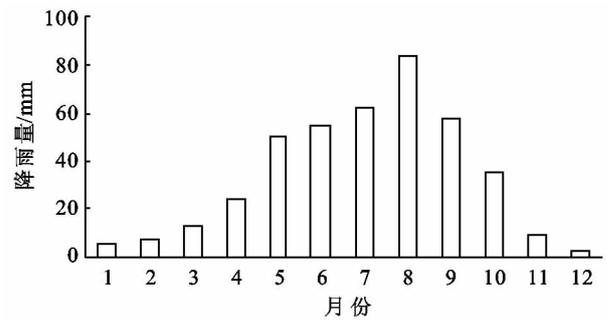


图 2 研究区降雨量年内变化

3.2 径流调控工程拦蓄径流、泥沙量分析

据调查,径流调控工程隔坡水平阶保存完好,径流泥沙全部拦蓄,淤积轻微。据定西市水土保持研究所安家沟流域草地(紫花苜蓿)径流观测资料(表 1),2002—2011 年平均径流深为 12.04 mm,径流系数为 2.9%。对隔坡水平阶 2002—2011 年产水产沙能力进行计算结果表明,25 m² 产流区年均产流 0.3 m³,产沙 3.96 kg,全部被水平阶拦蓄。

表 1 隔坡水平阶径流、泥沙计算结果

径流泥沙	样地类型	产流面积/m ²	年份										平均
			2002	2003	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011		
产流量/m ³	径流小区	50	1.26	0.46	1.08	0.37	0.37	0.40	0.13	0.77	0.59	0.60	
	隔坡水平阶	25	0.63	0.23	0.54	0.18	0.18	0.20	0.06	0.39	0.29	0.30	
产沙量/kg	径流小区	50	—	—	21.79	1.40	0.43	1.39	1.46	15.92	13.02	7.92	
	隔坡水平阶	25	—	—	10.89	0.70	0.22	0.69	0.73	7.96	6.51	3.96	
径流深/mm	—	—	25.26	9.24	21.67	7.34	7.30	7.93	2.56	15.40	11.70	12.04	

注:(1) 径流小区坡长 10 m,坡宽 5 m,面积 50 m²,坡度 15°,草种紫花苜蓿;(2) 产流区隔坡宽 5 m,水平阶长 5 m,侧柏单株隔坡集流面积 25 m²,坡度 15°,草种紫花苜蓿。

3.3 林草植被生长量分析

据调查,蓄水区侧柏长势良好,无干梢、枯叶现象,平均树高 2.30 m,胸径 2.07 cm,冠幅 1.34 m²,保存率达 92%;隔坡水平阶产流区产草量为鲜重

11.30 t/hm²,干重 3.17 t/hm²,与前 10 a 平均产量(22.53 t/hm²(鲜),6.48 t/hm²(干))相比下降了约 50%(表 2);对照梯田种植的马铃薯受旱严重,产量只有 6.77 t/hm²,是正常年份(22.50 t/hm²)的 30%左右。

表 2 隔坡水平阶林草植被生长情况

紫花苜蓿(产流区)					侧柏(蓄水区)					
植株密度/(10 ⁴ 丛·hm ⁻²)	盖度/%	高度/cm	重量/(t·hm ⁻²)		树高/m	胸径/cm	冠幅/m		密度/(株·hm ⁻²)	保存率/%
			鲜	干			东西	南北		
31	56	27	11.30	3.17	2.3	2.07	1.18	1.08	284	92

3.4 径流调控工程垂直剖面土壤水分分析

(1) 隔坡水平阶不同单元垂直剖面土壤含水率

变化。2010 年 10 月—2011 年 6 月,研究区相比同期有效降水量减少 35%。观测表明,观测时隔坡水平

阶产流区(紫花苜蓿,下同)2 m 土层土壤含水率达 7.05%,高于蓄水区(侧柏,下同)的 6.63%,这种差异主要来源于 0—60 cm 土壤水分的差异,60—200 cm 土层两者无显著差异。依据隔坡水平阶土壤含水率在垂直剖面上的变化,可将 2 m 土层分为浅层(0—60 cm)、中层(60—140 cm)和深层(140—200 cm)3 个明显不同的区域。隔坡水平阶 3 个区域土壤含水率呈现出低—高一低的变化,浅层土壤受自然降雨和植物根系影响较大,呈现出含水低、变幅大的特点,此层紫花苜蓿土壤含水率为 7.74%,侧柏为 6.28%,变幅紫花苜蓿为 27%,侧柏为 43%;中层土壤是剖面含水率最高的区域,林草地具有相近的含水率,两者的含水率在 7.60%~7.67%;深层土壤剖面是耗水最多、含水率最低(5.55%~5.67%),体现了林草植被对土壤水分长期利用的结果。而对照区梯田 2 m 土壤含水率达 7.89%,高于隔坡水平阶产流区与蓄水区,梯田在垂直剖面 0—140 cm 土层土壤含水率变化较大,在 140—200 cm 土层土壤水分变化逐渐趋于平稳(图 3)。

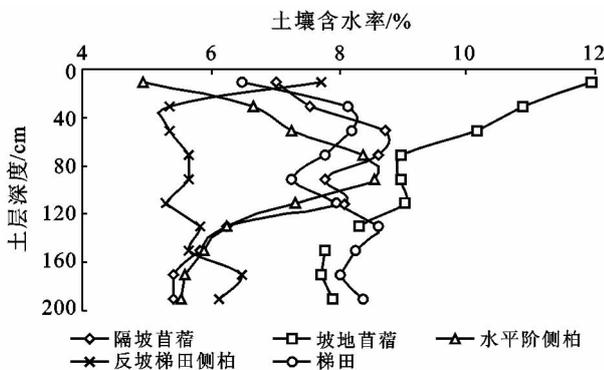


图 3 林草地受旱年与正常年垂直剖面土壤水分含量变化

(2) 隔坡水平阶不同单元抗旱能力分析。根据定西市水土保持研究所研究,坡耕地紫花苜蓿 2 m 土层多年平均土壤含水率为 9.17%,比观测时隔坡紫花苜蓿 7.05%高出 2.12%,浅层和深层失水最为强烈。反坡梯田侧柏林 2 m 多年平均含水率为 5.90%,比观测时水平阶侧柏林的 6.63%还要低 0.73%,说明水平阶侧柏林抗旱效果好于反坡梯田侧柏林。水平阶侧柏林 30—180 cm 的土壤含水率显著高于反坡梯田,0—30 cm,180—200 cm 则相反(图 3)。

(3) 不同土地利用类型垂直剖面土壤含水率变化。由图 4 可以看出,在正常年份(多年平均)2 m 土层土壤含水率以农坡地最高,达到 12.22%,其次为梯田 9.98%。观测时对照区梯田降为 7.89%,隔坡水平阶更低仅为 6.95%。在 0—120 cm 土层,隔坡水

平阶与对照区梯田土壤含水率相差不多,变化规律相似;120—200 cm 土层,隔坡水平阶土壤含水率明显低于对照区梯田,说明多年生的紫花苜蓿和侧柏根系较深,对土壤水分的耗散大于一年生的农作物。

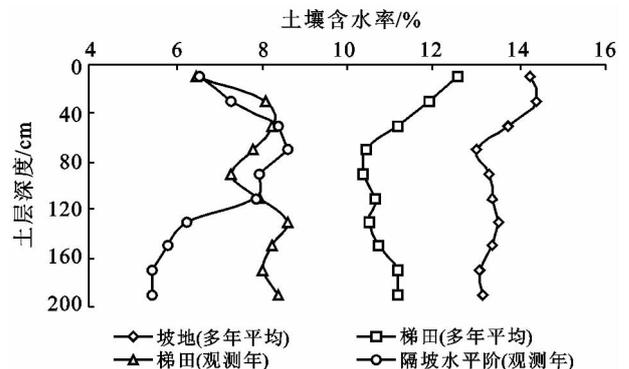


图 4 不同措施受旱年与正常年垂直剖面土壤含水率变化

(4) 不同土地利用类型土壤贮水量变化。农坡地作为水土流失的主要策源地,在水土流失治理中,其坡耕地利用的主要调整措施一是兴修水平梯田,二是退耕还林草。在正常年份坡耕地由于生产条件差、产出水平低,故而对土壤水分的利用能力差,所以具有较高的土壤贮水量,在正常年份(多年平均)达到 325.06 mm。农坡地在种草和兴修梯田后,由于多年生紫花苜蓿吸水能力较强和梯田生产性能的提高,对土壤水分的耗散也随之增加,导致土壤贮水量下降,其中以紫花苜蓿为甚(表 3)。遇到受旱之年,梯田的土壤贮水量比正常年份减少 77.16 mm,减少了 29%,坡地草地的土壤贮水量比正常年份减少 51.04 mm,减少了 23%。与反坡梯田相比,隔坡水平阶由于有一定的径流补给,侧柏林土壤贮水量增加 17.04 mm,增加了 12%。

3.5 林草植被蒸散量分析

研究期(2001 年 5 月—2011 年 7 月,下同),年均降雨量为 413.0 mm,隔坡水平阶经 11 a 生产运行后,隔坡水平阶在研究时段内土壤贮水量减少 158.21 mm,年均减少 15.6 mm,林草地年均蒸散量为 428.6 mm。对照地梯田在研究时段内土壤贮水量减少了 135.56 mm,年均减少 13.4 mm,年均蒸散量为 426.4 mm。其中,产流区共产生径流 128.26 mm,年均径流量 12.60 mm;土壤贮水量减少 155.83 mm,年均减少 15.3 mm,紫花苜蓿年均蒸散量为 415.7 mm;蓄水区侧柏林共拦蓄径流 427.53 mm,年均拦蓄径流 42.0 mm;土壤贮水量减少 166.11 mm,年均减少 16.3 mm,年均蒸散量为 471.3 mm,高于产流区紫花苜蓿草地(表 4)。

表 3 不同措施观测年与正常年土壤贮水量变化

mm

土壤深度/cm	观测年				正常年			
	隔坡水平阶		梯田		坡地		梯田	反坡梯田
	紫花苜蓿	侧柏	平均	农作物	紫花苜蓿	农作物	农作物	侧柏
0—20	17.20	12.12	16.03	15.90	29.42	34.97	30.89	18.99
20—40	17.36	15.43	16.92	18.77	25.25	33.34	27.54	12.39
50—60	20.81	17.33	20.00	19.57	24.36	32.90	26.76	12.73
60—80	20.15	19.56	20.01	18.19	21.04	30.47	24.58	13.22
80—100	18.83	20.67	19.25	17.55	21.79	32.29	25.20	13.61
100—120	19.46	17.62	19.03	19.20	21.85	32.42	25.79	12.83
120—140	15.10	15.05	15.09	20.78	20.03	32.68	25.60	14.04
140—160	14.11	14.23	14.14	19.95	18.84	32.39	26.11	13.67
160—180	13.14	13.58	13.24	19.35	18.65	31.77	27.15	15.61
180—200	13.07	13.36	13.14	20.24	19.04	31.83	27.04	14.76
合计	169.23	158.95	166.85	189.50	220.27	325.06	266.66	141.85

注:(1) 观测年为 2011 年 8 月 16 日;(2) 正常年资料来源于定西市水土保持科学研究所《小流域地形小气候、土壤水分动态及治理措施对位配置研究资料汇编》(1982—1988 年)。

表 4 隔坡水平阶不同部位水量平衡

mm

计算指标	产流区		蓄水区		隔坡水平阶		梯田	
	总量	平均	总量	平均	总量	平均	总量	平均
P	4 199.8	413.0	4 199.8	413.0	4 199.8	413.0	4 199.8	413.0
Q	-128.26	-12.60	427.53	42.00	—	—	—	—
E_{t1}	169.23	—	158.95	—	166.85	—	189.50	—
E_{t2}	325.06	—	325.06	—	325.06	—	325.06	—
ΔW	-155.83	-15.30	-166.11	-16.30	-158.21	-15.60	-135.56	13.4
ET	4 227.37	415.70	4 793.44	471.30	4 358.01	428.60	4 335.36	426.4

注:(1) 数量计算期:2001 年 5 月—2011 年 7 月。(2) P 为降雨量(mm); Q 为降雨产生地表径流量(mm); ΔW 为某一时段内土壤贮水量变化值(mm); E_{t1} 为末期土壤贮水量(2001 年 10 月); E_{t2} 为基期土壤贮水量(2011 年 8 月);ET 为蒸散量(mm)。

4 结论

(1) 隔坡水平阶全部拦蓄上部径流泥沙,有效地控制了坡耕地水土流失,增加了水资源量,缓解了隔坡水平阶林草植被水分供应状况。

(2) 受植物根系发育的影响,隔坡水平阶 2 m 垂直剖面土壤含水率呈现出低—高一低的变化趋势。

(3) 正常年份 2 m 土层,农坡地土壤含水率最高,达到 12.22%;梯田土壤含水率为 9.98%。遇到干旱年份,受降雨和植物耗水能力的影响,多年生紫花苜蓿与侧柏根系较深,耗水量大,使土壤含水率低于对照区梯田,林地低于草地。梯田土壤含水率降为 7.89%,隔坡水平阶为 6.95%。

(4) 在研究时段,隔坡水平阶土壤贮水量年均减少 15.6 mm,年均蒸散量为 428.6 mm,对照区梯田土壤贮水量年均减少 13.4 mm,梯田总年均蒸散量为 426.4 mm。

(5) 随着侧柏的生长,其需水量还会增加,紫花苜蓿生长期为 10 a 左右,随着紫花苜蓿生长势的衰

退,地表覆盖度的降低,产流率将会提高,对下方蓄水区林地土壤水分的补给将会加强,但是否能够补偿侧柏林蒸散量的需求,还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 陈云明,刘国彬,杨勤科.黄土高原人工林土壤水分效应的地带性特征[J].自然资源学报,2004,19(2):195-200.
- [2] 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[J].干旱区资源与环境,2001,15(1):72-77.
- [3] 汪习军.对黄土高原水土流失治理的几点认识[J].中国水土保持,1999(12):17-19.
- [4] 杨文治,邵明安,彭新德,等.黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系[J].中国科学:D辑,1998,28(4):357-365.
- [5] 余峰,董立国,赵庆丰,等.宁夏半干旱地区梯田土壤水分动态变化规律研究[J].水土保持研究,2007,14(1):298-300.
- [6] 景维杰,韩蕊莲,侯庆春,等.不同间距水平阶集水及造林效果的研究[J].西北林学院学报,2004,19(3):38-40.
- [7] 王晶,朱清科,云雷,等.黄土高原不同规格鱼鳞坑土壤水分状况研究[J].水土保持通报,2011,31(6):76-80.

(下转第 44 页)

- sandy streambeds [J]. *Ground Water*, 2001, 39(6): 870-885.
- [6] Conant Jr B, Cherry J A, Gillham R W. A PCE groundwater plume discharging to a river: Influence of the streambed and near-river zone on contaminant distribution [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2004, 73(1):249-279.
- [7] Kennedy C D, Genereux D P, Corbett D R, et al. Design of a light-oil piezomanometer for measurement of hydraulic head differences and collection of groundwater samples [J]. *Water Resource Research*, 2007, 43(9): 1029-2007.
- [8] Chen Xunhong, Burach M, Cheng Cheng. Electrical and hydraulic vertical variability in channel sediments and its effects on stream flow depletion due to groundwater extraction [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 352(3):250-266.
- [9] Song Jinxi, Chen Xunhong, Cheng Cheng, et al. Feasibility of grain-size analysis methods for determination of vertical hydraulic conductivity of streambeds [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375(3/4):428-437.
- [10] Chen Xunhong. Hydrologic connections of a stream-aquifer-vegetation zone in south-central Platte River Valley, Nebraska [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(2):554-568.
- [11] Vukovic M, Soro A. Determination of Hydraulic Conductivity of porous media from grain size composition [M]. *Water Resources Publication LLC, Colorado*, 1992.
- [12] Milham N P, Howes B L. A comparison of methods to determine K in shallow coastal aquifer [J]. *Ground Water*, 1995, 33(1):49-57.
- [13] Odong J. Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grain size analysis [J]. *Journal of American Science*, 2007, 3(3):54-60.
- [14] Vienken T, Dietrich P. Field methods of determining hydraulic conductivity from grain size data [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(1):58-71.
- [15] MacDonald A M, Maurice L, Dobbs M R, et al. Relating in situ hydraulic conductivity, particle size and relative density of superficial deposits in a heterogeneous catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 434-435(20):130-141.
- [16] Chapuis R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, 41(5):787-795.
- [17] Hvorslev M J. Time lag and soil permeability in ground-water observations, U. S. Army Corps of Engineers [R]. *Waterways Experiment Station Bulletin, Vicksburg, Mississippi*, 1951:1-50.
- [18] Antônio J R, Gérard D. Calculating hydraulic conductivity of fine-grained soils to leachates using linear expressions [J]. *Engineering Geology*, 2006, 85(1):147-157.
- [19] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

(上接第 39 页)

- [8] 张富, 余新晓, 景亚安, 等. 黄土高原水土保持防治措施对位配置研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2007:291-322.
- [9] 赵克荣, 陈丽华, 肖洋. 黄土区径流调控技术体系 [J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(4):94-99.
- [10] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 黄土高原降雨径流调控利用潜力定量评价模型 [J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(3):32-36.
- [11] 曹全意. 黄土高原地区提高山坡地径流利用率的有效途径 [J]. *水土保持研究*, 1998, 5(4):31-35.
- [12] 张永涛, 杨吉华. 集水措施下油松植树带微域环境的水量平衡分析 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):137-139.
- [13] 张富, 胡朝阳. 黄土高原植被对位配置技术研究 [J]. *中国水土保持*, 2003(1):20-21.
- [14] 张富, 高麟, 赵克荣. 水土保持植物措施与径流调控工程对位配置数量化分析 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2011(4):97-104.
- [15] 朱正军, 赵克荣. 干旱半干旱区径流调控造林技术研究 [J]. *中国水土保持*, 2003(9):26-28.
- [16] 卫伟, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区极端降雨事件及其对径流泥沙的影响 [J]. *干旱区地理*, 2007, 30(6):896-901.