

陕北丘陵区陡坡柠条林地与荒坡土壤水分变化研究

白光明¹, 齐金生², 刘新生³, 常善刚¹, 刘志兵⁴

(1. 米脂县气象局, 陕西 米脂 718100; 2. 铜川市印台区农技中心, 陕西 铜川 727000;

3. 咸阳农业气象研究所, 陕西 咸阳 712034; 4. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过定点土壤水分测定与对比分析, 研究了陕北丘陵区陡坡柠条林地与荒坡的土壤水分亏缺状况, 年际年内动态变化规律, 干燥化特征及其自然降水的补偿能力。结果表明, 柠条林地与荒坡 0—10 m 土层贮水量仅相当于田间持水量的 26.2%~41.2%。荒坡地 0—10 m 土层贮水量相当于田间持水量的 39.8%~41.2%。土壤贮水量的分布是阳坡<半阳坡<阴坡, 上坡位<下坡位。年际间土壤水分的变异程度随土壤深度的增加而减弱, 土壤贮水量的变化主要发生在 2 m 以上土层内。土壤贮水量具有明显的季节变化特征, 但滞后于降雨量变化。生长季内, 柠条地与荒坡的土壤平均贮水量之间差异显著, 土壤越深, 其含水量变化程度越小。两种利用方式的土壤剖面都产生了不同程度的干化层。相比而言, 柠条林地深层土壤干燥化强度明显大于荒坡地。丰水年柠条林雨水补偿深度仅为 1.0 m, 荒坡也仅为 1.2 m。柠条林丰水年的雨水补偿深度比干旱年可增加 60 cm 以上, 5 m 土层贮水增量增加 3 倍以上。

关键词: 陕北丘陵区; 陡坡地; 柠条; 荒坡; 土壤水分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)06-0045-05

中图分类号: S152.75

Changes of Soil Moisture in Slope *Caragana* Land and Wasteland in the Hilly and Gullied Area of Northern Shaanxi

BAI Guang-ming¹, QI Jin-sheng², LIU Xin-sheng³, CHANG Shan-gang¹, LIU Zhi-bing⁴

(1. Weather Bureau of Mizhi County, Mizhi, Shaanxi 718100, China;

2. Agricultural Technical Center of Yintai, Tongchuan, Shaanxi 727000, China;

3. Xianyang Institute of Agricultural Weather, Xianyang, Shaanxi 712034, China;

4. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: We investigated soil moisture deficit, inter-annual and inner-annual changes, dry layer features, and restored capability of natural precipitation in slope *Caragana* land and wasteland in the hilly and gullied area of Northern Shaanxi Province by positioned measurements and comparative analyses. Results showed that water storage in 0—10 m soil profile was only 26.2%~41.2% of its water-holding capacity in slope *Caragana* land, while it was 39.8%~41.2% in slope wasteland. Slope segments, in terms of spatial distribution of soil water storage, were in the ascendant order of south faced slope, semi-south faced slope, and north faced slope, as well as upper slope and lower slope. Inter-annual variation of soil moisture lowered with increased soil depth and the changes of soil water storage mainly took place in 0—2 m soil profile. Soil water storage was characterized by obvious seasonal changes but lagged behind rainfall. Within growing season, averaged soil water storages were of significant difference between slope *Caragana* land and wasteland and the variation of soil moisture content was alleviated with increased soil depth. There existed a dry soil layer in soil profile to different extent in both *Caragana* land and wasteland. Comparatively, in deep soil, the dried degree of the soil layer was greater in *Caragana* land than wasteland. In a bumper year of precipitation, the restored depth of soil moisture was down to 1.0 m of the soil profile in *Caragana* land and to 1.2 m in

收稿日期: 2007-05-18 修回日期: 2007-09-07

资助项目: 陕西省科技攻关项目“陕北丘陵区保土灌木新品种引进及陡坡地高效治理技术研究”(2005K01-G14-03)

作者简介: 白光明(1968—), 男(汉族), 陕西省米脂县人, 本科, 工程师, 主要从事应用气象研究。E-mail: gmingb@tom.com.

wasteland. In *Caragana* land, the restored depth of soil moisture was 60 cm greater in a bumper year of precipitation than a lean year and soil water storage increased by 3 times in 0—5 m soil.

Keywords: hilly and gullied area of Northern Shaanxi Province; slope land; *Caragana*; wasteland; soil moisture

陕北丘陵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 1.6×10^4 t/(km²·a) 以上, 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。由于降水稀少, 土壤水分亏缺, 林草植被保存率低, 生态经济效益差的问题突出存在。因此, 水分是限制黄土高原地区植物生长和生存的关键因子。柠条和荒坡是该区面积最大、分布最广的 2 种利用方式。尽管自 20 世纪 80 年代初期开始, 许多学者对黄土高原林草地土壤水分进行了研究^[1-6]。但专门针对干旱陡坡林草地土壤水分的研究报道少见。研究它们的土壤水分变化规律, 对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

研究区设在米脂县, 属黄土高原第 I 副区。梁峁起伏, 沟壑交错, 沟壑密度达 7.26 km/km²。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, 年平均温度 8.4 °C, ≥ 10 °C 积温 3 470 °C, 日照时数 2 716 h, 无霜期 160~170 d。年均降雨量 420.3 mm, 降水年变化率大, 丰水年占 25.0%, 平水年占 40.0%, 枯水年占 35.0%。降水季节分配不均, 主要集中在 6—9 月, 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 1 577 mm。

2 研究方法

在陕西省米脂县域的东、西、中 3 个方向选定不同坡向的柠条林和荒坡地(表 1)为样地, 2004—2006 年连续 3 a 定点测定土壤水分和相应的植被生长调查, 分析比较其土壤水分时间和空间数量变化规律。土壤水分采用土钻取土, 105 °C 烘干法测定, 钻深为 5 m, 每月取样 1 次, 并在持续干旱期末和土壤封冻前增测 10 m 土层含水量。土壤容重和土壤田间持水量用环刀法测定。土壤贮水量按下式计算

$$W_c = 0.1\theta_m \cdot V \cdot H$$

式中: W_c ——土壤贮水量(mm); θ_m ——质量含水量(%); V ——土壤容重(g/cm³); H ——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) = $0.1(\theta_m - \theta_w) \cdot V \cdot H$, 式中: θ_w 为凋萎湿度。

土壤水分亏缺量 D_a (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 D_{sw} (%) = $D_a/F_c \times 100\%$ 。

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); 雨季初土壤贮水亏缺量(mm) = 土壤田间持水量(mm) - 雨季初土壤实际贮水量(mm); 土壤贮水补偿度 C_{sw} (%) = $\Delta W/D_a \times 100\%$ ^[7]。

表 1 样地基本情况

采样地	利用方式	面积/hm ²	生长年限/a	株行距/m	坡位	坡向	坡度/(°)	海拔/m
刘家峁	柠条	2.0	25	1.5×1.5	中上	阴坡	36	1 078
泉家沟	柠条	3.3	28	1.5×1.5	中上	阳坡	38	1 031
高西沟	柠条	1.7	26	1.5×1.5	上	半阳坡	35	977
王家硷	荒坡	5.3	25	1.5×1.5	上	阴坡	42	933

3 结果分析

3.1 土壤水分的亏缺特征及年际变化规律

陡坡柠条林地与荒坡的土壤水分都严重亏缺(表 2)。贫水年柠条林地 0—10 m 土层贮水量仅为 543.4 mm, 相当于田间持水量的 26.2%, 土壤贮水亏缺量达 1 531 mm, 而丰水年贮水量也仅有 559.1

mm, 占田间持水量的 27.0%; 荒坡地 0—10 m 土层贮水量为 825.2~855.0 mm, 相当于田间持水量的 39.8%~41.2%。

如此严重的水分亏缺是降水入渗少, 植株逐年吸取土层储水以补充地上需水的结果, 且在一般情况下不能完全恢复。

因此,在陕北丘陵区的植被恢复中,要依据当地的生物气候生产力,采用合理的群落密度,合理控制

群落生产力,以保持植物蒸腾耗水和土壤水分补偿之间的水分平衡。

表 2 陡坡柠条林地与荒坡土壤水分的年际变化

利用方式	测定时间	不同深度处土壤含水量/%										储水量/mm	储水增量/mm	亏缺量/mm
		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m			
柠条	200411	6.68	5.32	5.21	6.46	5.52	4.76	4.81	4.79	5.63	5.79	549.7	—	1 525.1
	200511	6.30	5.08	4.94	7.55	5.84	4.50	4.66	4.43	5.39	5.65	543.4	-6.3	1 531.4
	200611	10.94	5.22	4.95	5.64	4.37	4.52	4.55	4.77	5.09	5.86	559.1	15.7	1 515.7
荒坡	200511	7.77	5.40	5.76	5.71	8.09	8.38	8.51	10.46	10.83	11.61	825.2	—	1 249.6
	200611	13.26	6.85	4.86	5.74	6.66	7.09	8.57	10.37	10.41	11.69	855.0	29.8	1 219.8

坡向对陡坡地土壤水分有很大影响。不同坡向的光照、气温、降水、土壤性质等不同,从而引起土壤水分的人渗和蒸发数量不同。对生长年限相近,坡度坡位等立地条件较为一致的 3 种坡向的柠条林 0—5 m 土层土壤贮水量测定结果(图 1)表明,阳坡土壤贮水量较低,占阴坡土壤贮水量的 64.6%~80.9%,半阳坡居中,占阴坡土壤贮水量的 75.7%~93.2%,阴坡较高,这主要是由于阳坡比半阳坡和阴坡要接受较多的太阳辐射,蒸发强烈所致。从土壤剖面含水量来看,40 cm 以上土层,这 3 种坡向的含水量差异较大,40 cm 以下差异较小。这与邱扬等在黄土高原中部的研究结果相一致^[8]。

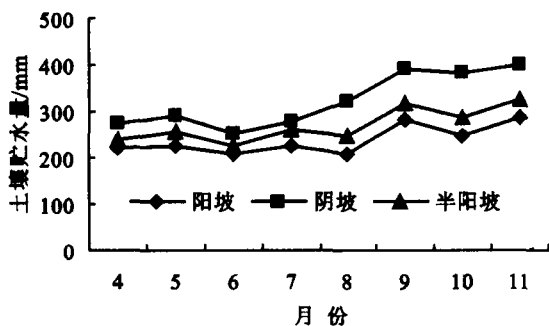


图 1 不同坡向柠条林地 0—5 m 土壤贮水量

坡位影响水分在坡面的蒸发、入渗、汇集等水分再分配过程。一般情况下,上坡由于位置高,风力及辐射强烈,蒸发量大,土壤水分状况较下坡差。根据当地 2006 年 8 月 27 日—8 月 29 日天气预报与实测值分析,这次 80.5 mm 降雨过程前后对 2 种利用方式 0—5 m 土层土壤贮水量的测定结果(表 3)表明,暴雨发生前荒坡地的土壤贮水量高于柠条林地,且荒坡地上下坡位的差异大于柠条林地,这可能是柠条强烈耗水的结果;雨后柠条林地和荒坡上坡位的水分增量相近,但柠条林地下坡位的水分增量明显大于荒坡地,导致柠条林地上下坡位的土壤贮水差异大于荒坡

地。值得说明的是,由于陡坡地水分匮乏,地形复杂,土壤水分的局部差异十分显著,加之植被对土壤水分的影响,在坡面径流较少的年份差异较小,往往出现陡坡上部土壤含水量较高,中部土壤含水量最高,下部土壤含水量偏低的现象,这可能是中上部坡形较缓而下部较陡所致。如 2005 年在米脂县高梁乡高西沟村陡坡 26 a 生柠条林地 0—200 cm 土层土壤水分调查表明,陡坡地土壤水分的局部差异还和坡形有关。

表 3 降雨前后不同坡位土壤水分差异 mm

坡位	降雨前土壤贮水量		降雨后土壤贮水量	
	柠条	荒坡	柠条	荒坡
上坡	369.2	375.3	421.6	428.4
下坡	382.5	393.1	453.9	450.2
差值	13.3	17.8	32.3	21.8

年际间陡坡柠条林地与荒坡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 4)。土壤贮水量的变化主要发生在 2 m 以上土层内。0—1 m 土壤贮水量变幅最大,柠条林地 2005—2006 年达 46.4 mm,而荒坡则高达 54.9 mm。2004—2005 连续 2 a 为贫水(干旱)年,降雨量分别为 297.5 mm 和 312.9 mm,但从 2004 年 11 月至 2005 年 11 月间柠条林地 10 m 土层贮水量减少了 6.3 mm,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。2006 年为丰水年,降雨量达 500.9 mm,柠条林地从 2005 年 11 月至 2006 年 11 月间增加了 15.7 mm,荒坡地增加了 29.8 mm。

3.2 土壤水分的季节变化规律

生长季内,5 m 土层贮水量随着降雨量的变化而上下波动,表现为较一致的季节变化特征,土壤贮水量的变化滞后与降雨量的变化(图 2)。4 月初至 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,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,土壤贮水量有逐渐减少的趋势。方差分析表明,柠条地与荒坡的土壤平均贮水量之间差异显著($P < 0.05$)

表 4 生长季两种利用方式土壤水分的垂直变化

利用方式	项目	土层深度/cm							
		0—40	40—80	80—120	120—160	160—200	300	400	500
柠条	平均含水量/%	8.96	7.78	5.21	4.22	4.17	4.45	5.14	4.60
	标准差	6.12	5.47	1.97	0.40	0.43	0.43	0.61	1.19
	变异系数 C_v /%	68.30	70.33	37.76	9.47	10.27	9.60	11.95	25.81
荒坡	平均含水量/%	10.10	7.98	6.24	5.65	4.67	4.97	5.45	6.39
	标准差	5.57	4.84	1.66	0.63	0.41	0.37	0.55	0.99
	变异系数 C_v /%	55.10	60.69	26.68	11.19	8.84	7.40	10.13	15.47

3.3 土壤水分的垂直变化与干燥化特征

生长季内,土壤含水量在空间上的分布特征,可用变异系数 C_v 反映。 C_v 值越大,土壤含水量变化越剧烈; C_v 值越小,土壤含水量越稳定。从表 4 可以看出,土壤越深,其含水量变化程度越小。0—120 cm 土层范围内,土壤含水量的变异系数最高而且较为集中,柠条地与荒坡差异不大,这说明该层的土壤水分的变化主要是由于与外界交换频繁,受到降水、径流和蒸发等影响的程度大而引起的。120 cm 以下土层,含水量的变异系数差异较大,这主要是植物根系分布和耗水规律不同而造成的。

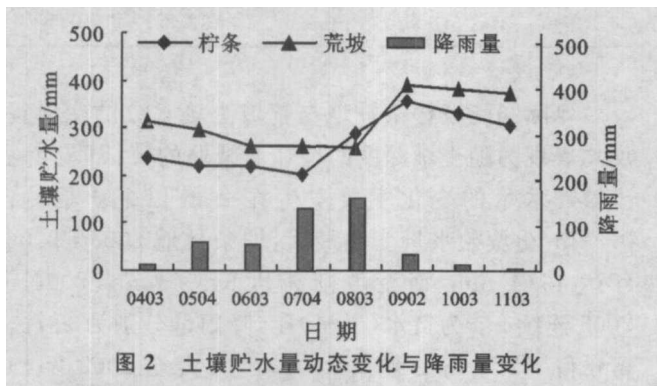


图 2 土壤贮水量动态变化与降雨量变化

土壤干燥化是黄土高原林草地特有的水文特征。本文采用杨文治等关于土壤干层上下限的划分标准,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%。图 3 显示了陡坡柠条林地与荒坡地 10 m 土层内土壤剖面含水量的变化。

可以看出,两种利用方式的土壤剖面含水量都呈现“高一低一较高”到趋于稳定的特征,且都产生了不同程度的干化层。相比而言,柠条林地深层土壤干燥

化强度明显大于荒坡地,这是由于 28 a 生灌木柠条林根系深,密度大,生长年限长,耗水强烈所致。柠条林整个剖面土壤干旱程度已达到了极限,10 m 土层平均含水量仅 4.89%,有效水分储存量仅有 129.0 mm,主要依靠天然降水调节和维持生命,导致群落整体衰败,中上部枝梢已大量干枯,部分已经死亡。荒坡地在 6.0 m 以内存在着强烈耗水层,出现干化,但含水量明显高于柠条,6.0 m 以下土层土壤含水量逐步回升。因此,对高龄灌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。

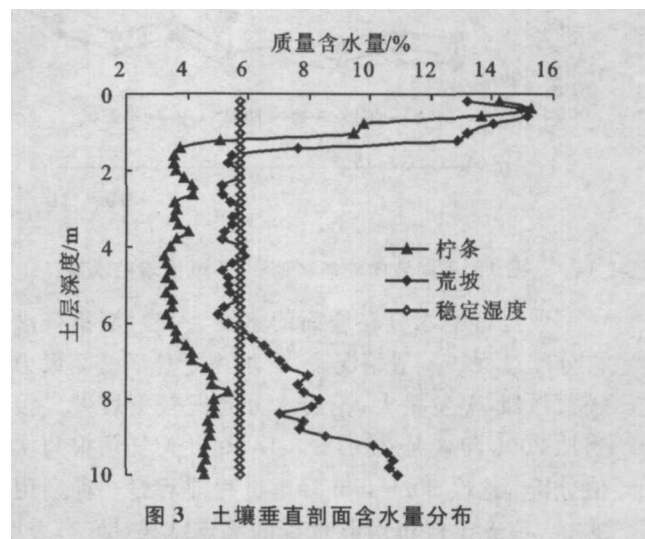


图 3 土壤垂直剖面含水量分布

3.4 自然降水对土壤水分的补偿能力

自然降水是陡坡地土壤水分的惟一补给源。陕北丘陵区的降水主要集中在秋季,弄清雨季土壤水分补偿能力,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,所以此值显然难以确定且不够准确。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限值定为雨水补偿的最大深度。图4显示了2006年雨季始末两种利用方式不同土层的土壤水分补偿度的变化。可以看出,雨季结束后2种利用方式的土壤水分均有不同程度的补偿和恢复,但由于坡度陡,径流流失快,下渗少,柠条林雨水补偿的深度仅为1.0 m,荒坡也仅为1.2 m。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。5 m土层内,柠条的土壤贮水增量为155.3 mm,荒坡为125.9 mm。

由于陕北丘陵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,因雨季降水量的差异而存在较大差异。从图5可以看出,在丰水年(年降水量达483.4 mm,雨季降水量301.5 mm),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。

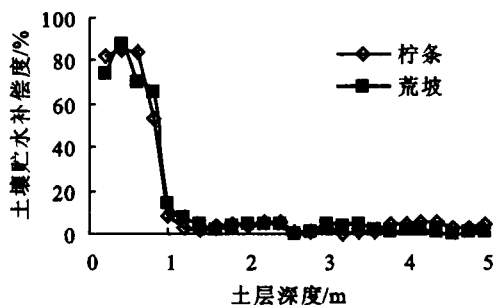


图4 雨季末两种利用方式的土壤水分补偿度

丰水年土壤贮水补偿深度仅1.0 m。0—5 m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297.5 mm,雨季降水量119.2 mm)土壤贮水补偿深度只有0.6 m,贮水亏缺补偿度在0.64%~42.53%之间。0—5 m土层雨季土壤贮水增量为23.9 mm,比丰水年的75.7 mm少51.8 mm,平均补偿度只有4.94%,即土壤贮水亏缺量的95.06%无法得以补偿恢复。连旱年(年降水量312.9 mm,雨季降水量178.5 mm),因雨季降雨量比干旱年大,土壤贮水补偿深度为0.8 m,贮水平均补偿度7.744%,但0—5 m土层贮水量减少了6.3 mm,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。

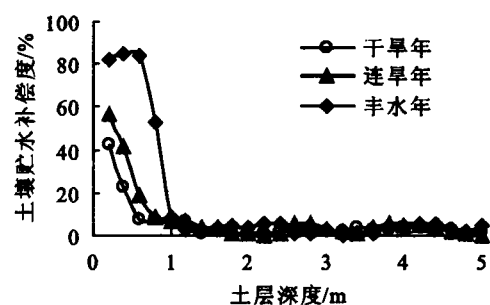


图5 不同降水年份柠条林地土壤贮水亏缺补偿

4 结论

陕北丘陵区陡坡柠条林地土壤水分亏缺极为严重,年际间陡坡柠条林地与荒坡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,土壤贮水量的变化主要发生在2 m以上土层内。生长季内,土壤越深,其含水量变化程度越小。

同一生长季内两种利用方式的土壤贮水量具有明显的季节变化特征。但柠条地与荒坡的土壤平均贮水量之间差异显著($P < 0.05$)。它们的土壤剖面含水量都呈现“高一低—较高”到趋于稳定的特征,且都产生了不同程度的干化层。相比而言,柠条林地深层土壤干燥化强度明显大于荒坡地,柠条林整个剖面

土壤干旱程度已达到了极限。

在自然降水条件下,两种利用方式的土壤水分均有不同程度的补偿和恢复。同一植被柠条林在丰水年与干旱年、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。

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。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保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。

(下转第115页)

求低。按照粒子群算法,在迭代次数达到20次后,可收敛到最优参数值,是一种推求设计洪水频率曲线统计参数的新途径,具有通用性,也可用于其它水文要素值的频率曲线的优化适线计算。

[参 考 文 献]

- [1] 水利部长江水利委员会水文局,水利部南京水文水资源研究所. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京:水利电力出版社,1994:56—84.
- [2] 郭生练. 设计洪水研究进展[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:132—133.
- [3] 中华人民共和国水利部,能源部. 水利水电工程设计洪水计算规范[S]. 中华人民共和国行业标准 SL44—93,1993:20—22.
- [4] 金光炎. 水文频率分析述评[J]. 水科学进展,1999,10(3):319—327.
- [5] 叶守泽,詹道江. 工程水文学(第三版)[J]. 北京:中国水利水电出版社,2000:196—197.
- [6] 宋松柏,蔡焕杰,栗晓玲. 专门水文学概论[M]. 西安:西北农林科技大学出版社,2005:197—230.
- [7] 陈大春,雷晓云. 基于粒子群算法的水文适线法研究

[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(4):29—31.

- [8] 侯志荣,吕振肃. 基于 MATLAB 的粒子群优化算法及其应用[J]. 计算机仿真,2003,20(10):68—70.
- [9] 吴建生,秦发金. 基于 MATLAB 的粒子群优化算法程序设计[J]. 柳州师专学报,2005,20(4):97—100.
- [10] 侯志荣,吕振肃. 基于模拟退火的粒子群算法求解约束优化问题[J]. 吉林大学学报(工学版),2007,37(1):136—140.
- [11] 吴明官,李彦兴. 不完全伽玛函数的快速算法[J]. 水文,1994(1):38—140.
- [12] 王建刚,刘亚萍. P—Ⅲ型分布 Φ 值数值计算方法比较[J]. 山西水利科技,1996,114(增刊):35—40.
- [13] 王建刚,刘亚萍. P—Ⅲ型分布 Φ 值数值计算方法比较[J]. 水文,1997(5):10—14.
- [14] 李世才. P—Ⅲ型分布 Φ P 值通用算法的研究[J]. 水文,1997(2):70—76.
- [15] 李世才,彭月英,魏文展. 皮尔逊Ⅲ型曲线新的数值算法及其应用研究[J]. 广西水利水电,2001(1):18—23.
- [16] 林莺,李世才. 水文频率曲线简捷计算和绘图技巧[J]. 水利水电技术,2002,33(7):52—5.

(上接第44页)

(2) 云雾山不同退耕年限和不同演替阶段封育草地土壤含水量和土壤水吸力之间存在显著的幂函数关系,经验模型 $\theta = AS^{-b}$ 对该区土壤具有很好的模拟效果,相关关系极显著。

[参 考 文 献]

- [1] 吴文强,李吉跃,张志明,等. 北京西山地区人工林土壤水分特性的研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):51—55.
- [2] 杨弘,李忠,裴铁璠,等. 长白山北坡阔叶红松林和暗针叶林的土壤水物理性质[J]. 应用生态学报,2007,18(2):272—276.
- [3] 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]. 水土保持学报,2002,16(4):119—122.

- [4] 邹厚远,关秀琦,张信. 云雾山草原自然保护区的管理途径探讨[J]. 草业科学,1997,14(1):3—4.
- [5] 刘娜娜,赵世伟,杨永辉,等. 云雾山封育草原对表土持水性的影响[J]. 草地学报,2006,14(4):338—342.
- [6] 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [7] 沈思渊,席承藩. 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系[J]. 土壤学报,1990,27(1):34—42.
- [8] 李开元,韩仕峰,李玉山,等. 黄土丘陵区农田水分循环特征及土壤水分生态环境[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1991,13:83—93.
- [9] 陈志雄,汪仁真. 中国几种主要土壤的持水性质[J]. 土壤学报,1979,16(3):277—281.
- [10] 姚贤良,程云生. 土壤物理学[M]. 北京:农业出版社,1986.

(上接第49页)

[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[J]. 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[J]. 生态学报,1995,15(2):178—184.
- [3] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社,2000:30—114.
- [4] 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[J]. 北京林业大学学报,1998,20(3):7—14.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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[J]. 生态学报,2004,24(11):2395—2401.
- [8] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 黄土丘陵小流域水分时空分异与环境关系的数量分析[J]. 生态学报,2000,20(5):741—747.