

## 典型草原区退耕及封育草地土壤水分物理性质研究

赵勇钢<sup>1,2</sup>, 赵世伟<sup>1</sup>, 曹丽花<sup>3</sup>, 梁向锋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000)

**摘要:** 对典型草原云雾山保护区退耕 6 a, 11 a (放牧 8 a) 和 16 a 的 3 个退耕地和 4 个封育草地 (百里香群落、铁杆蒿群落、大针茅群落和长芒草群落) 对照坡耕地表层土壤的水分特征曲线数学模型、持水参数和比水容量进行了测定。结果表明, 封育草地的持水和供水性能要大于退耕地和坡耕地, 放牧对退耕 11 a 的持水和供水性能有较大影响。云雾山自然保护区坡地退耕和草地封育后, 样地土壤的持水能力大小顺序为封育长芒草群落 > 大针茅群落 > 百里香群落 > 铁杆蒿群落 > 退耕 16 a > 退耕 6 a > 坡耕地 > 退耕 11 a (放牧 8 a)。供水能力大小顺序为封育长芒草群落 > 百里香群落 > 铁杆蒿群落 > 大针茅群落 > 退耕 16 a > 退耕 6 a > 退耕 11 a (放牧 8 a) > 坡耕地。这说明土壤持水和供水性能随着退耕年限的增加和封育草地的正向植被演替均逐渐增强的趋势。坡地退耕和草地封育能够通过改善土壤的水分物理性质提高土壤的蓄水持水性能和抗侵蚀能力。

**关键词:** 退耕地; 封育草地; 植被演替; 水分物理参数; 持水性能; 供水性能

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2007)06-0041-04

**中图分类号:** S152.75, S812.2

### Soil Moisture Physical Properties of Farming-withdrawn Land and Enclosed Grassland in a Typical Grassland

ZHAO Yong-gang<sup>1,2</sup>, ZHAO Shi-wei<sup>1</sup>, CAO Li-hua<sup>3</sup>, LIANG Xiang-feng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Resources and Environment, Tibet Agricultural and Animal Husbandry Collage, Linzhi, Tibet 860000, China)

**Abstract:** Soil water characteristic model, holding water parameter, and specific water capacity on three farming-withdrawn lands (6, 11, and 16 years) and four enclosed grasslands (*Thymus mongolicus*, *Artemisia gmelini*, *Stipa grandis* and *Stipa bungeana* communities) are studied by contrasting with slope plantation in a typical grassland on the Loess Plateau. Results show that soil holding and supplying water capabilities in enclosed grasslands are better than farming-withdrawn lands and the cultivated sloping land, but grazing on the 11 year grassland has a significant effect on the capacities. The treatments, in terms of soil holding water capability, rank in the descendant order of *Stipa bungeana*, *Stipa grandis*, *Thymus mongolicus*, *Artemisia gmelini*, 16 year withdrawing, 6 year withdrawing, cultivated sloping land, and 11 year withdrawing (grazing for 8 years) and in terms of supplying water capability, *Stipa bungeana*, *Thymus mongolicus*, *Artemisia gmelin*, *Stipa grandis*, 16 year withdrawing, 6 year withdrawing, and 11 year withdrawing (grazing for 8 years), and cultivated sloping land. Farming-withdrawn land and enclosed grassland can improve soil holding and supplying water capability by promoting soil water physical properties.

**Keywords:** farming-withdrawn land; enclosed grassland; vegetation succession; moisture physical constant; holding water capability; supplying water capability

黄土高原水资源匮乏, 水土流失严重, 土壤水分是生态环境的重要因子。植被恢复与重建被证明是

黄土高原水土流失治理、生态环境建设和农林牧可持续发展的有效措施之一。植被与土壤是相互作用的

收稿日期: 2007-05-16

收稿日期: 2007-08-21

资助项目: “十一五”国家科技支撑重大项目 (2006BCA01A07; 2006BAD0908); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目 (10501-152)

作者简介: 赵勇钢 (1980—), 男 (汉族), 湖南省永州市人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境效应研究。E-mail: zhaoyg04@mails.gucas.ac.cn.

通讯作者: 赵世伟 (1962—), 男 (汉族), 四川省荣县人, 研究员, 主要从事植被与土壤互动关系研究。E-mail: swzhao@ms.iswc.ac.cn.

环境因子,表层土壤是植被在恢复过程中与土壤作用的最直接的部分,其水分性质不仅决定土壤中水、气、热和生物状况,而且对植物营养元素的有效性和供应有着重要影响。土壤的水分性质主要包括土壤容重、土壤的孔隙状况、土壤持水和供水性能等。许多学者对黄土高原地区的植被状况和林地条件下的土壤水分特征进行了研究<sup>[1-3]</sup>,而对典型草原区退耕和封禁草地土壤水分特征方面的研究较少。

云雾山草原自然保护区位于宁夏南部山区固原市东北部,是黄土高原典型草原带以长芒草(*Stipa bungeana*)为建群种的草原生态系统代表性区域之一<sup>[4]</sup>,对于调节局部气候和径流,维持区域陆地生态平衡有着重要作用。本文就云雾山草原自然保护区不同退耕年限和封禁草地的土壤表层水分特征进行研究,旨在揭示草地植被恢复过程与土壤水分的关系,控制和改善植被恢复下土壤结构与土壤水分的关系,以为黄土高原退耕封育草地植被建设提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验地所在的云雾山草原自然保护区地处东经 106°24'—106°28',北纬 36°13'—36°19',海拔 1 800~2 148.4 m,总面积 4 000 hm<sup>2</sup>。气候类型属中温带半干旱气候区,年平均气温 4℃~6℃,干燥度 1.5~2.0,年降雨量 400~450 mm,一般丰水年占 28.0%,平水年占 35.5%,枯水年占 36.5%,7—9 月份降雨量占全年降雨量的 65%~75%,蒸发量 1 330~1 640

mm;≥0℃积温为 2 370℃~2 882℃,年均无霜期为 112~137 d,年日照时数约为 2 500 h。地势为南低北高,阳坡平缓,阴坡较陡,属温凉半干旱黄土覆盖的低山丘陵区,地带性土壤为山地灰褐土、黑垆土和黄绵土,土层分布均匀深厚,地下水位深,土壤水补充能力差。

退耕封育初期赖草(*Leymus secalinus*)为优势种,随着时间的推移,多数伴生种群如猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等开始出现,随着长芒草的竞争力不断提高,竞争能力较差的铁杆蒿(*Artemisia gmelinit*)、大针茅(*Stipa grandis*)和百里香(*Thymus mongolicus*)等由优势种降为伴生种。最终演替为区域地带性植被的典型顶级群落——长芒草(*Stipa bungeana*)草地群落<sup>[5]</sup>。

### 1.2 样地选取与测定方法

本研究的主要方法是通过在空间上横向选择不同退耕年限的样地来重建时间上纵向植被恢复演替过程,以此来实现退耕封育后草原植被恢复演替过程中土壤水分特征的变化。试验以种植作物的坡耕地为对照,选取 3 个不同年限的退耕地和 4 个封育草地为研究对象,其颗粒分布砂粒(1~0.05 mm)占 31.4%~34.3%,粗粉粒(0.05~0.01 mm)占 51.4%~54.8%,黏粒(<0.001 mm)占 1.2%~2.3%,样地具体条件见表 1。

采集样品时去掉土壤表层腐殖质层,每个样区随机布置 3 个样点,用环刀采集表层 0~5 cm 的土壤样品,同时用塑料盒采集原状土和混合样,带回室内,风干,过筛,塑料袋装好后待用。

表 1 样地基本情况

样号	样地	海拔/m	坡向	坡度	植 被	植被恢复年限
S <sub>1</sub>	坡耕地	2 037	SW79°, 半阳坡	13.3°	大燕麦	种植年限大于 30 a 的老农地
S <sub>2</sub>	退耕 6 a	2 083	NW82°, 半阳坡	13.3°	赖草—阿尔泰狗娃花+猪毛蒿	封禁地 6 a
S <sub>3</sub>	退耕 11 a	2 045	SW4°, 阳坡	17.3°	赖草—猪毛蒿+长芒草	退耕前 8 a, 少量放牧, 后 3 a 封禁
S <sub>4</sub>	退耕 16 a	2 089	SW43°, 阳坡	20.7°	铁杆蒿—大针茅+乳白香青+阿尔泰狗娃花	封禁地 16 a
S <sub>5</sub>	百里香群落	2 038	NW29°, 半阴坡	11.7°	长芒草—铁杆蒿+大针茅+百里香	30 a 前百里香为主封育区
S <sub>6</sub>	铁杆蒿群落	2 074	SW49°, 阳坡	17.3°	铁杆蒿—大针茅+阿尔泰狗娃花+百里香+长芒草	1982 年封育, 原为铁杆蒿封育区
S <sub>7</sub>	大针茅群落	2 056	NE21°, 半阴坡	13.3°	大针茅+长芒草—铁杆蒿+白颖苔草	1982 年封育, 原大针茅盖度小于 40%
S <sub>8</sub>	长芒草群落	2 028	NE31°, 半阴坡	18.3°	长芒草—铁杆蒿+大针茅+百里香	1982 年封育, 原长芒草盖度 45%

土壤含水量采用烘干法测定;土壤水分特征曲线采用离心机法测定;土壤机械组成由 MS2000 激光颗粒分析仪测定;数据分析由 excel2003 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分特征曲线数学模型

土壤水分特征曲线又称土壤持水曲线,是表征土壤水分的能量指标(基质吸力)和数量指标(含水量)之间关系的曲线<sup>[6]</sup>。由于存在滞后现象,一般用土壤水分特征曲线的脱湿过程表示土壤的持水性能。由于不同植被恢复下土壤的理化性质不同,所以它们的持水性能也不同。

土壤水分特征曲线的高低反映了土壤持水能力的强弱,曲线越高,持水能力越强;曲线越低则持水能力越弱。Gardner 和 Visser 提出的经验方程  $\theta =$

$AS^{-B}$ 对土壤水分特征曲线有良好的模拟效果<sup>[7]</sup>。方程中的参数 A 决定了土壤持水能力大小, A 值越大,持水能力越强;参数 B 决定土壤含水量随土壤水势降低而递减的快慢。本文采用该方程对土壤水分特征曲线进行拟和,测定结果拟合的含水量与土壤水吸力关系的回归方程如表 2。

从表 2 的结果可以看出,方程  $\theta = AS^{-B}$ 对样地土壤的水分特征曲线有很好的拟合效果,达极显著水平。A 值从大到小的顺序依次是封育长芒草群落 > 大针茅群落 > 百里香群落 > 铁杆蒿群落 > 退耕 16 a > 退耕 6 a > 退耕 11 a 坡耕地,表现出随着退耕年限的增加和封育植被群落正向演替土壤持水性能增加的趋势。

参数 A 和 B 的大小,受 <0.01 mm 物理性黏粒量、有机质和土壤结构的影响。

表 2 土壤水分特征曲线的数学模型与相关系数

样号	样地	土层/cm	参数 A	参数 B	拟和方程	相关系数 R	F 值检验	显著水平
S <sub>1</sub>	坡耕地	0—5	16.75	0.202	$\theta = 13.97 S^{-0.202}$	0.989	391.129	$p < 0.01$
S <sub>2</sub>	退耕 6 a	0—5	16.82	0.207	$\theta = 16.82 S^{-0.207}$	0.991	449.161	$p < 0.01$
S <sub>3</sub>	退耕 11 a	0—5	13.97	0.244	$\theta = 13.97 S^{-0.244}$	0.994	719.596	$p < 0.01$
S <sub>4</sub>	退耕 16 a	0—5	17.88	0.203	$\theta = 17.88 S^{-0.203}$	0.985	259.124	$p < 0.01$
S <sub>5</sub>	百里香群落	0—5	18.74	0.204	$\theta = 18.74 S^{-0.204}$	0.981	251.428	$p < 0.01$
S <sub>6</sub>	铁杆蒿群落	0—5	18.39	0.206	$\theta = 18.39 S^{-0.206}$	0.982	212.888	$p < 0.01$
S <sub>7</sub>	大针茅群落	0—5	23.35	0.156	$\theta = 23.35 S^{-0.156}$	0.985	310.691	$p < 0.01$
S <sub>8</sub>	长芒草群落	0—5	26.21	0.159	$\theta = 26.21 S^{-0.159}$	0.970	138.488	$p < 0.01$

注:① S<sub>3</sub> 为退耕 11 a,放牧 8 a 后封禁 3 a 样地;S<sub>5</sub>—S<sub>8</sub> 样地的名称为邹厚远 1982 年所定,下同。②相关系数均达到极显著。

### 2.2 土壤持水能力

土壤持水性能是指土壤对水分蓄集和保持的能力。样地土壤在低吸力和中吸力阶段的土壤持水曲线如图 1。在低吸力阶段,土壤所保持和释放的水量取决于土壤结构较粗的孔隙分布,主要是毛管力起作用;在中高吸力阶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<sup>[7]</sup>。由于封育草地的黏粒含量较多,粒间孔隙较细,毛管力较强,需较大的吸力才能释出,故封育草地持水力较高<sup>[8]</sup>。

田间持水量习惯上作为植物有效水的上限,是决定土壤有效水库容的一个重要因子,可表示土壤持水能力高低<sup>[8]</sup>。而迄今为止,凋萎含水量仍被普遍视为土壤有效水的下限。一般质地越重,凋萎含水量越高。从表 3 可知,封育草地的田间持水量要较坡耕地和退耕地高,其中长芒草封育草地最高,是坡耕地的 1.49 倍。封育草地的高田间含水量与其较高的物理性黏粒含量和较大的毛细管孔隙度有关。

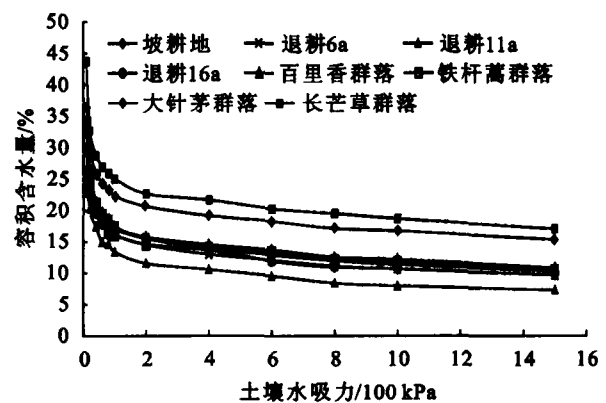


图 1 样地土壤水分特征曲线

### 2.3 土壤供水能力

土壤的供水性是指在一定条件土壤对植物生理需水的供给能力,常以有效水和有效度衡量,这种能力的强弱在很大程度上又取决于土壤的有效水储量。田间持水量至凋萎含水量之间的含水量一般视为土壤有效水范围。由表 3 可知,封育草地土壤的有效水

范围要较坡耕地和退耕地的高,长芒草群落最高(14.69%),退耕 11 a 最低(11.53%)。封育草地有效水范围较宽这一性质使土壤具有较大的有效水库容,增强了土壤对植物供水的调节能力。

比水容量是反映土壤持水性能的重要标志。如果植物以相同能力来吸水,则在不同吸力下从各种土壤中所吸收的水量会因比水容量的不同而形成很大的差别<sup>[9]</sup>。土壤水分特征曲线的斜率称为比水容量,表示土壤吸力变化时所引起的土壤含水量变化,比水容量随土壤吸力的增大而减小,它能说明土壤水分的有效性和供水能力的强弱,是评价土壤耐旱性的重要指标<sup>[10]</sup>。

比水容量可由拟和方程  $\theta = AS^{-B}$  求导得出,即  $C_\theta = d\theta/ds = ABS^{-(B+1)}$ 。式中  $AB(\text{cm}^3/(10^2 \text{kPa} \cdot \text{cm}^3))$  是土壤水吸力  $S$  为 10 kPa 时的比水容量。 $AB$

值越大,土壤比水容量达到  $10^{-2}$  数量级的吸力值越大,表明土壤的持水性或耐旱性越好。 $B+1$  表明失水随吸力变化的快慢程度,其值越大,土壤失水越快,即比水容量变化越大。根据同样地土壤的比水容量(表 4),可以看出,封育草地的  $AB$  值比坡耕地和退耕地要大,表明其供水容量较大,持水性能较强,大小顺序依次为长芒草群落 > 百里香群落 > 铁杆蒿群落 > 大针茅群落 > 退耕 16 a > 退耕 6 a > 退耕 11 a > 坡耕地。依据比水容量的定义可知,当比水容量达到  $10^{-2}$  数量级时,植物所能吸收的水量就显著减少,水分的运动和有效度也显著降低,植物利用已较困难,植物的正常生长已受影响<sup>[1]</sup>。根据表 4 可知,样地土壤的比水容量达到  $10^{-2}$  数量级时的吸力在 300 kPa 左右,因此,认为样地土壤易效水与难效水的吸力界点在 300 kPa 为宜。

表 3 不同样地土壤水分类型含水量

%

样号	样地	田间持水量	凋萎含水量	重力水	有效水		
					全有效水	易效水	难效水
S <sub>1</sub>	坡耕地	21.37	9.69	38.81	11.68	7.95	3.73
S <sub>2</sub>	退耕 6 a	21.57	9.62	33.35	11.95	8.16	3.79
S <sub>3</sub>	退耕 11 a	18.74	7.21	31.08	11.53	8.06	3.47
S <sub>4</sub>	退耕 16 a	22.85	10.31	38.17	12.54	8.54	3.99
S <sub>5</sub>	百里香群落	23.97	10.78	34.80	13.19	8.99	4.20
S <sub>6</sub>	铁杆蒿群落	23.55	10.53	32.56	13.02	8.89	4.13
S <sub>7</sub>	大针茅群落	28.16	15.33	35.65	12.83	8.48	4.36
S <sub>8</sub>	长芒草群落	31.73	17.04	30.37	14.69	9.72	4.97

表 4 样地土壤的比水容量

ml/(10<sup>2</sup> kPa · g)

样地	土壤水吸力/10 <sup>2</sup> kPa							参数拟和	
	0.1	0.4	0.6	1.0	2.0	4.0	15.0	AB	B+1
坡耕地	5.38×10 <sup>-1</sup>	1.02×10 <sup>-1</sup>	6.25×10 <sup>-2</sup>	3.38×10 <sup>-2</sup>	1.47×10 <sup>-2</sup>	6.39×10 <sup>-3</sup>	1.30×10 <sup>-3</sup>	3.38	1.202
退耕 6 a	5.61×10 <sup>-1</sup>	1.05×10 <sup>-1</sup>	6.45×10 <sup>-2</sup>	3.48×10 <sup>-2</sup>	1.51×10 <sup>-2</sup>	6.52×10 <sup>-3</sup>	1.32×10 <sup>-3</sup>	3.48	1.207
退耕 11 a	5.98×10 <sup>-1</sup>	1.07×10 <sup>-1</sup>	6.44×10 <sup>-2</sup>	3.41×10 <sup>-2</sup>	1.44×10 <sup>-2</sup>	6.08×10 <sup>-3</sup>	1.17×10 <sup>-3</sup>	3.41	1.244
退耕 16 a	5.79×10 <sup>-1</sup>	1.09×10 <sup>-1</sup>	6.71×10 <sup>-2</sup>	3.63×10 <sup>-2</sup>	1.58×10 <sup>-2</sup>	6.85×10 <sup>-3</sup>	1.40×10 <sup>-3</sup>	3.63	1.203
百里香群落	6.11×10 <sup>-1</sup>	1.15×10 <sup>-1</sup>	7.07×10 <sup>-2</sup>	3.82×10 <sup>-2</sup>	1.66×10 <sup>-2</sup>	7.20×10 <sup>-3</sup>	1.47×10 <sup>-3</sup>	3.82	1.204
铁杆蒿群落	6.09×10 <sup>-1</sup>	1.14×10 <sup>-1</sup>	7.02×10 <sup>-2</sup>	3.79×10 <sup>-2</sup>	1.64×10 <sup>-2</sup>	7.12×10 <sup>-3</sup>	1.45×10 <sup>-3</sup>	3.79	1.206
大针茅群落	5.21×10 <sup>-1</sup>	1.05×10 <sup>-1</sup>	6.57×10 <sup>-2</sup>	3.64×10 <sup>-2</sup>	1.63×10 <sup>-2</sup>	7.33×10 <sup>-3</sup>	1.59×10 <sup>-3</sup>	3.64	1.156
长芒草群落	6.01×10 <sup>-1</sup>	1.21×10 <sup>-1</sup>	7.54×10 <sup>-2</sup>	4.17×10 <sup>-2</sup>	1.87×10 <sup>-2</sup>	8.36×10 <sup>-3</sup>	1.81×10 <sup>-3</sup>	4.17	1.159

### 3 结论

(1) 云雾山自然保护区坡地退耕和草地封育后,样地土壤的持水能力大小顺序为封育长芒草群落 > 大针茅群落 > 百里香群落 > 铁杆蒿群落 > 退耕 16 a > 退耕 6 a > 坡耕地 > 退耕 11 a (放牧 8 a)。供水能

力大小顺序为封育长芒草群落 > 百里香群落 > 铁杆蒿群落 > 大针茅群落 > 退耕 16 a > 退耕 6 a > 退耕 11 a (放牧 8 a) > 坡耕地,趋势表现为随着退耕年限的增加和封育草地的正向植被演替均逐渐增强。放牧对退耕 11 a 的持水和供水性能有较大影响。

(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,粟晓玲. 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

(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分物理性质[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.

(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.

[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  $\Phi$  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  $\Phi$  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  $\Phi$  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.

- [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.

- [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.