

# 黄土高原丘陵沟壑区生态用水资源利用研究

姚进忠<sup>1</sup>, 尚新明<sup>2</sup>, 吴祥林<sup>2</sup>

(1. 甘肃省水利厅, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省定西地区水土保持科学研究所, 甘肃 定西 743000)

**摘要:** 对黄土高原丘陵沟壑区不同植被地连续 10 a 的试验调查发现, 人工草地和沙棘、油松林地土壤水分在长系列年内变化上基本一致, 1 m 土层含水量处于 100~140 mm, 生长期土壤水分基本上处于亏缺状态; 而荒坡草地土壤含水量年内均比人工草地高约 40 mm, 土壤水分一直处于适宜、稳定的水平。林地沙棘和油松均表现出适应该地气候特点的生长状况, 但从土壤水文循环状况看, 土壤水分长时期处于亏缺状态不利于植被的再生和生态效益的发挥。径流试验研究表明, 人工草地、油松林地年内平均径流深分别为 1.45 mm 和 1.27 mm, 径流系数为 0.08 和 0.07; 荒坡草地和沙棘林地在年内基本上不发生大的径流, 且多为清流。因此, 植被恢复在治理措施上应当注重植被的自然修复和保护, 并充分利用径流资源补充土壤水分, 使其朝着利于植被生长的方向发展。

**关键词:** 生态用水; 水资源; 利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2003)04-0038-05

中图分类号: S152.7

## Water Resource Used in Ecosystem of Hilly and Gully Areas of Loess Plateau

YAO Jin-zhong<sup>1</sup>, SHANG Xin-ming<sup>2</sup>, WU Xiang-lin<sup>2</sup>

(1. Water Conservancy Department of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu Province, China;

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

**Abstract:** The continuous investigation and experiment on different vegetation in the loess hilly and gully region in past 10 years were conducted. The results indicate that soil moisture content varieties among the artificial grass, the seabuckthorn and the Chinese pine woodland are basic consistence in the long series years, the water resources were 100~140 mm in 1 m soil layer, and the soil was in "dry horizon" stage during growth period. Soil water content in natural grass land was about 40 mm higher than artificial grass land in a year, the soil humidity was always in proper and stable level. The woodlands, seabuckthorn and Chinese pine, express the growth condition that are adapte to the weather character. But from the point of hydrological circulation condition, the long time "dry horizon" stage of soil humidity was disadvantage for vegetation growth and ecosystem development. The runoff experiments indicate that the average runoff of artificial grass land and Chinese pine woodland was 1.45 mm and 1.27 mm, the runoff coefficient was 0.08 and 0.07; The natural pasture and the seabuckthorn woodland did not produce big runoff during a year. The runoff was also small, and lots of them were clear fluid. Therefore, the managing measures of vegetation instauration should appropriate to its natural restoration and protection, and make greatly use of the runoff resources to add soil humidity, and to develop toward the beneficial vegetation growth direction.

**Keywords:** the water used to ecosystem; water resources; utilization

## 1 前言

黄土高原丘陵沟壑区水资源由于时空分布极不均匀, 资源总量与人口、耕地的分布也不相适应, 水资源短缺问题历来十分突出。1995 年以来, 甘肃省“121”雨水集流和集雨节灌工程的实施, 雨水资源虽然得到有效应用, 人畜饮水问题基本解决, 农田补灌

也建立起以农村庄场、庭院、道路为骨架的集雨节灌系统, 农业生产重新焕发出发展活力。但生态环境建设用水特别是植被恢复用水短缺问题依然严重。仅依靠庄场、道路和闲散地集雨补灌, 面积毕竟有限; 应大面积开展农坡地集雨节灌工程。(1) 目前缺少经济实用的集雨材料; (2) 坡地硬化工程造价太高; (3) 不利于农村土地保护与利用, 而且工程管护困难。大面

收稿日期: 2003-02-18

修回日期: 2003-05-08

作者简介: 姚进忠(1964—), 男(汉族), 甘肃通渭人, 博士研究生, 高级工程师, 水资源处处长。主要从事水资源利用研究和管理工作的电话(0931)8416921。

积林草恢复仍依靠天然降水,由于降水不足,年际变化大,供需错位,林木生长成活又缺少必要的工程支撑,实际生长效果不佳,造林成活率不足50%,造林保存率仅为15%左右,即使成活的也为小老树,根本起不到生态屏障的作用<sup>[1]</sup>。草地退化更为严重,据调查全省90%的草地已经或正在退化;重度(三化)草地达 $5.53 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占可利用草地的33%,而且这种趋势仍在发展,西部实施大开发战略,实现生态环境的根本改善是基础,只有林草面积达到土地面积的40%以上,生态环境才能改善<sup>[2]</sup>。从这个意义上讲,林草的面积不难实现,而重要的是实现质量的变化。

黄土丘陵沟壑区从自然、地理、人文的发展历史来看,它宜于发展农牧型经济<sup>[3]</sup>。很多研究资料表明,该地降水和土壤水分状况只能基本达到牧草的生长需求量<sup>[4]</sup>。坡面水沙产量分布特征分析认为,流域径流的70%来自于坡面。朱兴平等研究认为,黄土丘陵沟壑区草地径流约占流域径流的22%<sup>[5]</sup>。因此,利用草地径流就成为恢复植被生态需水的可能。

## 2 试验地选择

试验选择在甘肃省中部地区的定西县,该县位于北纬 $35^{\circ}17'54''$ — $36^{\circ}2'40''$ ,东经 $104^{\circ}12'48''$ — $105^{\circ}1'6''$ 之间。属于祁连山加里东褶皱带东部,属陇西盆地的一部分,多为古生褶皱带新生代断裂的地区,整个地势南高北低,平均海拔2100m,地貌特征为典型的黄土丘陵沟壑区。年内平均气温 $6.3^{\circ}\text{C}$ ,极端最高气温 $34.3^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-27.1^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量425.1mm,蒸发量多年平均1526mm,是降水量的3.6倍;日照时数2463.9h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温2239.1 $^{\circ}\text{C}$ 。该县境内主要河流有祖厉河的支流关川河和西巩河,集流面积3490.51 $\text{km}^2$ ,由于受降水补充,多为季节性河流,年平均流量 $1.67 \text{ m}^3/\text{s}$ ,径流量 $5.26 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,含沙量大,可利用程度低。地下水资源贮量 $3.28 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,其中可利用的为 $2.26 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。植物类型属于温带半干旱草原和干旱荒漠草原植被带。天然植被比较稀疏,主要以禾本科、菊科、蓼科、莎草科植物为主,人工林草地以杨、柳、槐、油松、侧柏、杏、梨和紫花苜蓿、红豆草等豆科植物为主,面积约 $3.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。

## 3 研究方法及其内容

### 3.1 试验方法

(1) 植被覆盖度采用针刺法;林木郁闭度采用投影法调查;

(2) 土壤含水量采用烘干法:每月对0—100cm

和0—200cm土层进行测定;

(3) 植被耗水量用农田水分平衡法计算:

$$E_T = P + I - \Delta W$$

式中: $E_T$ ——植被耗水量(mm); $P$ ——降水量(mm); $I$ ——补灌量(mm); $\Delta W$ ——时段末与时段初土壤贮水量之差(mm)。

### 3.2 研究内容

(1) 降水时空分布与水资源化潜力分析。通过对定西长系列降水资料的统计分析,研究降雨量及降水强度在不同时期的分布特征,确定水资源化利用的时期、数量和途径。

(2) 植被生长与土壤水环境状况研究。通过定点试验,在调查植被生长量和土壤含水量的基础上,分析植被生长状况,确定恢复土壤水及植被生长的合理途径。

(3) 草地径流与生态用水水资源利用途径。通过建立径流小区,调查不同植被类型的径流特征和汇流机制,分析降水在不同下垫面上的产流情况,为实施工程调控提供理论依据。

## 4 研究结果

### 4.1 降水特征与水资源化潜力分析

1958—1997年定西地区 $\geq 5 \text{ mm}$ , $\geq 10 \text{ mm}$ 降雨资料表明(表1), $\geq 5 \text{ mm}$ 降水主要集中在3—11月,降水304.0mm,84%的水量又集中于5—9月,计255.3mm;7—9月降水179.8mm,占总量的59.1%,7—8月降水最多,分别为64.7mm和71.7mm,占总量的21.3%和23.6%,降水变率达到38.8mm和36.9mm; $\geq 10 \text{ mm}$ 降水量共226.3mm,61%的出现在7—9月,年内 $\geq 10 \text{ mm}$ 降水最多的是7月和8月,分别为50.5mm和56.6mm,占总量的22.3%和25.0%,降水变率达到37.3mm和38.5mm。降水在年内变化上的数量少,供需错位,易失多变的特点,不能稳定地满足植物生长的需求,仅仅是一种潜在的可利用资源,只有经过人工干预才能满足生物界连续供水需水的要求,才能成为水资源。也正是这种雨强大,雨量集中的特点,又是人工集雨的最佳时机。

黄土高原,在无地下水和河川径流补充情况下,降水是维持生态需水的唯一来源。根据该地水文资料,降水在自然下垫面的分配,有10%~15%形成径流,20%~30%用于第一性生产,60%~70%的降到地面和渗入土壤,又无效地被蒸发。因此,形成径流和被无效蒸发的这部分雨水,实际上就成为资源化利用的对象。由于自然下垫面性质的不同(如坡度、坡长、集雨材料、植被类型等)雨水资源化则不同,坡度大,

坡面长, 汇流时间短, 汇流量大; 集水效率高的膜类材料集水效率 > 油毡及混凝土 > 自然坡面。从降水特征来看, 受降水量和雨量的影响资源化程度也不同。从定西水保所 1990—1999 年的降水情况分析, 总降水日数 948 d, < 5 mm 降水日数为 678 d, 占总降水日数的 71.5%, 降水量为 954.8 mm, 占总降水量 4191.4 mm 的 22.8%,  $\geq 5$  mm 降水日数为 270 d, 降水量 3 236.6 mm, 占总降水量的 77.2%。虽然  $\geq 5$  mm 的降水日数少, 但雨量和雨强较大, 很适合集流。因此, 从该区降水时空特征分析, 雨水资源潜力的计算, 以易于产流雨量  $\geq 5$  mm 雨量 304 mm 算, 每年约 1.11

$\times 10^9 \text{ m}^3$ , 可实现雨水资源潜力。但是由于受自然条件和技术、经济水平的限制, 只能将在一定自然和技术经济条件下, 通过已有的利用方式和技术, 雨水资源中可以开发利用的最大值算作可实现资源潜力<sup>[6]</sup>。在黄土高原地区, 降雨经过下垫面的转化, 就成为地表水、地下水和土壤水 3 种形式, 土壤水是植物赖以生长的基础, 对植物而言, 只有其它水资源(雨水资源、地表水资源、地下水资源)转化为土壤水时才能被植物吸收利用。因此, 对于农业生产和生态需水来讲, 雨水转变为土壤水, 即可认为转化为现实可以利用的水资源。

表 1 1958—1997 年定西气象站  $\geq 5$  mm,  $\geq 10$  mm 降雨情况

雨强	项目	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	合计
$\geq 5$ mm	雨量	5.5	20.2	34.9	40.6	64.7	71.7	43.4	20.5	3.1	304.0
	方差	7.5	19.6	24.9	21.7	38.8	36.9	31.0	14.2	6.4	85.0
$\geq 10$ mm	雨量	2.6	10.7	24.7	28.3	50.5	56.6	29.9	10.9	1.7	226.0
	方差	6.6	17.1	22.8	21.7	37.3	38.5	27.2	12.1	6.1	99.1

在黄土地区, 降水入渗深层渗漏过程微弱。由于黄土土层深厚, 一般深度均在数十米甚至百米以上, 水分难以入渗到深层; 另一方面, 黄土高原地区 3/4 的土壤质地组成以轻壤土为主, 土壤容重 1.2~1.4 g/cm<sup>3</sup>, 土壤持水能力较高, 2 m 土层最大蓄水量高达 382~640 mm, 而降水量均为 300~600 mm, 土壤本身即可容纳当年的全部降雨, 形成一个巨大的土壤水库。因此, 从以上分析, 雨水资源化途径有 2 条: 一种是雨水的自然资源化过程, 是指雨水通过入渗进入土壤, 增加土壤水库贮水量, 直接供给植物生长; 一种是雨水的人为资源化过程, 主要是指经过人为干预, 使雨水变为雨水资源, 促进农业生产或解决人畜饮水, 如各种增加雨水入渗的水土保持措施和拦蓄径流的雨水集流系统等。

#### 4.2 植被生长与土壤水环境状况研究

土壤水是植被生长依赖的基础, 土壤水分的盈亏决定着植被在生态环境中的效应。黄土丘陵沟壑区, 由于降水的分布特征, 决定着土壤水分和植被类型及分布的状况。根据 1986—1996 年期间对人工草地、荒坡、油松、沙棘等植被的定点试验研究, 草类中人工草地(苜蓿), 产草量 2 100 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 覆盖度 80%, 荒坡产草量 600 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 覆盖度 100%。人工草地生长快、产草量高, 覆盖度大。从 1 m 土壤水分的时空状况看(图 1), 人工草地和荒坡草地 5—10 月的土壤水含量变化趋势基本一致, 5—7 月土壤水分处于消耗阶段, 7—8 月处于稳定阶段, 8—10 月处于缓慢恢复和恢复阶段; 土壤含水量在各个阶段, 荒坡草地

均比人工苜蓿地高约 40 mm, 在长时期年内空间的变化上, 荒坡草地土壤含水量一直处于适宜的稳定水平, 即使在 7—8 月最低含水量阶段仍维持在 140 mm 左右, 即 1 m 土层含水率平均 11.0%; 而人工苜蓿地除了在消耗阶段以前 1 m 土层含水量达到 104 mm 以上外, 在消耗和稳定阶段即 5—9 月生长期间处于 100~140 mm 之间。7—9 月高蒸发期, 土壤含水量稳定于 108 mm 的水平, 相当于该土层平均含水率 8.5%, 土壤长时期处于亏缺状态。

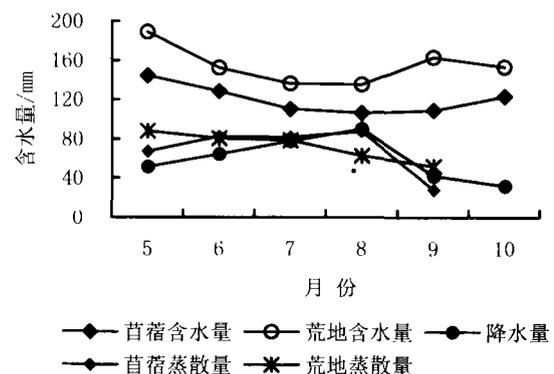


图 1 不同草地土壤水分状况

灌木树种沙棘和乔木树种油松的长系列试验研究表明, 10 a 生油松和沙棘生长高度分别为 4.03 m 和 3.64 m, 冠幅 2.69 m × 2.49 m 和 1.78 m × 1.94 m, 郁闭度达到 85% 和 100%, 从生长情况看, 完全表现出适应半干旱气候条件的特点, 但从 1 m 土层深水分状况看(图 2), 10 a 林地, 不论是灌木沙棘还

是乔木油松,土壤含水量在时空上的变化趋势和变化数量都基本一致,并和人工苜蓿草地的变化趋势和变化数量极相似。即 5—7 月是林物水分消耗阶段,7—8 月由于 1 m 土层土壤水分处亏缺状况,土壤含水量维持在 100 mm 左右,有效含水量很低,土壤处于“干层”阶段,8—10 月水分开始恢复。林地的水分变率略大于人工草地。由表 2 可见,其它主要树种青杨、柠条等植物在不同立地条件下水分蒸散情况也可看出这种变化。这可能是由于林木树种具有能够从更深层土壤调节水分运行,维持体内水分供给的能力。

表 2 黄土丘陵地区主要造林树种不同立地条件下水分蒸散量

树种	立地条件	5—8 月	9—10 月	11—4 月	合计
青杨	阴坡中部	350.5	101.6	63.2	515.4
	阴坡下部	340.0	91.8	68.1	500.0
柠条	阳坡下部	357.8	88.5	72.7	513.0
杞柳	阳坡上部	357.8	60.0	60.3	478.1
降水量		362.0	89.7	73.4	525.1

注:水分散失均以 200 cm 土层土壤水分测定测算。

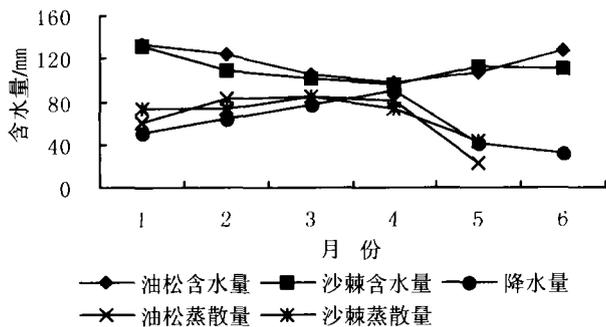


图 2 不同林地各月水分状况

由以上分析,黄土丘陵地区,由于降水较少,降水时空分布不均,人工草地和林地水分长期处于亏缺状态,从土壤水文环境看,不利于乔灌植被的生长和生态效益的发挥。退耕还林(草)应当遵循植被地带性规律,在措施上应当注重植被的自然修复和保护,并且充分利用雨水径流资源,补充植被土壤水分,使其朝着利于植被生长的方向发展。

#### 4.3 草地径流与生态用水资源化利用途径

黄土丘陵地区,在利用庄场道路解决人畜饮水后,利用道路和高集水材料的坡地实行集雨节灌恢复植被和促进生产量的提高,这对于大面积经济条件欠发达的地区来讲,受各方面条件的限制,在短期内很难实现。黄土丘陵地区,有着约占 20% 的荒坡和草地面积,根据该项目 1986—1996 年对大于 10° 坡度草地 99 场次降水径流资料的分析研究,人工草地(苜蓿)

和荒坡草地在雨量 3.5 mm,雨强 0.18 mm/min 的情况下即可产流,但考虑 < 5 mm 降雨量少,径流量低,在分析时只对 ≥ 5 mm 降水进行了分析,结果表明,草地类人工苜蓿地和荒坡草地,径流量随降水量的增加有逐渐增大的趋势,径流系数随雨强的增大而增大,降雨量和降水强度相比,雨强对产流的影响较大。人工草地径流量总体比荒坡草地大。10 a 期间平均降水 18.3 mm/次的情况下,人工草地平均径流深 1.45 mm,径流系数达到 0.08,荒坡草地平均径流深 0.66 mm,径流系数达到 0.04;发生最大径流深,在降水 47 mm,雨强 0.04 mm/min 的情况下,人工草地达到 11.54 mm;荒坡草地是在降水 13.8 mm,雨强 0.12 mm/min 的情况下,只有 4.17 mm;最大径流人工草地在降水 15.3 mm,雨强 0.16 mm/min 的情况下,径流系数达到 0.6;荒坡地在降水 13.8 mm,雨强 0.12 mm/min 的情况下,系数达到 0.3。从发生产流的频率看,径流系数 ≥ 0.05 的场次人工草地有 47 次,占总观测数的 49.5%,荒坡草地有 21 次占总数的 22.1%;发生径流系数 ≥ 0.1 的场次,人工草地有 28 次,占总观测数的 29.5%,荒坡草地为 8 次,占总观测数的 8.4%。荒坡草地拦蓄雨水的能力比人工草地强,10 a 期间大部分降水时期只发生小径流量产流,径流系数 ≥ 0.1 的产流次数每年平均不到 1 次。这主要由于荒坡地是生物活动的主要场所,特别是动物活动较人工草地频繁,动物洞穴较多,因此拦蓄雨水能力比人工草地强。

林地油松林和沙棘林地相比,平均降水 18.3 mm/min 的情况下,油松林地产流深平均 1.27 mm,径流系数 0.07。沙棘林产流深 0.58 mm,径流系数 0.03。发生最大径流深,是在降水 47 mm,雨强 0.04 mm/min 的情况下油松林产流 11.7 mm,沙棘林产流 8.45 mm;而最大径流系数油松林地在降水 22 mm,雨强 0.11 mm/min 的情况下,径流系数达到 0.38,沙棘林地是在降水 47 mm,雨强 0.04 mm/min 的情况下,径流系数达到 0.18。降水和雨强的影响相比,降雨量比雨强大。从发生产流的频率看,发生径流系数 ≥ 0.05 的场次,油松 45 次,占总观测数的 47.4%,与人工草地苜蓿地相近;沙棘只有 21 次占总观测次数的 22.1%,和荒坡草地一样。从发生径流系数 ≥ 0.1 的场次看,油松林有 21 次占总观测数的 22.1%,沙棘林仅有 4 次占总观测数的 4.2%。可以看出,沙棘林地在年内降水期间,和荒坡草地一样,基本上不发生大径流。由于栽植密度大,覆盖度好,枯枝落叶层厚,产流也是小径流,且是清流。而油松林地相比枯枝落叶较少、产流量、产流次数也较沙棘林地多。

从降水设计频率看(表 3),以定西地区 5 a 一遇最大降水日数 60 d 为设计频率,降水量为 211.0 mm,100 m<sup>2</sup> 人工草地和油松林地平均每年产流量分别为 1.7 m<sup>3</sup> 和 1.5 m<sup>3</sup>。如果补充草地和林地土壤的话,可以增加土壤水 17 mm 和 15 mm,可以缓解人工草地和林地水分不足的状况,增进土壤水文环境的水分循环。

表 3 定西地区大于 5 mm 降水量频率统计 mm

历时/d	1	5	10	30	60	90
5%	59.5	89.8	115.1	177.9	256.6	306.2
10%	52.7	80.9	103.7	16.4	234.6	282.8
20%	45.2	71.0	90.9	146.3	211.0	255.1
50%	33.7	53.8	68.9	114.7	165.4	210.5
75%	26.5	41.6	53.3	92.5	133.4	176.5
平均	35.8	55.4	71.0	117.1	168.8	212.6

## 5 结 论

(1) 黄土丘陵沟壑区,由于河川径流和地下水资源总量亏缺,植被用水全靠降水补充。该地虽然降水 425 mm,但降水主要时期与植被生长时期相互错位。地面蒸发大,导致坡面主要植被类型人工草地(苜蓿地),乔木林,灌木林土壤水分长期处于低含水量水平,主要乔木林和密度较大灌木林地并形成长时期的土壤水分亏缺,不利于植被生态恢复;另一方面,荒坡草地植被靠自然恢复,野生动物活动频率,土壤水分环境明显优于人工草地(苜蓿地)和其它林地,对土壤水文循环和植被生态恢复有改善作用。

(2) 黄土丘陵沟壑区,一方面植被用水短缺,年

降水量 425 mm 只能基本满足耗水较低的草本植物,主要乔、灌木林分正常耗水约 500 mm(乔木)和 478 mm(灌),年内水分短缺 53.0~75.0 mm。另一方面,草地(人工)和林地(乔)又发生不同程度的径流,径流系数约 0.07~0.08,造成一定水资源的浪费。因此,植被用水一方面通过工程措施集流聚水,实行时空调控;另一方面,通过改善林木下垫面状况,改善林分结构(栽植密度、林木种类)和蓄水保水措施合理利用水资源。

(3) 研究认为草地径流实行集流聚水,实现时空调配,工程上采用容积 15~20 m<sup>3</sup> 蓄水设施,集水面积(草地)880~1180 m<sup>2</sup>,年增加土壤水 15~17 mm,是缓解植被生态用水亏缺的有效措施。

### [参 考 文 献]

- [1] 侯庆春,韩蕊莲.黄土高原植被建设中的有关问题[J].水土保持通报,2000,20(2):54-55.
- [2] 吴钦孝,赵鸿雁.黄土高原森林水文生态效应和林草适宜覆盖指标[J].水土保持通报,2000,20(5):33-34.
- [3] 朱显谟.抢救土壤水库实为黄土高原生态环境综合治理与可持续发展的关键[J].水土保持学报,2000,14(1):1-6.
- [4] 袁嘉祖,闵庆文.水是西北地区生态系统重建的根本[J].自然资源学报,2001,16(6):511-515.
- [5] 朱兴平,黄丘付五区小流域水土流失的时空变化[J].中国水土保持,1995(12):12-13.
- [6] 冯浩,邵明安,吴普特.黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价初报[J].自然资源学报,2001,16(2):141-144.