

黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究

赵荟¹, 朱清科¹, 秦伟^{1,2}, 刘中奇¹, 王晶¹, 邝高明¹

(1. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048)

摘要: 黄土高原地区坡面内地表的起伏形成微地形, 利用其土壤含水量的差异来提高植被成活率已经成为黄土高原生态恢复建设的重要方向。采用探针式 TDR 对陕西省吴起县合家沟流域内的微地形及其相应原状坡的土壤含水量进行测定。结果表明, 微地形对土壤含水量有显著影响, 阳坡各微地形土壤水分顺序为: 塌陷 > 切沟底 > 缓台 > 浅沟底 > 原状坡 > 陡坎。0—20 cm 土层土壤水分变异系数最大的是切沟底为 0.405, 最小的是缓台仅 0.226, 阴坡原状坡各层的变异系数均小于阳坡的微地形。最后指出黄土高原地区植被恢复建设时, 在按传统立地类型划分原则所确定的植被恢复单元内, 还应该按照微地形的水分特征有区别地配置植被类型。

关键词: 黄土高原; 干旱阳坡; 微地形; 土壤水分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)03-0064-05

中图分类号: S152.7

Soil Moisture Characteristics on Microrelief of Dry South-slope on the Loess Plateau

ZHAO Hui¹, ZHU Qing-ke¹, QIN Wei^{1,2}, LIU Zhong-qi¹, WANG Jing¹, KUANG Gao-ming¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: On the loess plateau, fluctuating land surface forms microrelief. Using the difference of soil moisture content on microrelief to improve the survival rate of vegetation has become an important method in ecological restoration and construction. Using probe-type TDR, we measure the soil water content on microrelief and the corresponding original slope in Hejia valley, Wuqi County, Shaanxi Province. Results show that microrelief has a significant impact on soil moisture content. In terms of soil water on sunny slope, landform units may be ranked in the descendant order of collapse, gully bottom, platform, shallow gully bottom, original slope, and scarp. The variation coefficient of soil water (0—20 cm surface soil) at gully bottom is the biggest (0.405) and on platform, the smallest (0.226). The variation coefficient of soil water on shady original slope is less than that on microrelief of sunny slope. Therefore, in the vegetation restoration of the Loess Plateau, we should configure vegetation types in the vegetation restoration units determined by the traditional principles according to the soil water characteristic on microrelief.

Keywords: the loess plateau; dry south-slope; microrelief; soil moisture

黄土高原大部分地区降雨稀, 气候干燥, 蒸发量大, 干旱是该地区的基本气候特征, 水分成为该区植被建设的主要限制因素。由于气候条件的地带性差异引起区域尺度的土壤水分差异, 地形、植被等下垫面条件的不同导致的流域或坡面尺度的水分差异, 坡面存在的微地形使降水发生再分配造成水分的空间差异, 而微地形水分状况的差别可能导致植被分布差

异, 决定了人工植被恢复时必须采取不同的配置方式。目前, 国内对黄土高原土壤水分时空分布规律的研究大多集中在区域尺度^[1-2]、流域尺度^[3-4]和坡面尺度^[5-9], 而在微地形尺度^[10]上研究土壤水分状况的工作较少。

现今, 国内外有关研究认为, 不同坡向所引起的水分空间差异使得阳坡的水分条件更差, 植被恢复更

收稿日期: 2009-12-25

修回日期: 2010-01-14

资助项目: “十一五” 国家科技支撑项目 (2006BAD03A03); 中国水科院青年基金 (泥集 1008)

作者简介: 赵荟 (1985—), 女 (回族), 甘肃省陇南市人, 研究生, 研究方向为水土保持及生态环境地理学。E-mail: zhaohuibjfu@126.com。

通信作者: 朱清科 (1956—), 男 (汉族), 宁夏固原县人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土保持和林业生态工程。E-mail: xiangmb@bjfu.edu.cn。

困难^[11-15],因此,阳坡成为黄土高原地区林业生态工程建设中最困难的立地。本文通过实地量测和对比分析阳坡内各种微地形及其相应原状坡的土壤含水量,以期揭示黄土高原坡面内微地形尺度的土壤水分空间分异特征。尤其当坡面平均水分条件较差而无法恢复乔灌植被类型时,由于坡面内微地形的汇水作用导致其水分条件较好,能满足乔灌生长,从而打破以往按传统立地类型配置植被的格局。本研究结果能为坡面植被恢复提供科学依据和指导。

1 研究区概况

研究区位于陕西省吴起县合家沟流域,地处东经 107°38'57"—108°32'49",北纬 36°33'33"—37°24'27",地貌属黄土高原梁状丘陵沟壑区;多年平均降水量 478.3 mm,降水量年际变化大,季节分配不均,7—9 月降水量占全年降水量的 64% 以上,其它季节多为无效降水;年平均气温 7.8℃,无霜期 96~146 d,属暖温带大陆性干旱季风气候,多年平均陆地蒸发量 400~450 mm;土壤类型为地带性黑垆土剥蚀后广泛发育在黄土母质上的黄绵土,质地为轻壤^[16]。该流域从 1998 年开始封育,封禁后恢复起来的草本群落以百里香 (*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿 (*Artemisia gmelinii*)、芨蒿 (*Artemisia girilalii*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝 (*Lespedeza davurica*)、萎陵菜 (*Potentilla chinensis*) 和冷蒿 (*Artemisia frigida*) 为主,在沟底等部位零星分布有灌木和乔木。该封育流域内,植被群落类型和生长时间基本一致,虽然盖度有所差异,但在最大程度上消除了植被对土壤水分空间差异所造成的影响,为实验提供了前提保证。

2 研究方法

通过对研究区的实地调查,结合当地实际情况以及研究目的对微地形进行分类,再用 TDR 测定各种微地形及其相应原状坡的土壤含水量,然后分别通过变异系数测算,差异显著性分析,差异程度比较,以确定各类微地形根层生境条件的优劣状况。

2.1 微地形类型描述

由于地表起伏对地表径流方向的改变造成坡面内局部土壤含水量的差异,这种差异又造成了地表植被生长状况的差别,而地形和地表覆盖的共同作用影响着土壤水分的垂直和水平运动,形成各种微地形特有的生境条件。浅沟和切沟是 2 种特殊的微地形,在黄土高原地区大量存在。辛树帜等曾这样描述浅沟和切沟的形成:“黄土高原的梁峁坡,随着各种面蚀的发展,地表径流有规律地进一步集中,由小的股流合并

为较大的股流,向下切入底土,形成横断面为宽浅槽形的浅沟,坡面侵蚀继续强化后,较小浅沟的径流集中到较大浅沟中,下切力量增大,沟深切入母质,并且有明显的沟头,形成切沟^[17]”。在切沟形成之前由于水力侵蚀和重力侵蚀的混合作用而形成凹陷状的微地形叫塌陷。此外,在坡面内,坡度明显小于或者大于原状坡坡面平均坡度的局部地块称为缓台或者陡坎(见表 1)。

表 1 微地形描述

编号	微地形	特征描述
	浅沟底	侵蚀沟发育的初级阶段,形成横断面为宽浅槽形
	切沟底	浅沟侵蚀继续发展,横断面呈“V”字形,在长、宽、深 3 方面的侵蚀同时不同程度地进行
	塌陷	切沟形成之前的陷坑
	缓台	坡面内坡度明显小于原状坡坡面平均坡度的局部地块
	陡坎	坡面内坡度明显大于原状坡坡面平均坡度的局部地块

2.2 数据测定

采用 TRIME-EZ 型号的探针式 TDR (time domain reflectometry) 测定合家沟封禁流域阳坡内包含的 5 种微地形及其所在原状坡的土壤含水量,并且选择与阳向原状坡坡度、坡位及植被类型相同的阴坡作为对照。雨季过后土壤水分在土体内经过近半年时间的再分配,其测定结果能够比较客观地反映不同微地形土壤水分的差异,因此数据于每年旱季测定。据气象观测资料,2008 年 4 月 28 日之前 1 个月内没有降水,将测定时间确定为 2008 年 4 月 28 日至 5 月 7 日。2009 年 4 月 22 日有小雨,但降雨量仅 0.3 mm,且 23 日和 24 日 2 d 均为晴天,因此 22 日的小降雨对实验数据几乎没有影响,鉴此,在 2009 年 4 月 25 日至 5 月 3 日进行了重复试验。为了减小土壤蒸发带来的误差,使各类微地形之间的数据更具可比性,各阳坡原状坡—微地形—对应阴坡原状坡组的土壤水分 4 d 测定一个循环,共测得数据 673 组。

微地形根据其地形特征均匀选取 5 个采样点,尽量覆盖其特征部位。原状坡在其坡面上设置 20 m × 20 m 的标准地,按对角线法机械确定调查点,即以标准地对角线交叉点和该点到标准地 4 个角柱连线的中点为采样点,共有 5 个采样点。当地形破碎,坡面比较小时可将采样点减至 3 个,并采用随机采样方式确定采样点。由于研究区植被多为草本,其根系主要分布在 0—60 cm,该层土壤水分的多少决定了植被的生长状况,因此用 TDR 分别测定每个采样点 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 层的土壤水分,每一层

测定 3 次,每次探针的方向旋转 120°,取 3 次的平均值作为该测点微地形根层的土壤含水量。TDR 所测数值为土壤容积含水量。

在每种微地形用环刀取各层的土壤,重复 3 次,采用烘干称重法测定水分及其土壤容重对 TDR 所测得的数据进行校正。TDR 测定的土壤容积含水量与重量含水量的换算公式为:

$$v = m \cdot \rho$$

式中: v ——土壤容积含水量(%); m ——土壤质量含水量(%); ρ ——土壤容重(g/cm^3)。

2.3 数据处理

2.3.1 微地形土壤水分变异系数 变异系数 C_v 表示土壤水分在空间变异的程度,它的大小反映了各层水分的稳定性。 C_v 越大,说明样点含水量变化越剧烈; C_v 值越小,土壤含水量越稳定。 $C_v = \frac{s}{\bar{x}}$, 式中: s ——土壤含水量观测值的样本标准差; \bar{x} ——土壤含水量观测值的样本平均数。

2.3.2 土壤水分差异显著性检验 黄土高原坡面上存在的大量微地形是极度不均匀的,但微地形的生境条件是否有别于同立地类型下的原状坡,现在还没有一个定论。本文在实际调查的基础上,采用 SPSS 软件对微地形和相应的阴阳坡原状坡分别进行配对样本的 Wilcoxon 秩检验,以确定其差异显著性。

2.3.3 阳坡微地形根层生境条件比较 由于土壤水分是黄土区植被建设的主要限制因素,因此可以利用微地形各个采样点根层土壤含水量来研究阳坡不同微地形生境条件的优劣情况。用微地形的土壤含水量与所在阳坡原状坡的土壤含水量的比值 R 作为一个评价指标,当 $R > 1$ 时说明微地形的水分比阳坡原状坡好,且 R 值越大水分条件越好;当 $R < 1$ 时说明微地形的分水比阳坡原状坡差,且 R 值越小水分条件越差;用微地形的土壤含水量和相同立地类型的阴坡原状坡的土壤含水量的比值 M 作为另一个评价指标,当 M 值越接近 1 时说明微地形的水分条件和

同立地类型的阴坡原状坡的水分条件越相似。通过综合分析 R 值和 M 值可以得知微地形根层生境条件相对于所在的阳坡原状坡及其同立地类型的阴坡原状坡的优劣状况。

3 结果分析

3.1 各微地形土壤水分特征值

通过对原始数据的处理可以得到各种微地形和原状坡的土壤含水量及其特征值,如表 2 所示。

由表 2 可知在同一坡面内,不同微地形的土壤含水量各有差异,水分最好的塌陷其含水量为 10.56%,而最差的陡坎含水量仅为 6.73%。并且不同微地形土壤含水量的差别较大,所测数据能够为揭示黄土高原坡面内微地形尺度的土壤水分空间分异特征提供依据。

3.2 各微地形土壤水分的空间差异性分析

经计算各微地形不同深度土层土壤水分变异系数如表 3 所示。由表 3 可以看出,水分变化活跃层主要是 0—20 cm 土层。

该层位于地表,降雨时雨水首先渗入该层,使土壤中水分含量急剧增加;雨后由于地表蒸发,植物蒸腾和植物根系的吸收,以及在重力、毛管力作用下该层水分向深层运动,使其含水量急剧减少,从而形成较大的波动。

变异系数越大,说明在降雨时该层含水量的增加越多,雨后该层水分的损耗也越多。各微地形该层土壤水分变异系数从大到小依次为:切沟底 > 陡坎 > 浅沟底 > 阳坡原状坡 > 塌陷 > 缓台 > 阴坡原状坡。

随着土层深度的增加,各微地形土壤水分的变异系数有减小的趋势。土层深度 40—60 cm 处的土壤水分的变异系数为 3 层中最小的土层,其主要原因是该层土壤水分蒸发量不大,少量的降水又无法渗透到该层,只有比较大的降水才能使该层得到雨水补给,蒸发量和雨水补给量相差不大,从而使该层的土壤水分变异很小。

表 2 各微地形土壤水分特征值

微地形名称	浅沟底	切沟底	塌陷	缓台	陡坎	阳坡原状坡	阴坡原状坡
平均质量含水量/%	7.710 0	10.400 0	10.560 0	9.470 0	6.730 0	7.560 0	10.180 0
标准差	0.656 5	0.995 8	0.623 2	0.559 8	0.862 7	0.579 0	0.474 1

表 3 阳坡各微地形根层土壤水分变异系数特征值

深度/cm	浅沟底	切沟底	塌陷	缓台	陡坎	阳坡原状坡	阴坡原状坡
0—20	0.292	0.405	0.258	0.226	0.366	0.272	0.218
20—40	0.186	0.213	0.182	0.161	0.222	0.185	0.130
40—60	0.051	0.084	0.049	0.066	0.054	0.059	0.045
0—60	0.177	0.234	0.163	0.151	0.214	0.172	0.131

0—60 cm 土层土壤水分变异系数的大小变化规律与 0—20 cm 土层 C_v 的变化规律一致。阴坡原状坡各层的水分变异系数均小于相应的阳坡微地形,这是因为阴坡表土及浅层土在植被的保育作用下比植被覆盖度低甚至无植被覆盖的阳坡表土及浅层土水分的蒸散发量小,而阴坡深层土壤又因植被根系的蒸腾耗水而较阳坡深层土壤的水分消耗量大,从而使阴坡垂直方向上的水分差异较阳坡小。

3.3 阳坡微地形与相应原状坡根层(0—60 cm)土壤含水量差异显著性分析

用 SPSS 软件对各组数据进行两配对样本 Wilcoxon 秩检验,检验结果见表 4。

表 4 阳坡微地形与相应原状坡根层水分显著性检验

微地形	微地形—所在阳坡 原状坡组	微地形—相应阴坡 原状坡组
	Wilcoxon 秩检验概率	Wilcoxon 秩检验概率
浅沟底	0.256	0.001**
切沟底	0.008**	0.547
塌陷	0.008**	0.945
缓台	0.027*	0.734
陡坎	0.027*	0.004**

注:*表示以显著性水平 $\alpha=0.05$ 检验,差异显著;**表示以显著性水平 $\alpha=0.01$ 检验,差异极显著。

由表 4 中的检验结果可知,浅沟底与其所在阳坡原状坡根层土壤含水量无显著差异而与相应的阴坡原状坡差异极显著。因此在对坡面进行人工植被恢复建设时不用把浅沟底这种微地形区别对待,对浅沟底的植被配置模式应该与其所在原状坡一样。在调查中也观察到浅沟底的植被类型和盖度都与其原状坡极为相似。切沟底、塌陷、缓台和陡坎这 4 种微地形与各自所在的阳坡原状坡根层土壤含水量有显著差异,且切沟底、塌陷的差异性极显著。因此在进行人工植被恢复建设时可以考虑将这 4 种微地形区别对待,利用微地形所造成的生境差异配置适于该微地形的植被模式,从而打破以往沿等高线进行统一植被配置的模式,进一步提高“因地制宜,适地适树”的精准度。

同时,切沟底、塌陷和缓台这 3 种微地形与其各自相对应的阴坡原状坡的根层土壤含水量无显著差异。因此对阳坡的这 3 种微地形进行植被配置时可以采用和其相对应的阴坡原状坡相同的植被配置模式。在调查中也发现这 3 种阳坡微地形的植被盖度与其相对应的阴坡原状坡的植被没有明显的差别,因而证实了这 3 种微地形与其相应的阴坡原状坡的土壤含水量相近。由表 2 中微地形土壤水分特征值可

知,陡坎的根层土壤水分占所在阳坡原状坡水分的 88.92%,占相应阴坡原状坡水分的 66.05%。表 4 中 Wilcoxon 检验结果也明确显示出陡坎的土壤含水量比其相应原状坡的低,为各种微地形中土壤水分最差的地形。因此在同一个坡面内,有的微地形土壤水分较原状坡好,有的则较原状坡差。对于干旱阳坡而言,土壤水分较好的微地形可适当配置乔灌植被类型,而土壤水分更差的微地形则可能只能以保护原有草本植被为主,难以配置人工植被。

3.4 阳坡微地形根层(0—60 cm)土壤含水量差异程度分析

在土壤水分成为植被恢复建设主要限制因子的黄土高原地区,可以用反映微地形土壤水分状况的 R 值($R = \text{微地形土壤含水量} / \text{所在阳坡原状坡土壤含水量}$)和 M 值($M = \text{微地形土壤含水量} / \text{同立地类型的阴坡原状坡的土壤含水量}$)作为评价指标对其生境条件的优劣状况进行综合分析。通过对原始数据的处理得到 R 值和 M 值(见图 1)。

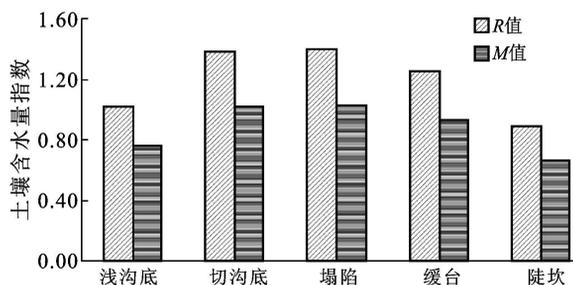


图 1 阳坡各微地形土壤含水量指数

由图 1 可知,只有陡坎这种微地形的 R 值小于 1,这说明陡坎的水分条件比其相应的原状坡都要差,坡面植被恢复建设时在该微地形配置的植被模式应该比所在的阳坡原状坡低一个等级,以保证微地形内植被的成活率和保存率;浅沟底的 R 值很接近 1,这说明浅沟底与其所在原状坡的土壤水分状况很相近;切沟底、塌陷和缓台这 3 种微地形的 R 值均大于 1,并且其 M 值均近似为 1,说明这 3 种微地形的土壤水分优于其所在阳坡原状坡,且与其相应的阴坡原状坡的土壤水分条件相似。因此在该类微地形中配置的植被模式应该优于其阳坡原状坡,可采用与其相应的阴坡原状坡相同的植被配置模式,以充分利用微地形良好的水分条件增加植被的覆盖率,提高生态环境建设的成效。

通过综合分析 R 值和 M 值的大小对微地形的生境条件状况进行排序:塌陷 > 切沟底 > 缓台 > 浅沟底 > 原状坡 > 陡坎。由此可知,塌陷这种微地形的水分条件最好,切沟底的水分次之,而陡坎的水分条件最

差。在调查中也发现塌陷、切沟底等微地形相对于它们各自相应的阳坡原状坡而言植被种类多,植被盖度大,而陡坎的植被比其相应的阳坡原状坡的植被稀疏,有的还形成了由苔藓地衣组成的地表结皮。

4 结论

(1) 0—20 cm 土层为水分变化活跃层,40—60 cm 深度土壤水分的变异系数为 3 层中最小。阴坡原状坡各层的变异系数均小于阳坡的微地形。阳坡内各微地形 0—20 cm 土层土壤水分变异系数与 0—60 cm 土层水分变异系数的大小顺序一致,依次为:切沟底 > 陡坎 > 浅沟底 > 阳坡原状坡 > 塌陷 > 缓台。

(2) 通过对微地形土壤水分的综合分析可知,微地形的生境条件优劣状况为:塌陷 > 切沟底 > 缓台 > 浅沟底 > 原状坡 > 陡坎。在同一坡面内,不同微地形的土壤含水量各有差异,水分最好的塌陷其含水量为 10.56%,而最差的陡坎含水量仅为 6.73%。在阳坡内只有浅沟底和所在原状坡的根层土壤含水量无显著差异,其它微地形均与原状坡差异显著,因此在对阳坡进行植被配置时只有浅沟底这种微地形不用区别对待。对比阳坡内的微地形与相应的阴坡原状坡可知,切沟底、塌陷和缓台这 3 种微地形与其各自相对应的阴坡原状坡的根层土壤含水量无显著差异,因此对阳坡的这 3 种微地形进行植被配置时可以采取和相应的阴坡原状坡相同的植被配置模式。其中陡坎这种微地形的根层土壤水分占所在阳坡原状坡水分的 88.92%,占相应阴坡原状坡水分的 66.05%,所以在对陡坎进行植被配置时应选择比其所在的阳坡原状坡低一个等级的植被配置模式,以保证植被的成活率和保存率。

(3) 土壤水分分布的片断化是植被片断化的一个主要原因,在对合家沟封禁流域进行调查的过程中发现,植被的片断化恢复出现在了封禁流域的坡面上,特别是在一些切沟沟底、塌陷和坡底平台等微地形上,草本和灌木生长茂盛,植被盖度大,有些地方甚至出现了柳树等乔木,虽然数量稀少,但是也从一个侧面反映了坡面水分分布的不均匀性,也证明了切沟底、塌陷等微地形的土壤水分优于其原状坡的结论。因此,在黄土高原地区植被恢复建设时,我们在按传统立地类型划分原则所确定的植被恢复单元内,还应该考虑按照微地形的水分特征,有区别地配置植被类型。在水分条件较差的微地形中降低植被配置模式的等级,以保证植被的成活率和保存率。在水分条件较好的微地形中可适当提高植被配置种类,有条件的情况下可配置乔灌植被类型,以充分利用微地形良好

的水分条件增加植被的覆盖率,提高生态环境建设的成效。

[参 考 文 献]

- [1] Hawley M E, Jackson T J, Mccuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 62: 179-200.
- [2] 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.
- [3] 何福红, 黄明辉, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(4): 6-9.
- [4] 黄奕龙, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(4): 483-491.
- [5] Nagamatsu D, Mirura O. Soil disturbance regime in relation to micro-scale landforms and its effects on vegetation structure in a hilly area in Japan[J]. *Plant Ecology*, 1997, 133: 191-200.
- [6] Western A W, Bloschl G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217: 203-224.
- [7] 孙中峰, 张学培. 晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2004, 22(2): 81-86.
- [8] 孙中峰, 张学培. 晋西黄土区坡面尺度土壤水分分布规律研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(2): 27-30.
- [9] 王孟本, 李洪建. 林分立地和林种对土壤水分的影响[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 43-46.
- [10] 路保昌, 薛智德, 朱清科, 等. 干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(1): 62-65.
- [11] 马祥华, 白文娟. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中的土壤水分变化研究[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(5): 19-23.
- [12] 胡良军, 邵明安, 杨文治. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系[J]. *草业学报*, 2004, 13(6): 14-20.
- [13] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 100-107.
- [14] Famiglietti J S, Rudnicki W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect Rattlesnake Hill Texas[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 210: 259-281.
- [15] Western A W, Grayson R B, Bloschl L G, et al. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices[J]. *Water Resource Research*, 1999, 35(1): 797-810.
- [16] 吴旗县地方志编纂委员会. 吴旗县县志[M]. 西安: 三秦出版社, 1991: 12-14.
- [17] 辛树帜, 蒋德麟. 中国水土保持概论[M]. 北京: 农业出版社, 1982: 19-20.