

# 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究

潘成忠, 上官周平

(中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 通过对黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分变异规律研究, 阐明陡坡坡面土壤水分变化特征, 0~200 cm 土层内土壤含水量垂直变化呈高一低一高趋势; 陡坡土壤水分沿坡顶向下变化总趋势是先增加后持平或减小; 在坡面有浅沟微地形存在的情况下, 虽然纵向和横向对坡面土壤水分分布均存在影响, 但纵向坡位的影响要较横向显著; 地统计学对有浅沟微地形存在的陡坡坡面土壤水分变异特征不能进行很好地描述。

**关键词:** 土壤水分; 陡坡坡地; 空间变异; 黄土丘陵区

**中图分类号:** S152.7; S155.2; S155.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2003)06-0005-05

## 1 引言

黄土高原区农业生产的主要限制条件是干旱缺水, 全区年均降水 300~500 mm, 且年内分配极不均衡, 夏季降水占全年的 55%~65%, 且多暴雨。该区耕地面积的 70% 左右为坡耕地, 降雨既是维持坡地植物生长的水分来源, 又是土壤侵蚀的主要动力, 严重的水土流失直接影响旱作生产水平<sup>[1]</sup>。因此对坡面土壤水分空间变异研究不仅对该区的农业持续发展有重要的指导意义, 而且对其脆弱的生态环境恢复也有积极的理论意义。

探索旱区坡面土壤水分动态对发挥土壤水库效应、充分利用土壤水分资源具有重要意义, 且长期以来一直是农田水利和土壤学研究的热点。目前对坡面土壤水分空间变异性及其影响因素作了大量的研究<sup>[2~4]</sup>, 诸如: 李玉山等对位于典型黄土高原沟壑区的陕西长武县王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征作了研究, 表明在黄土高原一个小流域内, 坡向、坡度和小地形的地貌分异导致土壤墒情分布差异, 并进而影响土地生产力<sup>[2]</sup>; 刘梅等对黄土高原区不同坡位土壤水分规律进行了研究, 表明坡向、坡位以及植被对土壤水分状况有明显影响<sup>[5]</sup>; 王军等对黄土丘陵小流域的土壤水分分布情况先后用经典统计学方法和地统计学方法作了较为深入的研究<sup>[4,6]</sup>; Dvalls 等研究认为美国干旱地区坡地土壤水分状况与坡面起伏程度有关<sup>[7]</sup>。已有的对坡面土壤水分研究主要对象是缓坡耕地或陡坡裸地、林地等, 并多侧重于对坡面纵向土壤水分变异的研究, 而在黄土高原很多坡耕地土壤侵蚀和农业生产并存, 且土壤水分因坡面上浅沟的存在横向变异也很显著。本文主要通过对陡坡农田进行田间取样研究不同土层土壤水分在坡面上的空间分布规律, 从中揭示土壤水分垂直变化及其沿坡面纵横向变异性, 为充分利用黄土高原区有限的水土

资源和“退耕还林还草”生态环境建设提供理论依据。

## 2 材料和方法

### 2.1 研究区域特征

试验在兰州大学干旱农业生态国家重点实验室的旱农生态试验站进行, 该站位于甘肃榆中县北部山区的中连川乡 (104°24' E, 34°03' N), 属黄土高原沟壑区景观, 气候为半干旱气候类型, 海拔 2400 m 左右, 年平均气温 4.5~5.5℃, 0℃ 积温 2200~2800℃, 具有较丰富的热量条件。年均降水 350~370 mm, 降水变率大, 年内季节分布不均, 7~9 月份降水占全年的 50%~60%, 且多以暴雨形式出现。土地类型多为坡耕地, 土壤为黑垆土, 质地较粗, 疏松易耕, 坡度较陡, 水土流失严重, 属国家“退耕还林还草”区。

### 2.2 取样方法及测定项目

在所选坡面上, 沿坡横向每隔 15 m 依次选取 4 条 150 m 长的纵向线, 在每条纵向线上从上到下, 依次每隔 30 m 布设一取样点, 共设取样点 20 个, 其中横向 (5°~10°) 从左至右依次为一、二、三、四层级, 纵向 (35°~45°) 由上到下沿坡顶向下依次为一到五级采样点 (图 1)。用土钻在每个取样点每隔 20 cm 取土样一次, 测深 2 m, 共测 10 层, 测定各土层土壤含水率。坡地上作物为春小麦定西 24 号, 测定时间为 2002 年 7 月, 此时春小麦处于灌浆成熟期。

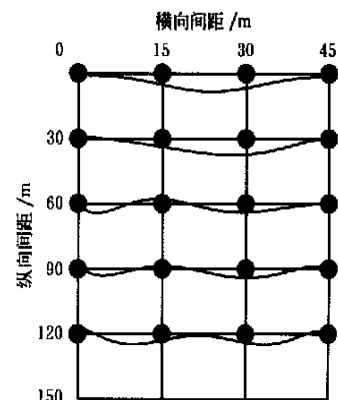


图 1 坡地土壤采样点布设示意图

Fig. 1 Sketch of sampling spots on the slopland

收稿日期: 2003-02-20 修订日期: 2003-07-18

基金项目: 国家 973 计划项目 (2002CB111502) 和国家 973 计划前期研究专项资助

作者简介: 潘成忠 (1980-), 男, 江苏灌云县人, 硕士生, 主要从事生态水文与水土保持方面研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100

### 3 结果和分析

#### 3.1 土壤水分的垂直变化规律

土壤水分的垂直变化规律主要受坡面降水入渗再

分布以及作物和土壤向上的蒸散量这两个过程所支配,而对坡面来说,该过程又受多种因素影响,如坡向坡位、土壤物理性质、气候特征、植被类型及生长情况等。

表1 不同土层土壤水分变化情况

Table 1 Changes of soil moisture on different soil layers

土层/cm	样本数	均值/%	标准差	变异系数/%	变化区间	最大值	最小值	偏度	峭度	分布类型
0~20	20	9.63	2.01	20.89	7.29	13.25	5.96	0.12	-0.64	N
20~40	20	8.93	2.61	29.26	10.05	14.89	4.84	0.61	0.20	N
40~60	20	8.20	2.57	31.29	10.01	14.96	4.95	1.17	1.25	N
60~80	19	8.20	2.80	34.19	11.92	15.91	3.99	1.11	1.90	N
80~100	20	8.88	3.06	34.47	11.52	16.45	4.93	0.74	0.46	N
100~120	20	9.96	2.69	27.03	10.28	15.82	5.54	0.31	0.00	N
120~140	20	11.01	1.91	17.30	7.28	15.46	8.18	0.98	0.77	N
140~160	20	10.34	1.00	9.67	4.10	12.13	8.03	-0.48	0.60	N
160~180	20	10.10	1.26	12.46	5.65	12.37	6.72	-0.89	2.06	N
180~200	20	10.07	0.90	8.94	3.93	11.36	7.43	-1.41	2.73	NN
20~50	20	8.57	2.55	28.80	10.03	14.93	4.9	0.92	0.80	N
50~100	20	8.41	2.70	32.07	10.85	15.77	4.92	1.11	1.60	N
100~150	20	10.44	1.71	16.37	6.81	14.27	7.46	0.27	0.02	N
150~200	20	10.17	0.92	9.01	4.10	11.68	7.58	-0.82	2.30	N

注:N表示满足正态分布,NN表示不满足正态分布。

从各采样点不同土层的土壤含水率变化可以看出,绝大部分采样点(浅沟沟槽处采样点除外)的土壤水分沿土层变化为表层土壤含水率较大,20~100 cm土层较低,而100~200 cm土层土壤含水率有不同程度地增大趋势。图2为一具有代表性采样点土壤水分沿土层变化情况。这一趋势从表1中的各土层的平均值也可大致看出。不同土层土壤水分变异情况有显著差异,其中,变异程度最高的是20~120 cm土层,其变异系数在27%~35%之间;其次,0~20 cm和120~140 cm土层变异系数在20%左右;土壤水分相对稳定层在140~200 cm之间,其变异系数只有10%左右。这说明春小麦利用土壤水分主要集中在0~140 cm土层范围内,而对深层土壤水分的影响不大。通过对各土层土壤水分的正态分布检验,在2 m土层中只有180~200 cm土层水分不满足正态分布,其余均满足,这从该层统计量偏度与峭度的绝对值最大也能大致看出。

#### 3.2 土壤水分沿坡面纵向变异规律

对不同深度土层土壤水分沿坡面纵向(坡度逐渐增大,由35°~45°)的层级变化(图3)与土壤湿度变异程度进行了分析(表2),20~100 cm土层深度土壤含水率(干土质量,下同)沿纵向变异度最大,达25%,而0~20 cm,100~150 cm土层土壤含水率变异程度相近,均在15%左右,变异程度最小的为150~200 cm土层土壤含水率,变异系数只有6.2%。不同土层土壤含水率受纵坡影响程度由高到低依次为:50~100 cm,20~50 cm,0~20 cm,100~150 cm,150~200 cm。由分析知,第三、四纵向层级内部的土壤水分变异较大,但沿每条纵向线不同土层土壤水分的变化基本一致,其变化趋势为沿下坡方向先增大后持平或减小(图3)。

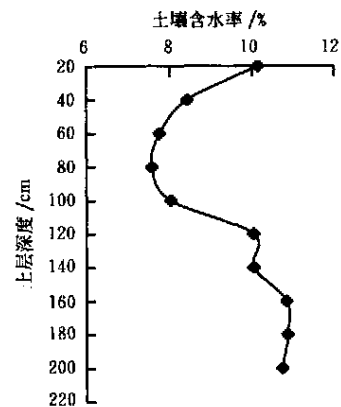


图2 典型采样点土壤水分垂直变化

Fig. 2 Profile changes of soil moisture on the typical spot

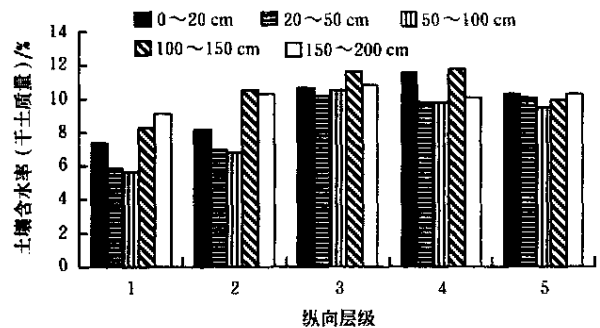


图3 不同土层土壤湿度沿坡面纵向变异

Fig. 3 Changes of soil moisture on different layers along longitudinal direction

表 2 各土层土壤水分沿纵、横坡变异情况  
Table 2 Variability of soil moisture on different layers along longitudinal and horizontal direction

沿坡方向	各土层土壤水分变异系数 CV/ %				
	0~20 cm	20~50 cm	50~100 cm	100~150 cm	150~200 cm
纵向	18.5	23.6	25.1	13.6	6.2
横向	10.0	26.3	28.5	10.8	3.6

### 3.3 土壤水分沿坡面横向变异规律

对坡面土壤水分的研究多侧重于沿坡面纵向变异情况的探讨<sup>[5~7]</sup>,事实上,土壤沿横向坡面的土壤水分变异也很显著。特别是对黄土高原地区,因其坡度大,土质疏松,再加上自然降雨少且多以暴雨形式降落,往往在坡面上形成浅沟,而浅沟对土壤水分分布有着重要影响。不同土层土壤含水率沿横向坡面变异较大(图 4),从表 2 中不同深度土层沿横向坡面的变异系数可以看出,总的变异情况与纵向相似,除 20~50 cm,50~100 cm 两层土壤含水率变异较纵向稍大之外,其余各层均明显小于纵向。这说明土壤水分交换活跃层和相对稳定层的土壤水分变异沿横向较纵向小,而土壤水分双向补偿层较纵向大<sup>[8]</sup>。

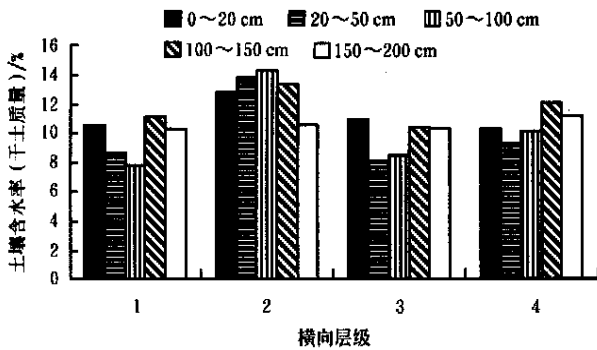


图 4 不同土层土壤含水率沿坡面横向变异  
Fig. 4 Changes of soil moisture on different layers along horizontal direction

沿横向第二层不同深度土层土壤含水率(除 150~200 cm 土层外)均明显高于其它各层级,这是由于纵向第三、四层浅沟微地形的存在使坡面水分发生再分配造成的(图 4)。郑粉莉对浅沟微地形坡面土壤水分分布情况研究表明,在不同侵蚀条件下,浅沟沟槽处水分情况均明显好于沟坡处<sup>[9]</sup>。

### 3.4 纵、横向坡位对土壤水分变异的影响

在了解坡地水分沿坡面纵向和横向变异情况的基础上,分别采用纵、横向坡位作为影响因子,对不同深度土层土壤水分进行双因子分析,以期找出有浅沟存在的陡坡坡面上,横向坡位与纵向坡位对不同深度土层土壤水分变异的影响差异(表 3)。

纵向坡位对土壤含水率影响明显大于横向坡位(表 3),横向坡位对不同深度土层土壤含水率影响均不显著,而纵向坡位除对 150~200 cm 土层影响没有达显著以外,其余均达显著,且对 0~20 cm,20~50 cm 土层影

响达极显著水平。对纵向坡位而言,其对各土层土壤水分的差异性影响的显著性随土层深度的增加而降低,而横向坡位对不同土层土壤水分的影响差异并不显著。

表 3 各土层土壤水分—坡位双因子方差分析

Table 3 Two factors analysis of soil moisture on different layers

差异来源	各土层土壤水分方差分析的 F 值及影响显著性				
	0~20 cm	20~50 cm	50~100 cm	100~150 cm	150~200 cm
	0~20 cm	20~50 cm	50~100 cm	100~150 cm	150~200 cm
横向坡位	1.340	2.679	1.120	1.121	1.590
纵向坡位	7.649 **	5.984 **	3.920 *	5.4117 *	2.759

注: 当  $\alpha = 0.05$  时,纵向  $F = 3.259$ ,横向  $F = 3.490$ ;当  $\alpha = 0.01$  时,纵向  $F = 5.4119$ ,横向  $F = 5.953$ ;

\*\* 表示  $\alpha = 0.01$  水平上显著; \* 为  $\alpha = 0.05$  水平上显著;无 \* 为不显著。

### 3.5 黄土区陡坡坡面土壤水分空间变异性分析

通过上述的参数统计分析,对该研究坡面土壤水分的分布规律已有较深入的认识,但对土壤水分的变异过程及尺度尚无清楚的了解。这一部分试图通过利用统计学方法对坡地土壤水分动态过程的研究,为提高坡地土壤水分利用效率提供理论依据。地统计学是以区域化变量 (regionalized variable theory) 和随机函数 (random function) 为基础,以半方差函数 (semi-variogram 公式 (1)) 为基本工具的一种统计方法。半方差函数就是成对样本之间不同距离方差的一半,目前,用于拟合该函数应用较成熟且较适合描述土壤特性空间变异的模型主要有线性模型 (Linear model 公式 (2))、球状模型 (spherical model 公式 (3)) 和指数模型 (exponential model 公式 (4))。

$$R(h) = 1/2 Var [ Z(x) - Z(x+h) ] \quad (1)$$

$$\begin{cases} R(h) = c_0 + ch/a & h < a \\ R(h) = c_0 + c & h \geq a \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R(h) = c_0 + c [1.5xh/a - 0.5x(h/a)^3] & h < a \\ R(h) = c_0 + c & h \geq a \end{cases} \quad (3)$$

$$R(h) = c_0 + c \quad (4)$$

$$R(h) = c_0 + c(1 - e^{-h/a}) \quad (4)$$

$R(h)$  为间距为  $h$  的半方差 (semi variance),在一定范围内随测点间距 ( $h$ ) 的增大而增大,当  $h$  大于最大相关距离时,该值趋于稳定, $c_0$  为块金值 (nugget),即  $h = 0$  时的半方差, $c_0 + c$  为基台值 (sill),为半方差函数随测点间距递增到一定程度时出现的较为稳定的半方差值。表示由于实验误差和小于取样间距而引起的随机性变异,而基台值表示包括随机性变异和空间结构性变异的总变异。 $(c_0/c_0 + c)$  表示随机变异占总变异的比值,该值越大说明随机性变异越强,空间结构性越弱,当该值大于 75% 时说明变量的空间相关性很弱<sup>[10]</sup>。 $a$  为变程 (range of influence),为半方差达到基台值时的测点间距,为半方差较为稳定处的样本测点距离。其中线性和球状模型的最大相关距离等于变程,而指数模型的最大相关距离一般取  $3a$ 。最大相关距离表明变量空间相关范围的大小,当变量测点间距小于该值时,说明变量具有空间自相关性,反之则不存在。

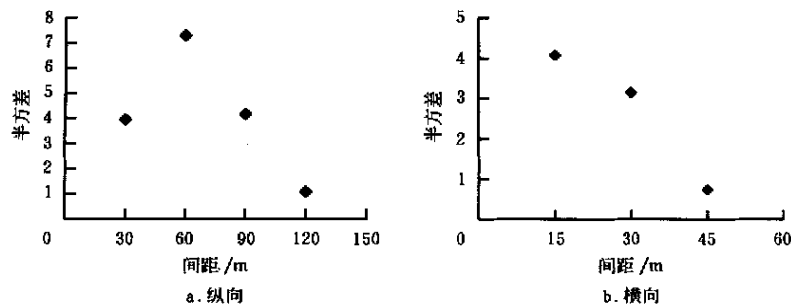


图5 0~20 cm 土壤水分沿纵横向变异半方差值

Fig. 5 Semivariance of 0~20 cm layer soil moisture along longitudinal and horizontal directions

应用地统计学方法对土壤水分的空间变异进行研究,发现土壤水分沿纵向的半方差随间距先增大而后减小,沿横向的半方差随横向间距的增大而减小,而且降幅较大,且各层变化趋势基本相同。由于上述三种模型均为测点间距的递增函数,而由图5可以看出,无论对于纵向还是横向,土壤水分半方差均不能满足上述任一模型。上述分析说明,由于坡面浅沟微地形的存在,使土壤降水的再分配受到影响,从而导致土壤水分空间差异较大,放大了土壤水分这一变量的随机性而削弱了其自相关性,导致随机性变异在总变异中所占的比重较大,从而其自相关性也不足以清楚地体现出来。而地统计学是以区域化变量为前提,寻求变量自相关性的一种统计方法。因此,采用该方法已不能对黄土丘陵区陡坡坡面土壤水分的空间变异特征进行有效描述。

#### 4 讨论

对于土壤水分沿坡面纵向变异规律的研究,国内外学者作了很多的研究,其研究结论也不尽相同。Tenberge等(1983)研究发现,0~10 cm 表层土壤水分沿坡面纵向不存在空间差异<sup>[11]</sup>。Miller等(1988)在美国Sacramento市西北Dunnigan山区选取的一个400 m坡面研究表明,在50 cm深处的土壤水分不随坡面位置的不同而改变<sup>[12]</sup>。蒋定生等(1987)在研究降水在凸-凹形坡上再分布规律时发现,土壤蓄水量(0~200 cm)沿纵坡的变化规律是,旱季坡中部土壤湿度最大,而雨季末土壤湿度自坡顶到坡脚逐渐增大<sup>[13]</sup>。黄土半干旱丘陵区不同土层土壤含水量总的变化趋势是沿坡顶向下先增大后持平或减小(图3),与Tenberge等(1983)和Miller等(1988)研究明显不同,这主要可能是由于研究区不同的粘粒含量而造成的, Tenberge等的研究地点土壤平均粘粒含量达37.1%,而本试验点只有17%,与蒋定生等(1987)对黄土丘陵区土壤水分研究结论中旱季土壤湿度变化基本一致。造成本研究各层土壤水分沿下坡方向变化趋势原因分析为:一是坡面坡度较陡,且逐渐增大。穆兴民等(2001)研究表明,随着坡度的增大,土壤稳定入渗速度减小<sup>[14]</sup>;该区的降雨特征是降雨量少且多暴雨,尽管降雨入渗时间随下坡方向逐渐增大,但因暴雨形成的冲刷使坡面泥沙在搬运过程中沿程发生沉

积而抑制坡面径流沿程入渗<sup>[9]</sup>,从而影响不同坡位土壤水分情况。

在黄土丘陵区,由于其独特的自然景观,土质疏松,坡面较陡以及降雨特征,往往导致坡面上有浅沟存在,该地形条件决定了土壤水分分布受其坡位影响的特殊性,虽然横向坡度较纵向小得多,但由于浅沟微地形的存在,其对土壤水分的影响也较显著(图4)。这说明对陡坡坡面土壤水分分布,除坡度外坡面微地形也是主要的影响因子。而坡地地形与土壤侵蚀密切联系,因此在对陡坡坡面土壤水分的研究中,不能孤立地研究土壤水分,而应考虑陡坡坡地的实际情况把研究土壤水分再分布过程与土壤侵蚀过程有机地结合起来,这样不但有利于充分合理利用土壤水分资源,而且有利于土壤流失的治理。

虽然在对土壤空间变异性研究方面地统计学是一种行之有效的分析方法,但在对黄土丘陵陡坡坡面土壤水分变量进行分析时受到一定限制。Gaston等(2001)在研究美国密西西比三角洲地区土壤特性空间变异性时发现,土壤微生物活动显示极为有限的空间相关性,而土壤pH、有机碳以及质地的半方差函数用地统计学的球状模型可以进行很好地描述<sup>[15]</sup>。Lavado等在研究Pampean草原放牧对土壤养分的影响时发现,土壤中有有机碳和全磷只在未放牧的区域上存在空间结构<sup>[16]</sup>。这说明当用地统计学对有关变量进行空间变异分析时,要考虑变量自身特性以及适用的范围与条件,一定要在其允许的范围内应用。

#### [参 考 文 献]

- [1] 上官周平,彭珂珊,彭琳,等.黄土高原粮食生产与持续发展研究[M].西安:陕西人民出版社,1999.
- [2] 李玉山,史竹叶,张孝中,等.长武王东沟小流域土壤墒情影响因素与分布特征[J].水土保持通报,1990,10(6):1~6.
- [3] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998,42~68.
- [4] 傅伯杰,陈顶利,马克明.黄土区陵小流域土地利用变化对生态环境的影响[J].地理学报,1999,54(3):241~246.
- [5] 刘梅,蒋定生,黄国俊,等.不同坡面位置土壤水分差异规律分析[J].水土保持通报,1990,10(2):16~20.

- [6] 王军,傅伯杰,邱扬,等.黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数[J].地理学报,2000,55(4):428~438.
- [7] Dvalls F A, Collins M E. Soil-landscape relationships and soil variability in north central Florida[J]. Soil Sci Soc Am J,1986,50:401~408.
- [8] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000,87~114.
- [9] 郑粉莉.不同侵蚀条件下浅沟微地形坡面土壤水分分布研究[A].邵明安主编:黄土高原土壤侵蚀与旱地农业[C].西安:陕西科学技术出版社,1999,51~56.
- [10] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Sci Soc Am J,1994,58:1501~1511.
- [11] TenBerge H F M, Stroosnijder L, Burrough P A, et al. Spatial variability of physical soil properties influencing the temperature of the soil surface [J]. Agric Water Manage,1983,6:213~226.
- [12] Miller M P, Singer M J, Nielsen D R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills[J]. Soil Sci Soc Am J,1988,52:1133~1141.
- [13] 蒋定生,刘梅梅,黄国俊.降水在凸-凹形坡上在分配规律初探[J].水土保持通报,1987,7(1):45~50.
- [14] 穆兴民,徐学选,陈霁巍,等.黄土高原生态水文研究[M].北京:中国林业出版社,2001,59~61.
- [15] Gaston L A, Locke M A, Zablotowicz R M, et al. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta[J]. Soil Sci Soc Am J,2001,65:449~459.
- [16] Lavado R S, Sierra J O, Hashimoto P N. Impact of grazing on soil nutrients a Pampean grassland[J]. Journal of Range Management,1996,49:452~457.

## Spatial variability of soil moisture on steep slopedland in loess hill region

Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** It is very meaningful for making the most of soil moisture to probe into spatial distribution of slopedland soil moisture in the Loess Plateau. Soil samples were taken from eroded steep slopedland in loess hill region. Soil water content of a depth of 200 cm at 20 cm intervals was determined in the laboratory. The data were processed by SPSS (8.0) software. The results show that soil moisture of all soil layers but 180~200 cm are normally distributed. Soil water content on the steep slope is high in 0~20 cm soil depth, low in 20~100 cm, and high in 100~200 cm. Variation of soil water content of 20~120 cm soil depth is much larger than that of both 0~20 cm and 120~200 cm, especially along horizontal direction slope. Soil water content increases at first, then it keeps flat or reduces along longitudinal direction. Though both longitudinal and horizontal slope position affect distribution of soil moisture, longitudinal direction has more significant influence on soil moisture than horizontal direction. Geostatistics is not able to effectively analyze spatial variability of soil moisture on the steep slope with shallow gully in the Loess Plateau.

**Key words:** soil moisture; steep slopedland; spatial variability; loess hill region