

# 晋西黄土区土壤水分时空分布规律

刘卉芳, 曹文洪, 王向东

(中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100044)

**摘要:** 通过对山西省吉县蔡家川小流域坡面 25 个样点土壤水分的测定(烘干法), 采用地统计学方法研究了晋西黄土区坡面土壤水分时空变异规律。研究结果表明, 理论变异函数模型很好地反映了晋西黄土区坡面土壤水分的空间结构特性。不同坡向的土壤水分具有强烈和中等空间自相关, 这意味着土壤水分在坡面尺度上具有明显的空间自相关。这一点也可以从分维数的大小得到验证。通过运用地统计学方法对土壤水分的分布进行分析, 为研究晋西黄土区土壤水分时空分布规律提出了新的研究思路。

**关键词:** 黄土区; 土壤水分; 时空分布; 地统计学

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)06-0105-05

中图分类号: S152.7

## Temporal and Spatial Distribution of Soil Moisture in the Loess Area of West Shanxi Province

LIU Huirfang, CAO Wenhong, WANG Xiangdong

(Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Temporal and spatial distribution of soil moisture in the loess area of West Shanxi Province is studied by using the geological statistics method. Results show that the variation function model can well describe the spatial features of soil moisture. Soil moisture on different slopes has strong and moderate spatial autocorrelation, which indicates that it has the significant spatial autocorrelation on slope scale. The result can be validated by the fractal dimension. The distribution of soil moisture is analyzed by using geological statistics and a new methodology for temporal and spatial distribution of soil moisture is presented.

**Keywords:** loess area; soil moisture; temporal and spatial distribution; geological statistics

地统计学是近年来研究空间异质性常用的方法之一, 同经典统计学相比较, 它具有以下几个特点。(1) 研究的变量不是纯随机变量, 而是区域化变量, 是随机变量与位置有关的随机函数, 因而地统计学中的区域化变量既有随机性又有结构性; (2) 地统计学研究的变量不能进行重复试验, 即区域化变量取值仅有一次; (3) 地统计学中的区域化变量是在空间不同位置取样, 因而, 两个相邻样品中的值不一定保持独立, 具有某种程度的空间相关性; (4) 地统计学除了要考察样本的数字特征外, 更主要的是研究区域化变量的空间分布特征<sup>[1]</sup>。基于以上特点, 地统计学已被证明是研究空间变异与空间格局的有效方法。

土壤是一个时空变异连续体<sup>[2]</sup>。土壤特性在不同空间位置上存在明显的差异, 即土壤特性的空间变异性<sup>[3-5]</sup>。为了描述土壤水分空间变异, 传统的土壤调查是按土壤质地将土壤在平面上划分为若干较为均一的区域, 在深度上划分为不同土层来描述土壤的空间变异<sup>[6-9]</sup>。这基本上是一种定性描述的方法, 而

非定量估算, 在很多情况下很难确切地描述土壤性状(如土壤含水量)的空间分布<sup>[10]</sup>, 在研究土壤某一特性时, 先了解研究区域的背景状况, 是非常必要的, 是进行深入研究的基础。因此在进行土壤含水量的长期定位测定时, 必须首先了解研究区含水量的空间分布, 使选择的测定点既具有代表性又节省劳力<sup>[11-12]</sup>。许多学者对坡面土壤含水率空间变异性进行了大量的研究。刘春利等研究表明, 黄土高原土壤含水率在垂直剖面方向、坡长方向及垂直于坡长方向均具有不同的变异特征<sup>[13]</sup>; 潘成忠等研究表明, 地统计学对有浅沟微地形存在的陡坡坡面土壤含水率变异特征不能进行很好地描述<sup>[14]</sup>; Y. Canton 等研究小尺度上土壤含水率具有高度的空间异质性<sup>[15]</sup>。已有的研究大都为单一土地利用类型与土壤含水率空间变异性之间的关系研究, 而对不同土地利用方式下土壤水分空间变异性的对比研究相对较少。

本文选择晋西黄土区自然坡面来进行土壤水分空间变异性的对比研究。研究黄土区坡面土壤水分

的空间变异规律,以提高坡面土壤水分的利用效率,为合理安排植被布局提供科学依据。

## 1 实验区概况与研究方法

### 1.1 实验区概况

本研究试验地在北京林业大学山西吉县科研试验场,位于山西省西南部黄土区,属暖温带大陆气候,冬季寒冷干燥,夏季温度较高。年降雨量为 575.9 mm,无霜期平均 170 d 左右,年平均气温 10 ℃。大部分地区为典型黄土残塬、梁峁侵蚀地形。年平均侵蚀模数 11 823 t/km<sup>2</sup>。营造防护林的主要树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和油松(*Pinus tabulaeformis*),林分结构简单,以纯林为主,混生或伴生有山杨(*Pop-*

*ulus davidiana*),天然林主要为沙棘(*Hippophae rhamnoides*)与虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等。

### 1.2 样地基本情况

选取研究区内典型坡面,在坡面上选取的东西向(间距 4 m)、南北向(间距 5 m)两个方向,共计 25 个点进行土壤水分定位观测。地表植被全部为天然次生灌木林分及荒草地。

测定时间为生长季内(4月初至 10月底)每月上、中旬。土壤含水量用烘干法进行测定,分 5 个层次进行(0—20, 20—40, 40—60, 60—80 和 80—100 cm)。每个样地每层测定 3 个样点,取其平均值作为样地该层次的土壤含水量。不同样地土壤分 0—20, 20—60, 60—100 cm 进行土壤物理性质测定(见表 1)。

表 1 不同样地土壤剖面部分理化性状

样地	采样深度	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙度/%	最大吸湿水/%	质地
天然灌木林	0—20	1.517	8.4	1.08	45.8		中壤土
	20—60	0.806	8.5	1.17	38.1	6.42	中壤土
	60—100	0.642	8.3	1.17	42.0		中壤土
荒草地	0—20	1.144	8.5	1.03	41.7		中壤土
	20—60	0.562	8.6	1.25	44.3	5.51	中壤土
	60—100	0.401	8.2	1.28	42.1		中壤土

利用 ArcGIS(ILWIS),首先将流域内 25 个样点点位图数字化,生成用于地统计学分析的样点分布图。然后将相应样点的土壤水分数据输入到计算机形成与样点地理数据匹配的属数据,计算出半方差,用变异函数的理论模型拟合。由于样点是沿坡面等间距分布的,步长的划分以 4 m(东西向)和 5 m(南北向)为间距,即 4, 8, ..., 28 m,共 7 个组距(东西向)以及 5, 10, ..., 25 m 共 5 个组距(南北向)。

### 1.3 研究方法

地统计学中用于估算半方差的公式为

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中:  $N(h)$  ——距离等于  $h$  时的点对数;  $Z(x_i)$  ——样点  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值;  $Z(x_i+h)$  ——与  $x_i$  距离为  $h$  处样点的值。值得注意的是,变异函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义。球状模型(公式 2)和指数模型(公式 3)适合土壤水分的实际变异函数值。球状模型的变程等于相关距离  $a$ ; 而指数模型并不表现出有限变程,但实践中变程值  $3a$  表示。

$$\begin{cases} r(h) = C_0 + C \left( \frac{3h}{2a} - \frac{16h^3}{2a^3} \right) & (h \leq a) \\ r(h) = C_0 + C & (h \geq a) \end{cases} \quad (2)$$

$$r(h) = C_0 + C(1 + e^{-\frac{h}{a}}) \quad (3)$$

式中:  $C_0$  ——块金值(nugget);  $C_0 + C$  ——基台值(sill);  $a$  ——相关距离(collection length)。

变异函数理论模型的拟合过程主要包括确定曲线类型,参数最优估计和回归模型的检验。通常是根据专业知识从理论上推断或根据以往经验来确定曲线类型,比较几个不同理论模型的拟合程度则根据目测和决定系数的  $F$  检验。分维数  $D$  的计算由变异函数和步长  $h$  之间的关系确定,即

$$2r(h) = h^{(4-2D)} \quad (4)$$

上式取双对数后,对双对数曲线进行线性回归,得到回归直线的斜率  $k$ 。分维数可用斜率  $k$  估算

$$D = \frac{1}{2}(4 - k) \quad (5)$$

分维数  $D$  的大小,表示变异函数曲线的曲率。不同变量  $D$  值之间的比较,可以确定空间异质性的程度。

## 2 结果与分析

### 2.1 0—100 cm 平均土壤水分的空间结构特征及其季节变化

表 2—3 是通过 0—100 cm 平均土壤水分变异理论模型得出的相应参数及分维数,理论变异函数是从球状模型和高斯模型得出,它们对于实验变异函数拟合较好,决定系数变化在 0.4~0.8 之间,  $F$  检验为极显著水平,说明理论变异函数模型很好地反映了土壤水分的空间结构特性。由于土壤水分在整个观测期大部分时间表现出基台值,反应出土壤水分在研究区域内具有平稳特性或近平稳特性。

表 1 土壤水分变异理论模型的相关参数及分维数(南北方向)

日期	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C + C_0$	块金值/基台值	变程/m	决定系数	$F$ 值	分维数
--0409	球状模型	4.064	35.035	11.6%	36.612	0.823	10.518*	1.636
--0508	球状模型	3.400	31.413	10.8%	28.842	0.891	19.203**	1.797
--0609	高斯模型	0.359	3.261	11.0%	24.434	0.436	7.759*	1.627
--0709	球状模型	1.545	6.586	23.5%	30.216	0.788	8.191*	1.862
--0801	球状模型	0.300	12.518	2.4%	22.816	0.868	15.235**	1.635
--0906	高斯模型	0.200	2.444	8.2%	26.166	0.596	6.748*	1.900
--1004	球状模型	1.130	10.800	10.5%	25.061	0.740	6.054*	1.647

表 3 土壤水分变异理论模型的相关参数及分维数(东西方向)

日期	理论模型	块金值 $C_0$	基台值 $C + C_0$	块金值/基台值/%	变程/m	决定系数	$F$ 值	分维数
--0409	高斯模型	0.269	3.479	7.7%	28.00	0.636 2	12.222*	1.622
--0508	球状模型	1.792	6.338	28.3%	64.61	0.799 0	8.2007*	1.78
--0609	球状模型	4.611	9.525	48.4%	30.05	0.542 4	6.548*	1.666
--0709	球状模型	0.626	3.745	16.7%	22.77	0.498 0	5.61*	1.684
--0801	球状模型	2.017	5.467	36.9%	26.78	0.544 0	14.183**	1.671
--0906	幂函数模型	$r(h) = 1.504h^{0.281}$				0.945 0	38.79**	1.942
--1004	高斯模型	0.347	2.911	4.1%	28.00	0.781 8	21.483**	1.725

平均土壤水分空间结构的季节变化如图 1—2 所示,基台值即全部样点总变异,其变化幅度在 4~35,表现出明显的季节变化趋势。这种变化趋势与不同坡向的土壤水分、降雨有关。7 月以前,土壤含水量较低,但土壤水分的空间变异程度高,因此基台值也高。这是因为土壤水分的空间格局由地形控制而降雨量少的的影响较小。7 月随着雨季的到来,虽然坡向因子对土壤水分的影响仍然存在,但是其作用在减弱。因降雨量大,从而对土壤水分的控制作用加强。土壤含水量增加,坡面土壤水分相对均匀,基台值降低。8 月,土壤水分的空间变异程度逐渐升高。在极端干旱条件下,土壤含水量接近凋萎系数,土壤水分格局受控于其本身,土壤的有效水分很快蒸散到大气中,整个坡面内土壤水分较为均一,因此,土壤变异程度降低。从图 1 中可以看出,基台值的季节变化格局与平均土壤含水量相反。

变程的季节变化在干旱季节数值高,湿润季节变程小。变程反映土壤水分空间相关范围,在变程内,土壤水分具有空间自相关特性,反之则不存在空间自相关性。因此,变程对采样设计的有效性有一定的指导意义,如为传统统计分析构建空间独立的数据,或为空间内插制作土壤水分分布景观图的取样布设。

块金值变化在 0.2~4.6,其季节变化格局较为明显,与 0—100 cm 平均土壤含水量的季节变化具有某些相似性。块金值通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异,较大的块金差值表明较小尺度上的某种过程不容忽视。研究结果显示,在 6—8 月虽有块金效应,但其值较小。这反应小于 4 m 尺度影响水分过程作用较小,若增加取样密度并不能大

幅度增加土壤水分空间结构信息。而在 4—5 月块金值较大,可见在生长季初期土壤水分的小尺度影响较为显著,应当增加观测点位。基台值通常表示系统内总的变异包括结构性变异和随机性变异,因此,块金值与基台值之比即随机部分引起的空间异质性占系统总变异的的比例,可作为研究因子空间相关的分类依据。如果该值小于 25%,属于强的空间自相关,说明因子具有很好的空间结构性;若比值在 25%~75% 之间,属于中等程度空间自相关;若比值大于 75%,属于弱的空间自相关,反应随机部分引起的空间异质性程度起主要作用。

研究结果表明,不同坡向的土壤水分具有强烈和中等的空间自相关,这意味着土壤水分在坡面尺度上具有明显的空间自相关。这一点也可以从分维数的大小得到验证。

## 2.2 剖面土壤水分的理论空间结构特征

用球状模型描述研究区土壤水分变异较为理想,剖面土壤水分的理论半变异函数模型的决定系数变化在 0.4~0.9 之间,经过  $F$  值检验达到显著 ( $\alpha = 0.05$ ) 和极显著 ( $\alpha = 0.01$ ) 水平,说明理论模型的拟合是可接受的。图 3 是具有代表性的剖面土壤水分变异函数图。在整个观测期内,土壤水分的基台值随土壤深度增加而增加,表现出明显的系统变化。这是因为随着土层的加深,土地利用中不同植物根系分布的差异和地形对土壤水分的影响增大,导致土壤水分变异的进一步增加,故基台值随土壤深度增加。变程随土壤深度并不显示明显的趋势而呈波动变化,这说明影响剖面土壤水分格局过程在不同深度是不同的。块金值随土壤深度也无明显格局,但其与基台值呈正相关关系。

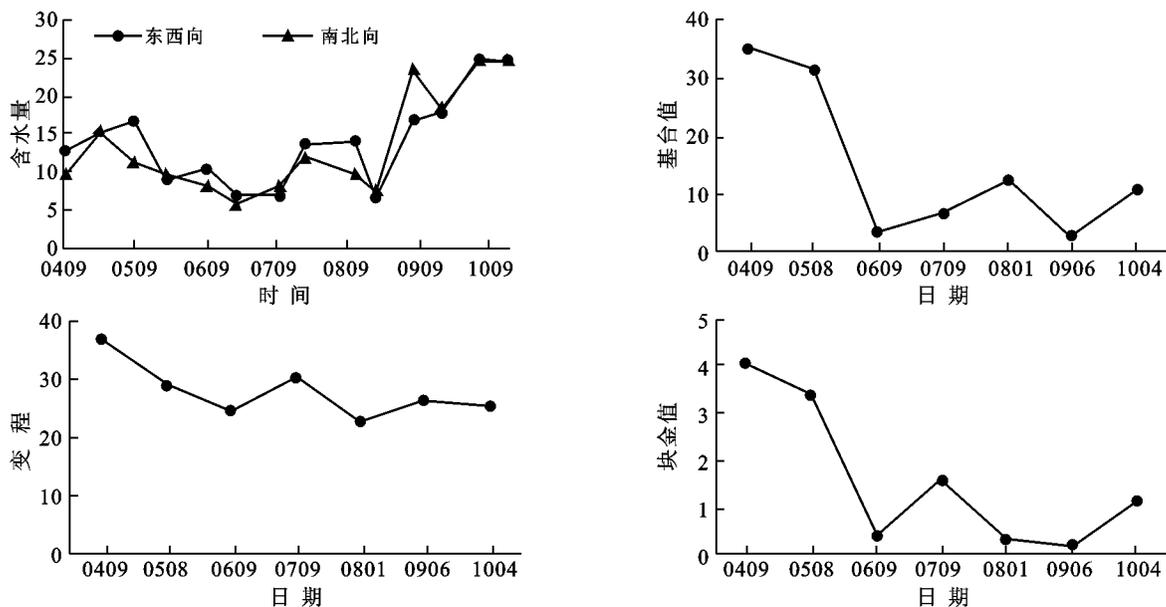


图 1 0—100 cm 土壤水分变异函数参数的季节变化

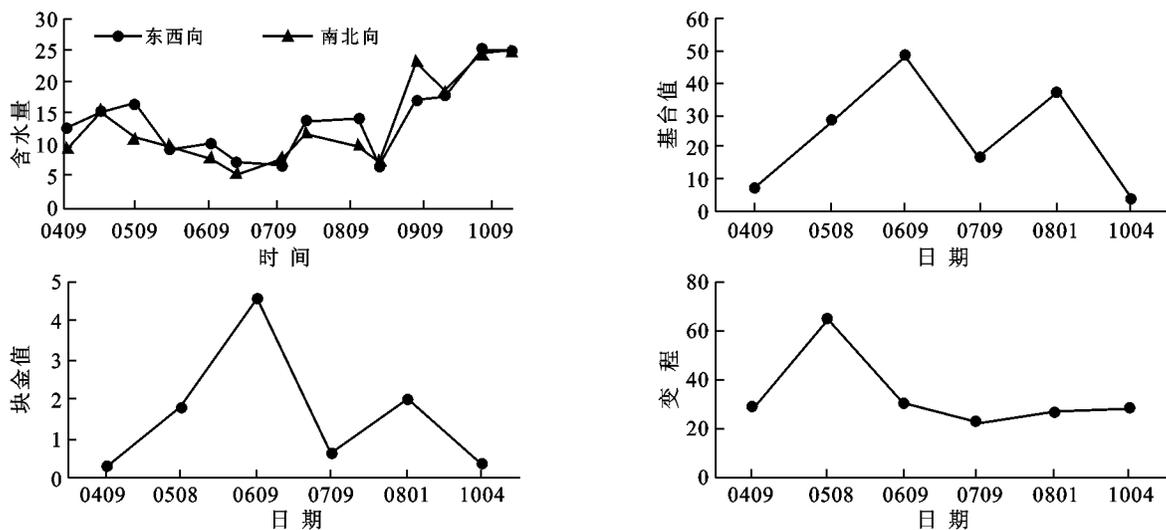


图 2 0—100 cm 土壤水分变异函数参数的季节变化

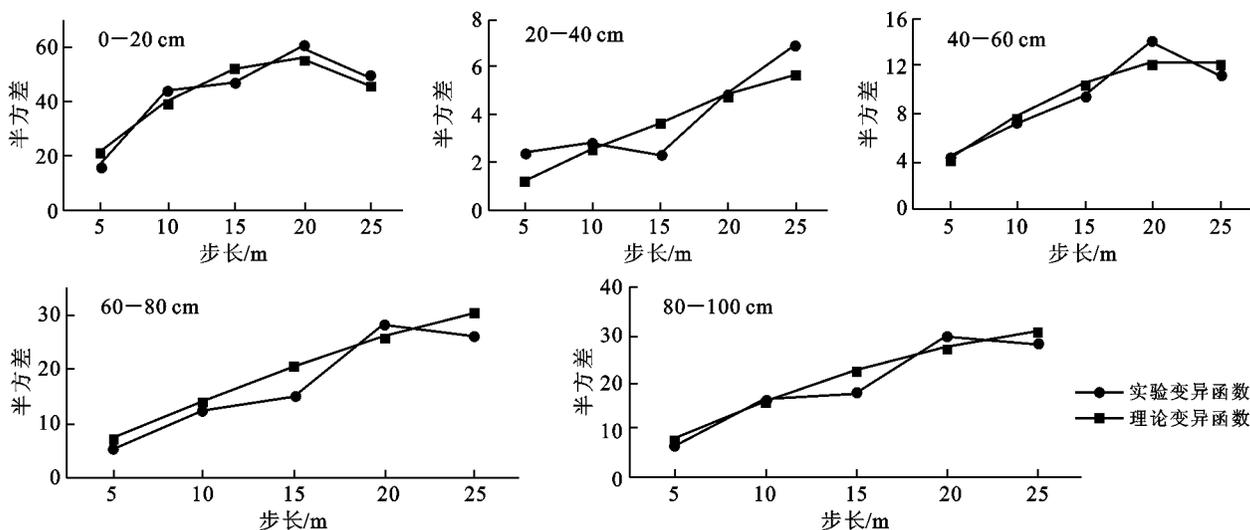


图 3 剖面土壤水分的变异函数曲线图

### 3 结论

坡面土壤水分空间变异程度与土壤含水率呈反比,即土壤水分含量低时,土壤水分的空间变异程度高,基台值也高,随着土壤含水率提高,土壤水分空间变异程度降低,基台值也相应变小;块金值呈显著的季节性变化格局,与土层平均含水率呈相似的变化规律。土壤水分的基台值随土壤深度增加而增加,即土层加深,土壤水分变异性增加。0—100 cm 平均土壤水分与剖面土壤水分的变异函数均表现出波动效应,即实验半方差并非随着步长的增加呈单调递增,而表现出以相似的距离周期性上下波动,达到基台值后,也存在这种波动现象。这是因为沿坡面取样测定土壤水分,样点的簇聚效应导致了这个周期性,如果建立均匀的栅格取样,这种现象将减小。周期性可能与研究区域的地形和地貌因子有关,也可能与人工整地有关,在本文研究尺度下,坡面上重复的微地貌格局是主要原因。

将土壤水分剖面 5 个层次土壤水分变异函数的参数平均与 0—100 cm 平均土壤水分变异函数的参数进行比较,结果发现,5 个层次土壤水分变异函数的平均基台值与 0—100 cm 平均土壤水分的基台值及块金值不同,变程较为相近。这意味着即使在同一地点不同的取样方法,土壤水分的变异函数也不同。由于我们的取样是沿坡面进行,土壤水分从坡顶到下部表现出一定的增加趋势,趋势的增加将导致基台值和变程的增加,因此,研究中的土壤水分基台值和变程可能偏高。

总之,地统计学方法是一种先进的空间分析方法,通过变异函数可以确定和比较变量因子的空间变异程度及空间变异尺度,以提供地理学、生态学和土壤学对自然现象及过程的空间变异特征解释。将其与 GIS 相结合,一方面可以加强 GIS 的空间分析功能,利用计算机的先进技术方便地实现地统计的计算、内插和制图的要求;另一方面能够很好地描述因子的空间结构特征及其时间变化规律。

#### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[ M ]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 15—20.

[ 2 ] Aranda I, Gil L, Pardos J. Seasonal water relations of three broad leaf species in a mixed stand in the center of the Iberian Peninsula[ J ]. *Forest Ecology and Man*

*agement*, 1996, 84( 1/ 3 ): 219—229.

- [ 3 ] Fleming R L, Black T A, Eldridge N R. Effects of site preparation on root zone soil water regimes in the high elevation forest clearcuts[ J ]. *Forest Ecology and Management*, 1994, 68( 2/ 3 ): 173—188.
- [ 4 ] Gupta G N. Influence of rain water harvesting and conservation practices on growth and biomass production of *Azadirachta indica* in the Indian desert[ J ]. *Forest Ecology and Management*, 1994, 70( 1/ 3 ): 329—339.
- [ 5 ] Kant R, Naoi T. Studies on the transpiration characteristics of mulberry (*Morus alba*) plants, 2: Hourly changes of transpiration and exudation in potted mulberry plants[ J ]. *Bulletin of the National Institute of Sericultural and Entomological Science (Japan)*, 1995, 15: 107—117.
- [ 6 ] Kemp P R, Reynolds J F, Pachepsky Y. et al, A comparative modeling study of soil water dynamics in a desert ecosystem[ J ]. *Water Resources Research (USA)*, 1997, 33(1): 73—90.
- [ 7 ] Kerr G, Pochop L, Teegarden T. Cool season turfgrass: Estimating water use[ J ]. *America Water Works Association Journal*, 1996, 88(1): 91—96.
- [ 8 ] Myers B S, Therveyanathan S, O' Brien N D, Bond W J. Growth and water effluent[ J ]. *Tree Physiology*, 1996, 16(1/2): 211—219.
- [ 9 ] Piatti P, Cravanzola F, Ozino O Z, et al. Effect to different soil moisture contents on growth[ J ]. *Survival and Virulence of Beauveria Brongniartii*. *Allionia (Turin)*, 1995, 33(10): 69—74.
- [ 10 ] Rockstroem J. Biomass production in dry tropical zones: how to increase water productivity[ C ]. *Proceedings of An FAO Informal Workshop, Rome, Italy, 31 January - 2 February, 1993, Rome (Italy)*, FAO: 1995: 31—51.
- [ 11 ] Scientific Committee on the Water Resources. *Water resources research: trends and need in 1997*. *Hydro. Sci. J.*, 1998, 43(1): 19—46.
- [ 12 ] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[ J ]. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 715—720.
- [ 13 ] 刘春利, 邵明安, 张兴昌, 等. 神木水蚀风蚀交错带退耕坡地土壤含水率空间变异性研究[ J ]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 132—135.
- [ 14 ] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤含水率空间变异性研究[ J ]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 5—10.
- [ 15 ] Canton Y, Sole Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain[ J ]. *Journal of Hydrology*, 2004, 285: 199—214.