

晋西黄土区土壤水分有效性分析的克立格法*

李笑吟¹ 毕华兴¹ 张志² 张建军¹ 林靛靛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 武警森林指挥学校, 北京 102202)

摘要 以山西吉县蔡家川小流域土壤水分有效性分级为基础, 通过对 291 个土壤水分监测点在旱季的土壤水分监测(TDR 土壤水分测定法), 以变异函数为主要工具, 以普通克里格法和指示克立格法为基本方法, 研究土壤水分空间分布及土壤水分有效性水平在空间上的概率分布。研究结果表明: 试验区土壤有效水和无效水的分界为 13.46% (0~30 cm)、12.48% (30~60 cm), 速效水和迟效水的分界为 15.20% (0~30 cm)、14.20% (30~60 cm); 通过克立格插值估计整个研究区坡面 0~30 cm、30~60 cm 土壤水分平均值为 10.94%、11.88%, 处于土壤无效水含量范围内的面积占总面积的 75.7%、55.7%; 土壤水分有效性的概率分布与坡向关系密切, 土壤有效水的概率自东北向西南递减。30~60 cm 土层出现有效水区域及相对应的概率远大于 0~30 cm 土层。

关键词 土壤水分有效性; TDR; 黄土区; 克立格法; 概率分布

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

土壤水分有效性的研究是土壤水分研究中的热点问题, 作为土壤水分中可直接被植物生长利用的部分, 有效水的含量及分布状况直接关系到造林树种的选择、造林成活率以及林木水分生产力^[1,2]。有效水的正确估算是黄土区水资源状况估算的核心问题, 是黄土区自然资源可持续发展的前提。

目前国内外的研究基本可以解决土壤水分有效性的分级问题, 但由于土壤含水量在空间上的分布是非均质的和各向异性的^[3], 合理的估算空间上土壤水分分布状况的方法尚不成熟, 使得在区域范围内土壤水分有效性状况的研究进展缓慢^[4]。本次研究旨在通过对区域范围内土壤水分总体分布状况的监测, 估算全区域土壤水分有效性水平, 并预测不同区域土壤有效水出现的概率, 为土壤水分状况的全面评估提供依据。

1 试验区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(北纬

36°14' ~ 36°18', 东经 110°40' ~ 110°48')。流域主沟长 12.15 km, 面积 40.10 km²。该流域为黄土高原残塬沟壑区和梁状丘陵沟壑区的典型地区, 海拔 904~1592 m, 年平均降雨量为 579.5 mm, 年平均水面蒸发量为 1723.9 mm, 年均气温 10℃; 土壤为褐土, 黄土母质; 流域森林覆盖率为 39.8%。

试验区为黄土区典型梁峁类型, 位于蔡家川流域中部, 主梁为南北走向, 南北向长 675 m, 东西向长 490 m, 峁顶海拔 1195 m, 沟底海拔 1060 mm, 高差 135 m。坡度范围在 7°~66°之间。梁峁坡面植被以人工林为主, 包括果园、纯林、混交林、灌草坡; 主要乔灌木有油松(*Pinus tabulaeformis* Cam.)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudosacacia* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、梨(*Pyrus bretschneideri* Rehd.)、山桃(*Prunus davidiana* (Carr.) Franch.)、山杏(*var. ansu* Maxim.)、黄刺梅(*Rosa Xanthina* Lindl.)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* Liudl.)等。

* 973 项目(2002CB111503)和国家“十五”攻关资助项目(2001BA510B0101)共同资助

- 通讯作者: 毕华兴(1969~), 男, 博士, 北京林业大学水土保持学院副教授。主要研究方向: 森林水文与地理信息系统。Email: bhx@bjfu.edu.cn

作者简介: 李笑吟(1979~), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事林业生态方面的研究。E-mail: 62391586@163.com

收稿日期: 2005-06-03; 收到修改稿日期: 2005-10-20

2 研究方法

2.1 土壤水分监测点的布设

在试验区,采用均匀网格法布设土壤水分测定样点,按 20 m × 20 m 的网格选取样点,共布置样点 291 个,见图 1。

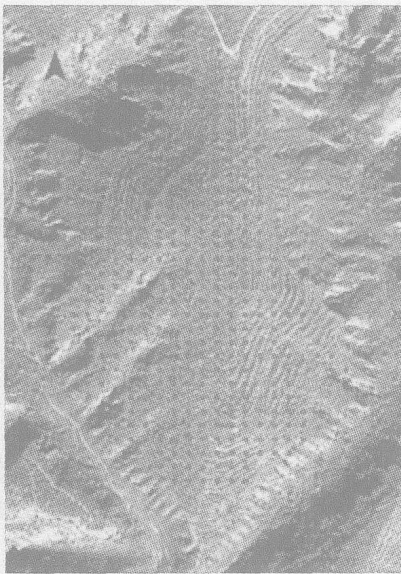


图 1 试验区位置图及土壤水分监测点布设图
Fig 1 Monitoring site of soil moisture in experiment region

2.2 测定方法

2.2.1 土壤物理容重和土壤孔隙度的测定 在试验区,开挖土壤剖面,在 0~ 30 cm、30~ 60 cm 不同质地土层,用 400 ml 环刀取原状土样,每层 2 次重复,在实验室中进行土壤容重、土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度等物理性质的测定。将装满土样的环刀打开盖后放在平底盆中,在盆中加水至环刀上沿,并保持水位,土壤达到饱和后擦干环刀外面的水分,称重 W_1 ; 然后支架上排水 24 h,使非毛管水全部排出后,称重 W_2 ; 置于烘干箱中至恒重,再称重 W_3 。利用下式计算毛管孔隙度和非毛管孔隙度:

$$P_{\text{非毛管}} = \frac{W_1 - W_2}{W_3 - W_{\text{环刀}}}$$

$$P_{\text{毛管}} = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_{\text{环刀}}}$$

2.2.2 土壤水分特征曲线的测定 在同一土壤剖面,用离心机专用环刀取原状土样,每层 2 次

重复,使用 H-1400PF 特型土壤用离心机进行土壤水分特征曲线的测定。

2.2.3 土壤水分的测定 于 2005 年 4 月 25 和 26 日,使用目前土壤水分测量中最为快捷、准确的仪器^[5]TDR 测定所选 291 个样点 0~ 30 cm 和 30~ 60 cm 两层土层水分含量。本次试验选用 TRIME-TDR,并配合三针型 P3 探头同时使用,可实现短时间大量取样点土壤水分数据的快速、直接、准确的测定。

2.3 数据的处理与分析方法

2.3.1 数据处理 利用 ArcGIS 地理信息系统软件,将全试验区 291 个样点点位图数字化,生成用于地统计学分析的样点分布空间数据库,通过关键字段与各点不同土层土壤水分数据之间实现联接,形成与样点地理坐标匹配的属性数据。然后用 ArcGIS 中的 Geostatistical Analyst 模块进行分析,包括样本数据的统计分析、异常值的剔除,并运用克立格(Kriging)插值方法,对未测定区域土壤水分状况进行插值计算,生成整个梁峁坡面的土壤水分分布图,根据土壤水分有效性分级标准,生成土壤水分有效性状况分布图,进而使用指示克立格方法(Kriging)绘制试验区中有效水分布概率图。

2.3.2 空间局部估计(克立格法) 克立格法(Kriging)也称空间局部估计或空间局部插值,是地统计学两大主要内容之一^[6]。在土壤水分分布状况的估算中,使用普通克立格法,普通克立格法是建立在变异函数理论及结构分析基础上,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计的一种方法;在有效水分布概率的估算中使用指示克立格法,指示克立格法是一种最常用的非参数地统计学方法,是因把对区域化变量的研究转换为对其指示函数的研究而得名,指示克立格法具有不随空间变化的平稳性,它不要求区域化变量服从某种分布,也不需要剔除异常值。

3 结果与讨论

3.1 土壤水分有效性分析

3.1.1 土壤物理性质及土壤水分特征曲线 土壤水分特征曲线揭示了土壤水的能量指标(基质吸力)与数量指标(土壤含水量)之间的内在关系,通常以脱湿曲线表征。试验区样地土壤物理性质见表 1,土壤水分特征曲线见图 2。

表1 土壤物理性质
Table 1 Soil physical characteristics

土层 Depth of soil profile(cm)	植被 Vegetation	容重 Density (g cm^{-3})	总孔隙度 Pore (%)	毛管孔隙度 Fine pore (%)	非毛管孔隙度 Coarse pore (%)	质地 Texture
0~ 30	刺槐 × 侧柏 <i>Robinia pseudosacacia</i> L. × <i>Platycladus orientalis</i>	1.29	55.75	53.88	1.88	轻壤 Light loam
30~ 60	刺槐 × 侧柏 <i>Robinia pseudosacacia</i> L. × <i>Platycladus orientalis</i>	1.21	62.25	60.88	1.38	中壤 Medium loam

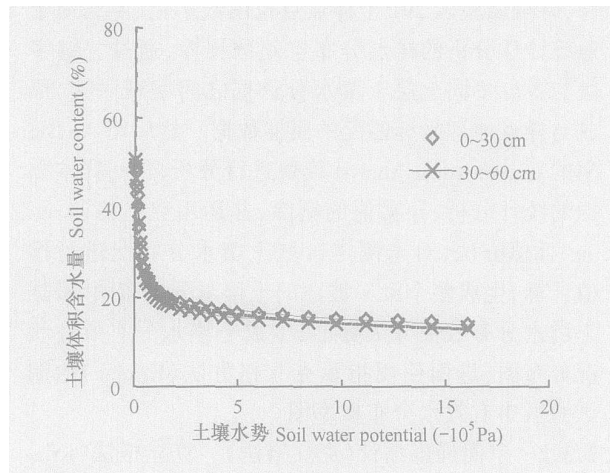


图2 土壤水分特征曲线
Fig. 2 PF curve of soil moisture

由图2可见,在土水势 $> 1 \times 10^5$ Pa时,水分特征曲线陡直,土壤含水量变化剧烈;土水势 $< 1 \times 10^5$ Pa,曲线却趋于平缓,土壤含水量变化不大。在高土水势范围内,土壤所能保持或释放出的水量取决于土壤结构较粗的孔隙分布,主要是重力起作用。在中低土水势段主要决定于土壤质地,主要是土壤颗粒的表面吸附力起作用^[7]。

将测定结果按 $\theta = AS^{-B}$ 进行拟合^[8],结果见表2。方程中的参数A决定了曲线的高低,即持水能力大小,A值越大,持水能力越强;参数B决定曲线的走向,即土壤含水量随土水势降低而递减的快慢。参数A和B的大小,主要受土壤质地(主要是小于0.01 mm物理性粘粒含量)、有机质和结构的影响^[9]。通过拟合方程,计算不同土壤基质吸力值S相对应的土壤水分含量 θ ,根据实地测量资料划分各林地土壤水分有效性的水平。

表2 土壤水分特征曲线的拟合结果

Table 2 Modelling of PF curve

土层 Depth of soil profile(cm)	方程参数 Equation parameter		
	A	B	R ²
0~ 30	22.74	0.17	0.91
30~ 60	22.74	0.17	0.91

3.1.2 土壤水分有效性状况分级 在对实验区土壤水分形态与能量状态的关系分析的基础上,从土壤水分物理的和生物的分类来看^[10],当基质吸力为0时,土壤水分处于渗透重力水状态时,就其对植物的有效程度来说,它属于土壤水分的潜在的供水性能,虽极易被植物吸收,但其在土层中停留的时间十分短暂,因重力作用,向深层淋失。在研究工作中,常将毛管孔隙最大持水量和稳定凋萎湿度之间保持的水分为对植物可以利用的,称为有效水。根据实验地原状土测定的毛管孔隙最大持水量值确定有效水上限,而造林树种的永久凋萎点为土水势在 -20×10^5 Pa时的土壤含水量,作为有效水下限。在有效水范围内,随着土水势下降,含水量降低,植物根系吸收水分的难度增加^[11],树木的暂时凋萎点(毛管断裂湿度)约在土水势为 -10×10^5 Pa时的土壤含水量,可将 -10×10^5 Pa作为易效水与难效水的分界线^[12]。当基质吸力大于 -20×10^5 Pa时,对植物来说,称为无效水。

根据上述分类系统,对实验区土壤水分有效性进行分类,结果见表3。

表 3 土壤水分有效性分类
Table 3 Classification of validity water

土层 Depth of soil profile(cm)	有效水 Validity water (%)		无效水 Swelling water (%)
	速效水 Fluid water	迟效水 Nonfluid water	
0~ 30	53.88~ 15.20	15.20~ 13.46	13.46
30~ 60	60.88~ 14.20	14.20~ 12.48	12.48

表 4 研究区土壤水分含量统计特征表

Table 4 Statistics features of soil moisture

土层 Depth of soil profile (cm)	样本数 N	最大值 Max. (%)	最小值 Min. (%)	平均值 Mean (%)	中值 Median (%)	标准差 Std dev	变异系数 CV (%)	偏态系数 Skew.	峰态系数 Kurt.
0~ 30	291	23.80	4.5	10.94	10.2	3.39	30.99	0.95	3.99
30~ 60	291	23.45	5.8	11.88	11.0	3.59	30.22	0.76	3.04

3.3 土壤水分含量的空间分布格局(Kriging)及分析

3.3.1 土壤水分含量的空间分布格局(Kriging)

根据得到的变异函数理论模型,采用普通克立格法

3.2 土壤水分数据的统计分析

在建立变异函数理论模型之前,应对数据的统计学特征有一个初步的了解。对 291 个样点的土壤水分数据进行经典统计学分析,其结果见表 4。

由表 4 可见 0~ 30 cm 土层土壤平均含水量低于 30~ 60 cm 土层,变异系数高于 30~ 60 cm 土层,说明表层土壤较低的土壤水分含量和较高的变异程度,而底层土壤水分状况较好且变异程度较小。

进行最优内插^[13],绘制土壤水分含量的空间格局图(Kriging map),见图 3,同时生成土壤水分有效性分级图(图 4),并计算出有效水分布面积统计表(表 5)。

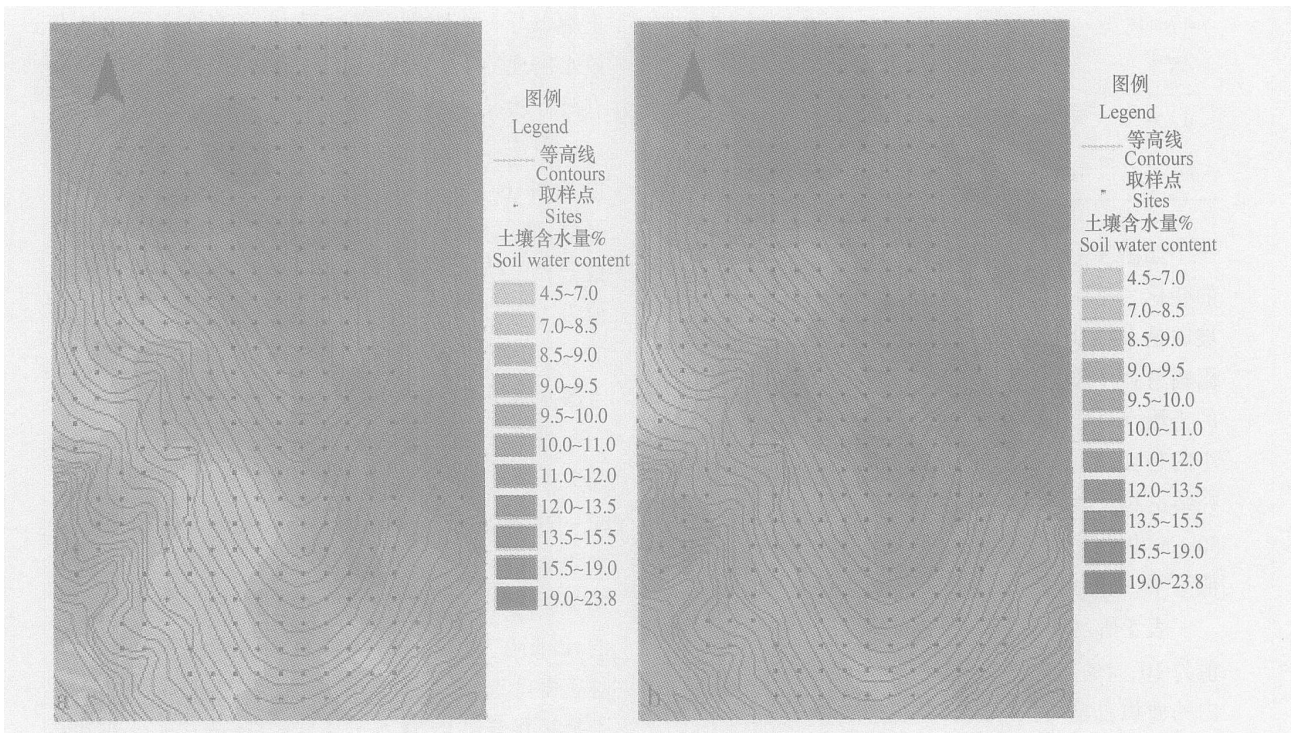


图 3 土壤水分空间分布图(a 0~ 30 cm 土层; b. 30~ 60 cm 土层)

Fig 3 The spatial distribution of soil moisture (a 0~ 30 cm; b 30~ 60 cm)

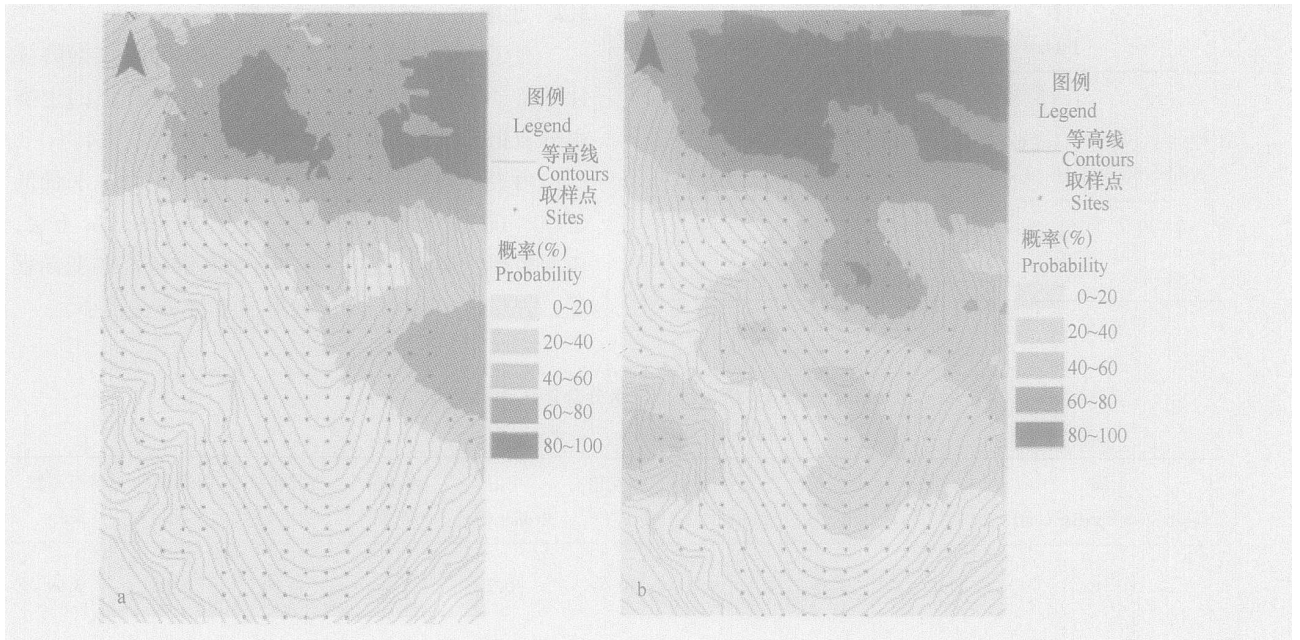


图 4 土壤水分有效性分级图(a. 0~ 30 cm 土层; b. 30~ 60 cm 土层)

Fig 4 Classification of soil water validity (a. 0~ 30 cm; b. 30~ 60 cm)

表 5 土壤水分分布面积统计表

Table 5 Area distribution statistics of soil moisture

土层 Depth of soil profile (cm)	土壤水分均值 Average soil moisture (%)	土壤水分有效性分布面积 Distribution area of validity water (%)		
		无效水 Swelling water	迟效水 Nonfluid water	速效水 Fluid water
0~ 30	10.94	75.7	21.8	2.5
30~ 60	11.88	55.7	16.6	27.7

如图 3 中 a、b 所示, 土壤水分表现出较为规律的变化。总体呈现自东北向西南减小的趋势, 可见坡向是土壤水分空间变异的主导因子, 阳坡由于太阳辐射强度较大, 土壤水分蒸发强烈, 以至形成较低的土壤水分含量。另外土壤水分有随坡位降低而减小的趋势, 坡脚处的土壤水分状况最差, 这与很多研究结论相反。30~ 60 cm 土壤水分状况要好于 0~ 30 cm, 由于表层土壤受气象因素影响强烈, 测期正值旱季, 强烈的蒸发, 使得表层土壤水分含量偏低。

表 5 所示, 0~ 30 cm、30~ 60 cm 土壤水分平均值为 10.94%、11.88%, 且处于土壤无效水含量范围内的面积占总面积的 75.7%、55.7%, 无效水分布面积较大, 主要因为测量时间处于春季土壤水分强烈

蒸发消耗期, 土壤水分含量较低。30~ 60 cm 土层速效水面积远大于 0~ 30 cm 土层, 这对植物生长较为有利。

3.3.2 土壤水分有效性的概率分布 在实验区土壤水分有效性的研究过程中, 还存在不同区域有效水出现的概率问题, 它直接影响到区域土壤水分有效性状况的准确估价。

用该实验区土壤有效水和无效水的分界 13.46%(0~ 30 cm)、12.48%(30~ 60 cm) 为判定界限值, 使用指示克里格法, 其原理是将土壤水分数据根据界限值赋 0 或 1 值, 大于界限值的土壤水分赋值为 1, 小于界限值的土壤水分赋值为 0, 通过生成的 0, 1 数据库, 利用变异函数理论, 即可生成实验区土壤水分有效性的概率分布图, 见图 5。

由图 5 可见, 土壤水分有效性的概率分布与坡向关系密切, 土壤有效水的概率自东北向西南递减。30~ 60 cm 土层出现有效水区域及相对应的概率远大于 0~ 30 cm 土层。在西南部有效水的概率在 0~ 20% 之间, 即在此区域中出现无效水的概率是很大的, 因此在此区域进行人工林营建需注意树种及造林密度的选择; 东北部的大部分区域土壤水分有效性概率相当高, 土壤水分条件较好, 适宜进行果园和用材林地的营建。

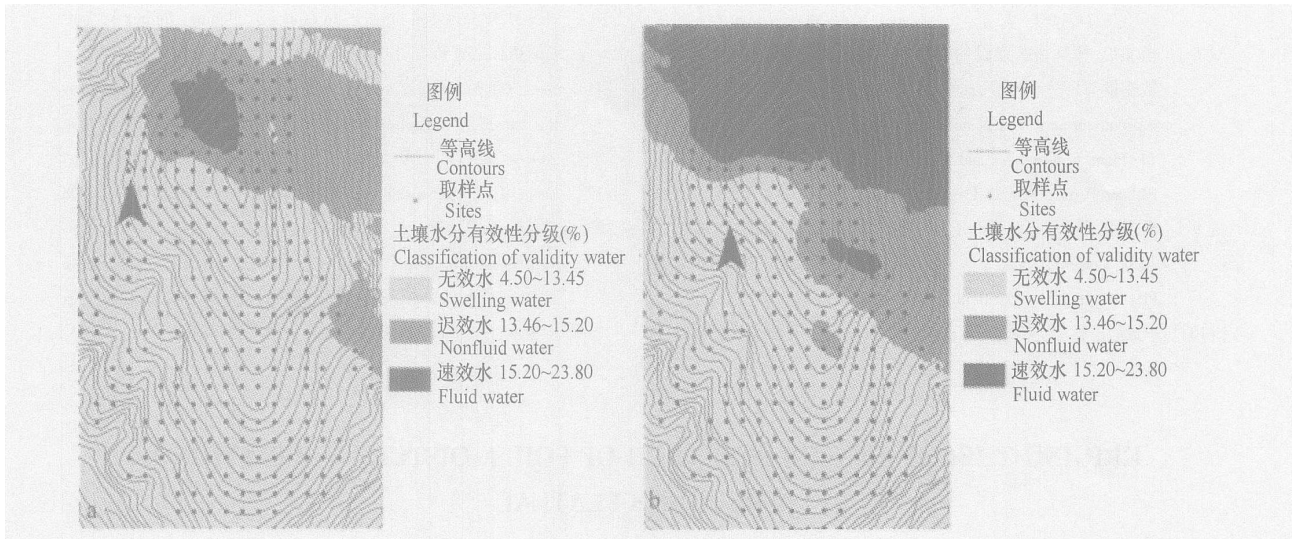


图5 土壤水分有效性概率分布图(a. 0~30 cm 土层; b. 30~60 cm 土层)

Fig 5 Probability of soil water validity(a. 0~30 cm; b. 30~60 cm)

4 结 论

试验区土壤水分特征曲线可用经验方程 $\theta = AS^{-B}$ 进行拟合, 其结果为:

$$\theta = 22.7S^{-0.175} (0 \sim 30 \text{ cm})$$

$$\theta = 22.7S^{-0.175} (30 \sim 60 \text{ cm})$$

根据实验地原状土测定的毛管孔隙最大持水量值确定有效水上限, 而将造林树种的永久凋萎点 $-20 \times 10^5 \text{ Pa}$ 作为有效水下限。在有效水范围内, 将树木的暂时凋萎点(毛管断裂湿度) $-10 \times 10^5 \text{ Pa}$ 作为速效水与迟效水的分界线。得到试验区土壤有效水和无效水的分界为 13.46% (0~30 cm)、12.48% (30~60 cm), 速效水和迟效水的分界为 15.20% (0~30 cm)、14.20% (30~60 cm)。

通过在旱季, 试验区土壤水分测定值, 使用克立格插值法估计整个研究区坡面 0~30 cm、30~60 cm 土壤水分平均值为 10.94%、11.88%, 处于土壤无效水含量范围内的面积占总面积的 75.7%、55.7%。

土壤水分有效性的概率分布与坡向关系密切, 土壤有效水的概率自东北向西南递减。30~60 cm 土层出现有效水区域及相对应的概率远大于 0~30 cm 土层。

4~5 月份, 正值黄土高原旱季, 对该时期典型梁峁土壤水分及土壤水分有效性状况的空间分布分析, 对该区造林地、造林树种、造林密度的选择有一定的指导意义。但若掌握长时间序列的土壤水分

测定资料, 将土壤水分的空间变异和时间变异综合分析, 这会对黄土区植树造林有更为重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 余新晓, 张建军, 朱金兆. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学, 1996, 32(4): 289~297. Yu X X, Zhang J J, Zhu J Z. Analysis and evaluation of soil water conditions of protective forest ecosystem in Loess area (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(4): 289~296
- [2] 王孟本, 柴宝峰, 李洪建, 等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效性状况. 林业科学, 1999, 35(2): 1~11. Wang M B, Chai B F, Li H J, et al. Soil water holding capacity and soil available water in plantations in the loess region (In Chinese). *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(2): 1~11
- [3] 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性. 土壤学报, 2003, 40(5): 683~689. Zhou Q Y, Shimada J. Temporal stability of the spatial distribution pattern of soil water (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 683~689
- [4] 区美美, 王建武. 土壤空间变异研究进展. 土壤, 2003, 35(1): 30~33. Qu M M, Wang J W. Review of research on soil spatial variability (In Chinese). *Soils*, 2003, 35(1): 30~33
- [5] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 19~24
- [6] 王政权. 地质统计学在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. Wang Z Q. Application of Geostatistics in Ecology (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [7] 陈志雄, 汪仁真. 中国几种土壤的持水性质. 土壤学报, 1979, 16(3): 277~281. Chen Z X, Wang R Z. The characteristic of soil holding water in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1979,

- 16(3): 277~ 281
- [8] 杨文治. 林草植被建设的土壤养分和水分环境. 黄土高原植被建设与可持续发展, 北京: 科学出版社, 1998. Yang W Z. The soil nutrient and water condition in plant construction (In Chinese). *In: Plant Construction and Continuable Development in the Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1998
- [9] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究. 北京: 科学出版社, 2000. Yang W Z, Shao M A. The Research on Soil Water in the Loess Plateau (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [10] 华孟, 王坚. 土壤物理学, 北京: 北京农业大学出版社, 1993. Hua M, Wang J. Soil Physics (In Chinese). Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1993
- [11] Feng Y J, Yang J S, Zheng J H. Correlation between soil water retention capability and soil salt content. *Pedosphere*, 2000, 10(3): 275~ 280
- [12] Daniel H. Environmental Soil Physics. London: Academic Press, 1998
- [13] Warrick A W, Zhang R, Moody M M. Kriging versus alternative interpolators: Errors and sensitivity to model inputs. *In: Roth K, Fl hler H, Jury W A, et al. eds. Field Scale Water and Solute Flux in Soils*. Basel: Birkhaser Verlage, 1990. 157~ 164

KRIGING THEORY ON THE RESEARCH OF SOIL MOISTURE VALIDATION IN THE LOESS PLATEAU

Li Xiaoyin¹ Bi Huaxing¹ Zhang Zhi² Zhang Jianjun¹ Lin Jingjing¹

(1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

(2 Chinese Armed Police Force Forest Command College, Beijing 102202, China)

Abstract Based on the validity classification of soil moisture in the Caijiachuan watershed, using the variogram as a main tool and the ordinary Kriging and indicator Kriging theory, the spatial distribution of soil moisture and validation was conducted through 291 sites soil moisture detection (different depth of soil profile, 0~ 30 cm and 30~ 60 cm) by TRIME-TDR in research area. The used Kriging could acquire a fine estimation of soil moisture. The result shows that (1) the validation (valid and invalid) of soil moisture was divided by 13.46% (0~ 30 cm) and 12.48% (30~ 60 cm), respectively; (2) The average of the soil moisture in the area is 10.94% (0~ 30 cm) and 11.88% (30~ 60 cm), respectively; (3) The area where the soil moisture is in the range of invalid takes about 75.7% (0~ 30 cm) and 55.7% (30~ 60 cm) of the whole reserch area, respectively; (4) The validity of soil moisture is in close relation with the slop directions; (5) The probability of soil moisture descends from northeast to southwest in research area; and (6) through the compare the ranger and probability of valid soil moisture in different depth (0~ 30 cm and 30~ 60 cm) of soil profile, the result shows that the latter is much more than that in former.

Key words Validity of soil moisture; TDR; Loess areas; Kriging; Probability distribution