

渭北旱塬土壤水分空间变异性

刘贤赵^{1, 2}, 衣华鹏¹

(1. 烟台师范大学地理与资源管理学院, 山东 烟台 264025; 2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:渭北旱塬是陕西省重要的苹果生产基地, 探讨该区不同土地利用的土壤水分时空变异特征, 对农业生产布局、种植业结构调整和减少径流、控制侵蚀具有特殊的现实意义。本文用地统计学的理论和方法, 分析了渭北旱塬区 3 种主要土地利用类型农地、苹果地和苜蓿地 3 个土层深度(0~ 20 cm、60~ 80 cm、280~ 300 cm) 的土壤水分空间变化趋势。变异函数分析结果表明, 3 种土地利用类型的土壤水分具有明显的空间变异特性。在 0~ 20 cm 土层, 空间变异性尺度为 9~ 16 m, 60~ 80 cm 土层为 5~ 12 m, 280~ 300 cm 土层深为 5~ 10 m, 空间变异性程度随尺度变化。自相关尺度为 1~ 17 m, 自相关部分的空间变异性在 0~ 20 cm、60~ 80 cm 和 280~ 300 cm 分别占总空间变异性的 90.0%~ 94.0%、84.0%~ 98.0% 和 85.0%~ 94.0%, 明显大于随机部分的空间变异性。从苜蓿地、苹果地到农地, 空间自相关的尺度逐渐增大。各向异性分析表明, 农地和苜蓿地在表层(0~ 20 cm) 具有明显的各向异性, 而苹果地的土壤水分含量接近各向同性。

关键词:渭北旱塬; 地统计学; 土壤水分; 空间变异性

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

陕西渭北旱塬是我国著名的优质商品化苹果生产基地, 该区自然条件除与世界其它苹果优生区相似之外, 还具有海拔高(800~ 1 200 m)、昼夜温差大(16.6 ± 0.5 °C)、土层深厚(最深处可达 200 m)、质地疏松、无环境污染等独特优势。目前, 该区苹果种植面积已达 33.3×10^4 hm², 占全省苹果栽培总面积的 70% (全省约 53.3×10^4 hm²), 其中大部分集中于降水稀少且分布不均的渭北旱塬区。土壤水分不仅成为影响该区果树正常生长发育、产量和品质下降的重要因素, 而且也是土壤侵蚀过程、作物生长、植被恢复和土地持续利用以及流域水文模拟的主要影响因素。国际上, 对土壤水分时空变异性的研究一直是水文学、土壤学研究的一个热点^[1]。由于不同地区在气候、地形、植被和土地利用类型等方面的不同, 导致土壤水分在时空上存在明显的差异。同一土地类型不同空间位置也存在着由土壤本身变化引起的土壤水分的差异(即空间变异性)。对渭北

旱塬区土壤水分的研究长期以来主要集中在两个方面: 一是土壤特性(如质地、容重等)和地形(如坡度、坡向、坡位等)对土壤水分状况^[2, 3]、土壤水分常数^[4, 5](如田间持水量、凋萎系数、土壤导水率、饱和含水量和土壤入渗率等)和植物生长与土壤水分的关系以及植被的水文生态环境效应等方面^[6, 7]; 二是集中于黄土区土壤水资源对陆地水循环的影响^[8]、土壤水分的区域分异特征^[9]、黄土高原环境旱化与土壤水分的关系^[10]以及黄土区土壤水资源的地带性和非地带性^[11]。虽然部分学者对渭北塬区土壤水分的空间分布也做过研究^[12], 但土层深度主要集中在表层(0~ 30 cm), 缺乏对深层次土壤水分的研究, 而深层次土壤水分对生态过程和水文过程也具有重要的意义^[11]。在研究方法上, 大多是利用经典的统计学方法或描述性方法, 并未能较好地揭示土壤水分状况的空间变异性问题。本文从土地利用类型的尺度上, 运用地统计学的理论和方法研

收稿日期(Received date): 2004- 01- 08; 改回日期(Accepted): 2004- 03- 15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40101005), 山东省自然科学基金项目(Q2002E03)及山东省教委项目(J02L01)共同资助。[Supported by the National Nature Science Foundation of China (40101005), the Natural Science Project of Shandong Province (Q2002E03) and the Education Ministry item of Shandong Province (J02L01).]

作者简介(Biography): 刘贤赵(1970-), 男(汉), 湖南隆回人, 博士, 教授, 硕士研究生导师。[LIU Xianzhao (1970-), Male (the Han Nationality), The native place is Longhui of Hunan Province, Doctor degree., Professor, Tutor of Master Graduate Student.]

究渭北塬区苹果基地 3 种主要土地利用类型(苹果地、中产农田、苜蓿地)不同层次土壤水分的空间变异性,理论上可以丰富土壤水分时空变异特征及定量研究的内容,深化不同土地利用及其格局对土壤水分的影响,实践上对农业生产布局、种植业结构调整和减少径流、控制侵蚀也具有特殊的生产意义。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于陕甘交界处的中国科学院渭北长武塬试区(107°40′~42′E, 35°12′~16′N)。塬面海拔高度为1 220~1 226 m,地貌类型以塬面和沟壑两大单元为主,其中塬面 2.9 km²,占试区土地总面积的 35%,是典型的黄土高原沟壑区。该区年均气温 9.1℃,多年平均降水量为 581.4 mm,≥10℃的积温 3 029℃,年总辐射量 55.37 KJ/cm²,属暖温带半湿润大陆性季风气候。由于试区存在适合于苹果生长的优越自然条件,至 1998 年底,塬面苹果种植面积已占耕地面积的 20%。土壤类型为黄土母质上发育的黑垆土,深厚土层和良好的物理性质(土壤容重、田间持水量、凋萎系数分别为 1.36 g/cm³、22.8%和 8.6%~9.0%)为作物根系生长提供了有利的生态条件。地下水埋深 60~80 m,农业生产基本上依赖于天然降水,是典型的旱作农业区。塬面土地利用类型有农田(种植小麦、玉米等)、果园、苜蓿地和小量撂荒耕地。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设置与取样方法

分别选取塬面相邻的 3 种主要土地利用类型中产农田、苹果地和苜蓿地的典型地段,设置观测样地。各样地自然条件基本一致,其中苹果地树龄为 15 a,主栽品种为红富士和秦冠,并混有少量的梨、桃树。苜蓿草地为多年生豆科草本植物苜蓿,1984 年播种,实行连续种植,其间杂有冷蒿、冰草,在 1986~1998 年的 13 a 中年均鲜草产量为 3 1812.6 kg。中产农田为一年生小麦连续种植区(测定时,小麦已收割,即麦茬地),土壤肥力中等,产量为 2 700 kg/hm²。

在上述 3 种土地类型样地内选择微地形条件一致、地势平坦的部位,用 30 m×30 m 大网格样方,内含 4 m×4 m 网格 56 个,在东西方向于 2002-07-25~28 进行采样,采样期间天气晴好。采样前,

先对每个网格编号,然后用直径 4 cm 土钻分别在每个网格内随机钻孔 3 个(最小取样距离间隔为 1 m),获取 0~20 cm、60~80 cm、280~300 cm 三个层次的土样,用烘干法测定土壤水分。每个样点 3 个重复,取其平均数作为该样点的土壤含水量值。

1.2.2 半方差分析与数据处理

地统计学的基本原理和方法在许多文献中已有比较详细的描述^[13,14]。不同空间位置上各土地利用类型的土壤水分与样点的空间位置有关,是空间距离的函数。因此,在研究区域上考虑所有分隔距离上任意两空间点间土壤水分的空间变异性特征,可用半方差函数(Semi-variogram)描述

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

式中 $r(h)$ 是半方差函数, h 为两样本间的分隔距离, $N(h)$ 是间距为 h 时的样本对总数, $z(i)$ 和 $z(i+h)$ 分别是随机变量在空间位置 i 和 $(i+h)$ 上的取值。

根据所测数据,分别计算 0~20 cm、60~80 cm 和 280~300 cm 土壤水分的变异函数,绘制半方差函数图,建立半变异函数的理论模型。半方差函数图的理论解释为:当土壤属性呈随机分布时,半方差图表现为纯块金方差图;当土壤属性在变程内存在空间自相关,在变程以外独立于样本点的间隔距离时,半方差函数可用球状模型描述;当土壤属性在取样尺度内不存在局部格局,而可能受更大尺度的格局控制时,半方差函数表现为线性模型。本文利用地统计学 GEO-EAS 软件计算 $r(h)$,拟合半方差函数,获得半方差函数的几个参数。通过块金值(Nugget)、基台值(Sill)、变程(Range)、分维数(Fractal dimension)、块金值与基台值之比、各向异性比(Anisotropic ratio)以及决定系数(Coefficient of determination)等参数定量地分析土壤水分的空间特性。通过最优回归分析及多种线型比较筛选后,不同土地类型土壤水分的半变异函数采用如下球状模型较合适。

$$r(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ c_0 + c \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right], & 0 < h \leq a \\ c_0 + c, & h > a \end{cases} \quad (2)$$

式中 c_0 是块金值, $(c_0 + c)$ 是基台值, a 是变程。

决定系数(R^2)是回归平方和与总平方和的比。分维数(D)的计算由变异函数 $r(h)$ 和两样本间的分隔距离 h 之间的关系决定,即

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

(3)

对式(3)取双对数,对双对数进行线性回归,得到回归直线的斜率 m 。利用 m 计算出分形维数 D

$$D=\frac{1}{2}(4-m)$$

(4)

分维数 D 的大小表征变异函数曲线的斜率。不同变量 D 值之间的比较可以反映空间变异性的程度。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分的经典统计特征值

对塬面不同土地利用类型土壤水分进行空间变异分析时,先用经典统计方法进行分析。对统计平均数,标准差(SD)表示的是绝对变异,变异系数(C_v)反映的是相对变异,即随机变量的离散程度。一般认为, $C_v \leq 10\%$ 为弱变异性; $10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性; $C_v \geq 100\%$ 为强变异性。从表 1 可以看出,3 种土地利用类型中土壤水分均为中等变异性,0~20 cm 深度的土壤水分变异明显>60~80 cm 和 280~300 cm 深度的变异。其中农用地土壤水分变异最大,苜蓿地变异最小。从土壤水分含

量的平均值来看,渭北旱塬塬面 3 种土地利用类型之间存在明显差异,从农用地、苜蓿地到苹果地,土壤水分状况逐渐变差。水分含量在 3 个深度上农田变化在 13.0%~17.0% 间,苹果地变化在 9.0%~11.0% 间,苜蓿地为 11.0%~13.0% 间。在 280~300 cm 土层中,苹果地水分平均值为 9.35%,接近凋萎湿度 9.0%,苜蓿地土壤水分与苹果地接近(表 1)。这与 3 种土地利用类型的生产力水平、根系扩展深度(一年生小麦根系可伸长到 2 m 左右,多年生苜蓿根系可伸长到 8 m,苹果树根系可伸长到 10 m)及其蒸腾耗水强度所反映的趋势是完全一致的^[15],表明土地利用类型对土壤水分状况的影响是明显的,同时也暗示生产力水平过高、生物量过大可能会恶化土壤水分性状,造成一个干燥的生境。从表 1 中还发现,土壤水分的平均值和中值比较接近,这表明土壤水分的中心趋向分布并不被异常值所决定。由于各种土地利用类型土壤水分的分布是连续的,因此,表 1 所给出的统计值仅是从统计的角度描述了土壤水分的变化,只能在一定程度上反映总体,要反映土壤水分在空间上的变化特性。必须进行空间变异结构方面的分析与探讨。

表 1 塬面不同土地利用类型土壤水分统计描述

Table 1 Statistics of soil moisture of different land use patterns in Weibai dry highland

土层深度 Soil depth	利用类型 Land use patters	平均值 Mean(%)	中值 Median(%)	标准差 SD	变异系数 Cv(%)	最大值 Maximum	最小值 Minimum	偏度系数 Skew ness	峰度系数 Kurtosis
0~20 cm	农用地 ^{a)}	15.57	16.35	4.42	26.94	21.08	7.98	-0.54	2.00
	苹果地 ^{b)}	10.40	10.95	2.19	21.01	13.47	6.67	-0.39	1.94
	苜蓿地 ^{c)}	11.06	10.72	1.36	12.27	14.50	8.88	0.82	3.19
60~80 cm	农用地 ^{a)}	16.79	18.59	3.79	22.60	20.81	8.10	-0.91	2.57
	苹果地 ^{b)}	10.52	10.63	1.87	17.79	13.80	6.94	-0.51	2.56
	苜蓿地 ^{c)}	12.17	11.76	1.98	16.30	15.90	9.18	0.16	1.73
280~300 cm	农用地 ^{a)}	13.01	12.65	2.15	16.56	18.66	9.83	1.11	3.85
	苹果地 ^{b)}	9.35	9.36	1.21	12.91	12.32	7.48	0.57	2.96
	苜蓿地 ^{c)}	10.93	10.93	1.09	10.01	12.92	8.94	-0.04	2.08

a) Farmland; b) Apple land; c) Clover land

2.2 土壤水分的半变异函数

半变异函数是地统计学所特有的,是区域化变量在分隔距离上各样本变异的度量,并被证明是研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性的自然现象的有效工具^[13,14]。图 1、图 2 和图 3 分别是 0~20 cm、60~80 cm 和 280~300 cm 土层中不同土地利用类型的变异函数曲线,有效地揭示了 3 种土

地利用类型土壤水分的空间自相关特性。从苜蓿地、苹果地到农田,土壤水分空间自相关尺度增大,这表明 3 种土地利用类型土壤水分的小尺度空间变异性逐渐降低。表 2 是 3 种土地利用类型土壤水分变异函数的理论模型及其拟合参数,决定系数变化在 0.3~0.8 间,说明理论模型较好地反映了土壤水分的空间结构特性。变异函数分析结果表明,农用

地、苹果地和苜蓿地土壤水分的分布在研究区域上存在高度的空间变异性。土壤水分的空间变异随着空间距离的增加而增大,说明3种土地利用类型均存在空间变异结构,从较小的块金值(c_0)增加到一个相对稳定且较大的基台值($c_0 + c$)。基台值是测定因子的最大变异,当变异函数达到基台值时的空间距离称为变程(a)。变程是测定因子最大变异的空间距离,它反映的是空间点的自相关性,在变程内,空间自相关存在,且随着变程的增加空间自相关尺度增大,在变程之外,空间自相关消失(即变量是独立的)。因此,变程的大小表示空间变异性的尺

度。在用球状模型描述的3种土地利用类型中,0~20 cm土层变程为9~16 m左右,在60~80 cm土层中,变程为5~12 m左右,在280~300 cm土层中,变程为5~10 m左右,上层的变异明显大于下层。其中农用地的变程最大(60~80 cm土层除外),苜蓿地的变程最小,说明农用地的土壤水分值变化比较缓和,而苜蓿地的比较剧烈,这可能与苜蓿地是多年生植被,生育期长,根系深,蒸腾耗水量大有关。通过变异函数与尺度的关系,可以清楚地看出原面3种土地利用类型土壤水分的变异在空间上的分布和格局情况。

表 2 不同土地利用方式土壤水分空间变异函数理论模型及相关参数
Table 2 The theory semi-variance models of soil moisture and corresponding parameters of different land use types

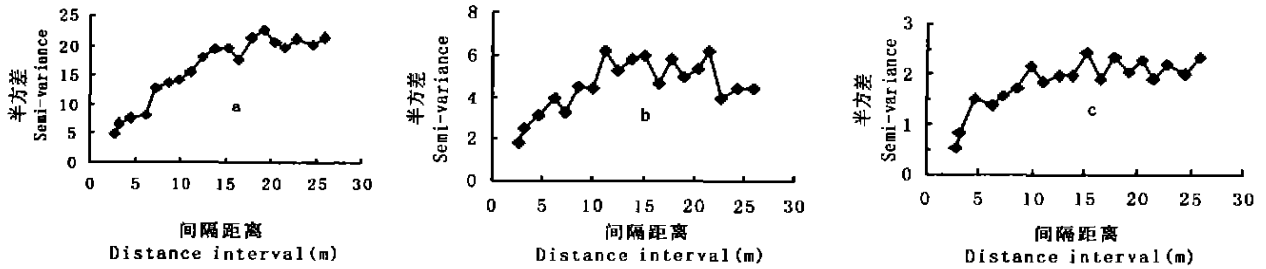
土层深度 Soil depth	土地类型 Land use patterns	模型 Model	块金值 Nugget (C_0)	基台值 Sill ($C_0 + C$)	$C_0 / (C_0 + C)$ (%)	变程 Range(a)	分维数 D	决定系数 R^2
0~ 20 cm	农用地 ^{a)}	SPH ^{d)}	1. 20	20. 50	5. 91	16. 1	1. 99	0. 829 9
	苹果地 ^{b)}	SPH ^{d)}	0. 48	5. 29	9. 07	10. 0	1. 81	0. 322 1
	苜蓿地 ^{c)}	SPH ^{d)}	0. 21	2. 09	10. 05	9. 97	1. 76	0. 595 7
60~ 80 cm	农用地 ^{a)}	SPH ^{d)}	0. 35	14. 85	2. 36	7. 91	1. 91	0. 326 6
	苹果地 ^{b)}	SPH ^{d)}	0. 34	4. 05	8. 40	12. 1	1. 80	0. 369 8
	苜蓿地 ^{c)}	SPH ^{d)}	0. 65	4. 00	16. 25	5. 54	1. 78	0. 305 6
280~ 300 cm	农用地 ^{a)}	SPH ^{d)}	0. 34	4. 81	7. 07	9. 86	1. 88	0. 471 3
	苹果地 ^{b)}	SPH ^{d)}	0. 11	1. 79	6. 15	6. 13	1. 82	0. 503 4
	苜蓿地 ^{c)}	SPH ^{d)}	0. 19	1. 28	14. 84	5. 52	1. 76	0. 319 9

a) Farmland; b) Apple land; c) Clover land; d) Spherical model

2.3 土壤水分空间变异性的构成

一些学者认为土壤物理性质的空间变异性主要由随机部分和自相关部分组成的^[16]。块金值表示随机部分的空间变异性,拱高(基台值与块金值之差)则表示自相关部分的空间变异性。块金值与基台值之比($c_0 / (c_0 + c)$)反映随机部分的空间变异性占总空间变异性的程度。拱高与基台值之比($c / (c_0 + c)$)反映自相关部分的空间变异性占总空间变异性的程度。从表2可以看出,农用地、苹果地和苜蓿地均具有较高的块金值常数,其随机部分的空间变异性在0~20 cm、60~80 cm和280~300 cm土层中以农用地最小,分别为5.91%、2.36%和7.07%;最大的为苜蓿地,分别为10.05%、16.25%和14.84%,这主要由因子本身和测定误差决定。上述随机部分的空间变异性占总空间变异性的比例均较小($< 20\%$),这说明3种土地利用类型中不存在更小尺度(如棵间尺度)的土壤水分空间格局,也即小尺度上的土壤过程可以忽视。自相关部分的空间变

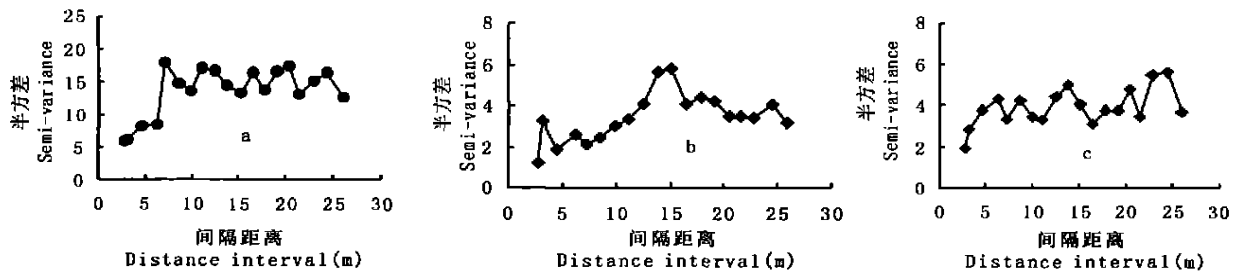
异性在0~20 cm土层中变化在90.0%~94.0%间,农地最大,苜蓿地最小;在60~80 cm土层中为84.0%~98.0%,也是农地最大,苜蓿地最小;在280~300 cm土层中为85.0%~94.0%,以苹果地最大,苜蓿地最小,由土地利用类型的空间结构特点所决定。随着土层深度的增加,3种土地利用类型的土壤水分的自相关部分的空间变异性逐渐增强,不管是在0~20 cm还是在60~80 cm和280~300 cm土层中,自相关部分的空间变异性在总的空间变异性中占主要部分,这一点也可从较高的分维数(D)的大小得到验证(表2)。同时分维数值的大小也可以表示土壤特性值在空间上的不均一程度, D 值越大,表示样本之间土壤水分的变化有一定的随机性,即均一性程度越好,采样间距可大些; D 值越小,表示样本之间土壤水分的差异性越大,即均一程度较差。表2结果显示,苹果地和苜蓿地土壤含水量的取样间距应适当小于农用地的取样间距。



(a) 农田 farmland; (b) 苹果地 Apple land; (c) 苜蓿地 Clover land

图 1 不同土地利用类型 0~20 cm 土层土壤水分变异函数

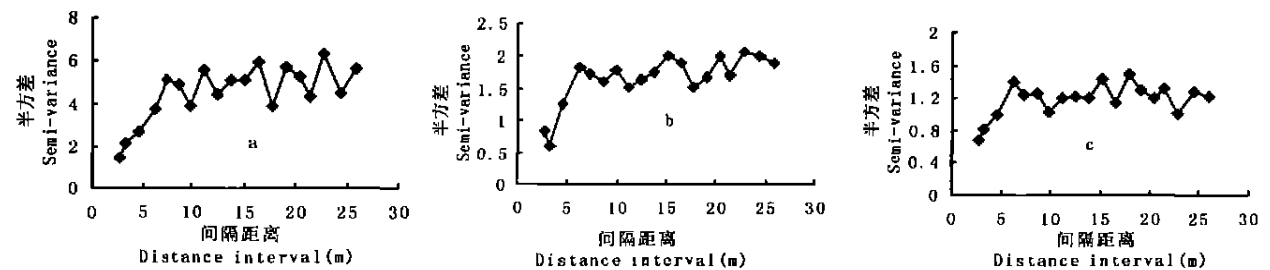
Fig. 1 Semivariograms of soil moisture in 0~20 cm depth of different land use types



(a) 农田 farmland; (b) 苹果地 Apple land; (c) 苜蓿地 Clover land

图 2 不同土地利用类型 60~80 cm 土层土壤水分变异函数

Fig. 2 Semivariograms of soil moisture in 60~80 cm depth of different land use types



(a) 农田 farmland; (b) 苹果地 Apple land; (c) 苜蓿地 Clover land

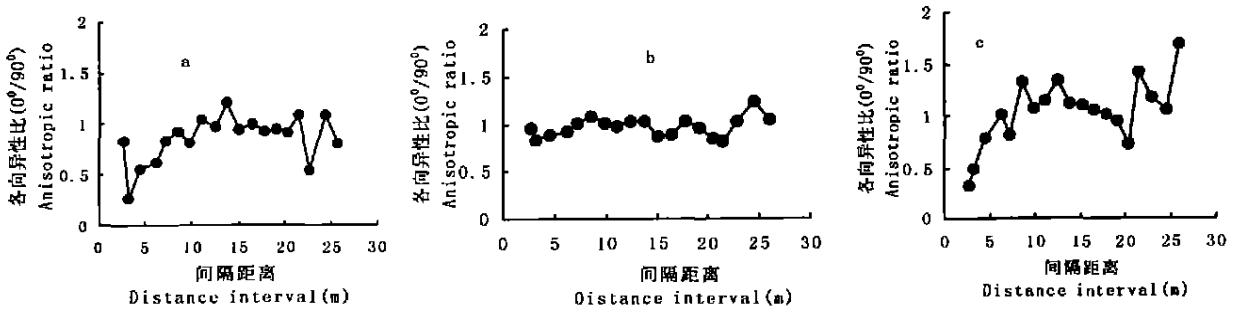
图 3 不同土地利用类型 280~300 cm 土层土壤水分变异函数

Fig. 3 Semivariograms of soil moisture in 280~300 cm depth of different land use types

2.4 土壤水分的各向异性

一般情况下土壤性质的空间变异具有方向性^[17], 土壤水分的变异也不例外。也就是说在不同方向上, 由于微地形、土壤物理性质(如容重、毛管持水量等)、土地利用类型、作物种植密度和树龄以及根系深浅等因子的作用, 导致不同方向上土壤水分表现出不同的变异规律。如果变异函数在两个方向上的变化相似, 变异函数的各向异性比值则在 1 附近波动。通过对 3 种土地利用类型 3 个不同层次变异函数各向异性比值之比较, 发现土壤表层的变异

最明显。图 4 是 3 种土地利用类型 0~20 cm 土层土壤水分 $E0^\circ$ 和 $N90^\circ$ 两个方向变异函数的比值。由图 4 可以看出, 农用地和苜蓿地的土壤水分具有明显的各向异性特点。农用地在 9 m 范围内, $N90^\circ$ 方向上的变异明显 $> E0^\circ$ 方向上的变异; 在 9~30 m 间, 各向异性比在整个尺度上波动, 但总体上 $N90^\circ$ 方向变异 $> E0^\circ$ 方向。苜蓿地土壤水分在 5 m 之内, $N90^\circ$ 方向变异大于 $E0^\circ$ 方向变异, 在 5~30 m 之间各向异性比亦呈上下波动, 但总体上 $E0^\circ$ 方向变异大于 $N90^\circ$ 方向。对苹果地土壤水分变异来说, 可以



(a) 农地 Farmland; (b) 苹果地 Apple land; (c) 苜蓿地 Clover land

图4 不同土地利用类型变异函数在 $E0^\circ$ 和 $N90^\circ$ 方向上的各向异性比

Fig. 4 Anisotropic ratio of semivariograms in $E0^\circ$ and $N90^\circ$ directions under different land use types

认为是接近各向同性的。

3 结论

1. 渭北旱塬苹果基地土壤水分状况从农地、苜蓿地到苹果地依次变差。3 种土地利用类型均具有高度的空间变异性。变异函数分析的结果表明在一定的空间范围内土壤水分具有明显的空间自相关特性。其空间变异性在 0~20 cm 土层中为 9~16 m 左右,在 60~80 cm 中为 5~12 m 左右,在 280~300 cm 土层中为 5~10 m 左右。上层的变异明显大于下层。3 种土地利用类型的变异尺度是农地(60~80 cm 土层除外) > 苹果地 > 苜蓿地。

2. 土壤水分的空间结构变异以空间自相关部分为主, 占总空间变异的 90.0%~94.0% (0~20 cm)、84.0%~98.0% (60~80 cm) 和 85.0%~94.0% (280~300 cm), 3 个层次平均以农地占的比例最大, 苜蓿地最小, 苹果地居中。而 3 种土地利用类型随机部分的空间变异性相对较小。这表明渭北旱塬 3 种土地利用类型土壤水分在空间分布上具有明显的结构特征。这种空间结构特征主要受土地利用类型的空间结构特点的影响。在微地形和气候条件一致的条件下, 具有明显差异的土壤容重、毛管持水量和蒸腾耗水特性是导致 3 种土地利用类型土壤水分具有空间变异的主要原因^[18-20]。

3. 变异函数的各向异性表明, 农地和苜蓿地土壤水分含量在土壤表层(0~20 cm) 具有明显的各向异性, 而苹果地接近各向同性。

总之, 土壤水分空间变异性是一种复杂的特征。借助地统计方法及其变异函数定量研究不同土地利用类型土壤水分的空间变异性问题, 可以深入了解这种空间变异性在研究区域上的结构特点, 对渭北

旱塬区农业生产、种植布局 and 合理利用土地具有参考意义。

参考文献 (References):

- [1] A. W. Western, B. G. Rodger. The tarrawarra data set: soil moisture patterns, soil characteristics and hydrological flux measurements. *Water Resources Research*, 1998, 34(10): 2765~2768.
- [2] Yang Wenzhi, Yu Cunzu. Region control and evaluation of loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 1992, 190~297. [杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1992, 190~297.]
- [3] Liu Xianzhao, Kang Shaozhong. A model of water exchange for hillslope with hysteresis considered in loess area [J]. *Acta Pedologica*, 2000, 1: 16~23. [刘贤赵, 康绍忠. 黄土区考虑滞后作用的坡地水量转化模型 [J]. *土壤学报*, 2000, 1: 16~23.]
- [4] Yang Wenzhi, Shao Ming'an. Research on soil water in loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 2000, 18~49. [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, 18~49.]
- [5] Zhuang Jiping. Research on soil water last 40 years in China [J]. *Acta Pedologica*, 1989, 3: 241~248. [庄季屏. 四十年来中国的土壤水分研究 [J]. *土壤学报*, 1989, 3: 241~248.]
- [6] Liu Xianzhao, Huang Mingbin. Status of soil water environment in apple orchards located in the area of loess plateau [J]. *Journal of Fruit Science*, 2002, 2: 75~78. [刘贤赵, 黄明斌. 渭北旱塬苹果园土壤水分环境效应 [J]. *果树学报*, 2002, 2: 75~78.]
- [7] Wu Qingxiao, Yang Wenzhi. Vegetation construction and continuous development in loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 1998, 42~68. [吴钦孝, 杨文治. 黄土高原植被建设与持续发展. 北京: 科学出版社, 1998, 42~68.]
- [8] Li Yushan. The Characters of soil water cycle and its effects on the land water cycle in loess area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1983, 2: 91~101. [李玉山. 黄土区土壤水资源循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*, 1983, 2: 91~101.]
- [9] Han Shifeng, Li Yushan, Zhang Xiaozhong. Region dynamic characters of soil water in loess plateau [J]. *Memoir of NISWC Academia and Ministry of Water Resources*, 1989, 10: 161~167. [韩仕峰,

- 李玉山, 张孝中. 黄土高原区域土壤水分动态特征[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1989, 10: 161~ 167.]
- [10] Yang Wenzhi, Shao Ming'an, Peng Xinde. The relationship between environmental drought and soil water in loess plateau [J]. Science in China(Series D), 1998, 4: 357~ 365. [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), 1998, 4: 357~ 365.]
- [11] MuXingmin. An exploratory research on the geo-zonal and unzonal distributions of soil water in loess region, China [J]. Acta Pedologica, 1999, 2: 237~ 244. [穆兴民. 试论黄土区旱地土壤水资源的地带性与非地带性. 土壤学报, 1999, 2: 237~ 244.]
- [12] He Fuhong, Huang Mingbin, Dang Tinghui. Soil water distribution characteristics in Wangdonggou watershed in gully region of loess plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 4: 6~ 9. [何福红, 黄明斌, 党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分分布特征[J]. 水土保持通报, 2002, 4: 6~ 9.]
- [13] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advance in Soil Science, 1985, 3: 1~ 70
- [14] Robertson GP, Crum JR, Ellis BG. The spatial variability of soil resource following long term disturbance. Oecologia, 1993, 96: 451~ 456
- [15] Li Yushan. Fluctuation of yield on high-yield field and desiccation of the soil on dryland [J]. Acta Pedologica, 2001, 3: 353~ 356. [李玉山. 旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J]. 土壤学报, 2001, 3: 353~ 356.]
- [16] Li H., Reynolds J.F. On definition and quantification of heterogeneity. Oikos, 1995, 73: 280~ 284.
- [17] Robertson GP. Geostatistics in ecology: interpolating with known variance. Ecology, 1987, 68: 744~ 748.
- [18] Gong Yuan shi, Liao chaozi, Li Baoguo. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density [J]. Acta Pedologica, 1998, 1: 10~ 15. [龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征[J]. 土壤学报, 1998, 1: 10~ 15.]
- [19] Wang Zhengquan, Wang Qingcheng. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 6: 945~ 950. [王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间变异性研究[J]. 生态学报, 2000, 6: 945~ 950.]
- [20] Liu Xianzhao, Kang Shaozhong. Influence of ponded infiltration under different land use style at small watershed [J]. Acta Agricultural Boreali-occidentalis Sinica, 1999, 6: 27~ 31. [刘贤赵, 康绍忠. 小流域不同土地利用方式对积水入渗的影响[J]. 西北农业学报, 1999, 6: 27~ 31.]

The Spatial Heterogeneity of Soil Moisture in Weibei Dry Highland

LIU Xianzhao^{1,2}, YI HuaPeng¹

(1. College of Geography and Resource Management, Yantai Normal University, Yantai 264025;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science, Yangling 712100)

Abstract: Soil moisture is an important variable that significantly affects the hydrological environment of a region. Weibei Upland in southern part of Loess Plateau is a commercial apple base where the increase of apple planting area has seriously affected the regional water cycle. It is necessary to better understand the effects of different land use patterns on the spatial distribution of soil water contents in order to account for the balances of water and energy at Weibai dry highland. In this paper, the spatial heterogeneity in soil moisture at three soil depths (0~ 20 cm, 60~ 80 cm, and 280~ 300 cm) of different land use types (farmland, apple land, and clover land) is studied with semi-variogram at three 30 m × 30 m plots at Weibai dry highland in Loess Plateau. Grid sampling method (4 m × 4 m) is adopted and there are 56 sampling points in each land use types. Spherical model was used to fit the form of semi-variogram. The typical results showed that there are high degrees of spatial heterogeneity in farmland, apple land and clover land. In 0~ 20 cm layer, the scale of spatial heterogeneity is 9~ 16m, 5~ 12 m in 60~ 80 cm layer, and that is 5~ 10m in 280~ 300 cm layer. The degrees of spatial heterogeneity change with this scale. The distance of spatial autocorrelation in soil moisture is found within distances from 1~ 17 m. The spatial heterogeneity of autocorrelation in total spatial heterogeneity are 89.0% ~ 95.0% (0~ 20 cm), 83.0% ~ 98.0% (60~ 80 cm) and 85.0% ~ 94.0% (280~ 300 cm) respectively, which are obviously more than that of random proportion. The scale of spatial autocorrelation increased gradually from clover land, apple land to farmland. There exist a stronger anisotropic structure in E0° and N90° directions in both farmland and clover land (0~ 20 cm), but apple land in the same direction are close to isotropy.

Key words: Weibai dry highland; geo-statistics; soil moisture; spatial heterogeneity