

黄土高原丘陵沟壑小流域土壤水分垂直分布 变异特征及影响因子*

白天路¹ 杨勤科¹ 申 佳²

(¹ 西北大学城市与资源学系, 西安 710069; ² 河南省安阳市国土资源调查规划与测绘院, 河南安阳 455000)

摘 要 以地统计学的半变异函数为分析工具, 分析了黄土高原丘陵沟壑区小流域土壤水分在垂直方向的空间变异特征以及土地利用类型和地形等因子对其的影响。结果表明: 1) 球状模型可以很好地拟合土壤水分在垂直方向的半变异函数曲线, 其存在强烈或中等程度的空间自相关, 变程范围从 2~5 m 不等; 2) 果园对土壤水分含量的影响主要表现在 1~2 m 深度, 5 月份含量最高, 且分布均匀, 8 月份由于气温和叶面蒸腾作用, 水分含量最低。坡耕地和梯田的水分含量都较高, 垂直变化不明显, 梯田的土壤水分含量最低月份是 9 月, 比坡耕地晚 1 个月, 这是因为所种作物的主要生长季节为 9 月份, 这期间消耗水分较多而造成的。林地由于根系发达, 对土壤水分垂直方向的变化影响比较大, 变化为先增大、再减小、最后再增大且分布趋于平缓。灌木林的土壤水分含量整体较低, 主要变化深度范围集中在 0~2 m, 草地的土壤水分含量较高, 垂直变化的深度范围集中在 1 m 以内; 3) 坡度、坡向地形因子和土壤水分的垂直方向变异特征没有呈现明显的相关性。

关键词 土壤水分; 半变异函数; 空间自相关

中图分类号 S152.7 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)12-2508-07

Spatial variability of soil moisture vertical distribution and related affecting factors in hilly and gully watershed region of Loess Plateau. BAI Tian-lu¹, YANG Qinke¹, SHEN Jia²

(¹ Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an 710069, China;

² Institute of the Land Bureau of Surveying and Mapping, Anyang 455000, Henan, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(12) 2508-2514.

Abstract: Taking the semivariogram in geostatistics as a main analytical tool, this paper studied the spatial variability of soil moisture vertical distribution, and its relations to the land use type and topography in hilly and gully watershed region of Loess Plateau. The semivariogram curve of soil moisture vertical distribution could be well fitted by spherical model, suggesting that there was a strong or moderate spatial autocorrelation. The variation range was 2-5 meters. Orchard mainly affected the soil moisture content at the depth of 1-2 meters. In May, the soil moisture content was maximal and showed a uniform distribution; while in August, the soil moisture content was minimal because of the high air temperature and strong leaf transpiration. In sloping farmland and terrace, soil moisture content was relatively high, and had less vertical change. Terrace had the minimal soil moisture content in September, one month later than sloping farmland. Due to the developed tree root system, woodland had greater effects on the variability of soil moisture vertical distribution, which was manifested in a trend of increase-decrease-increase-getting stable. Overall speaking, shrub land had lower soil moisture content, whose vertical variation mainly occurred at the depth of 0-2 meters, while grassland had higher soil moisture content, whose vertical variation mainly occurred at the depth of 1 meter or less. The spatial variability of soil moisture vertical distribution had no correlation with topographical factors slope and aspect.

Key words: soil moisture; semivariogram; spatial autocorrelation.

* 国家自然科学基金资助项目(40971173)。

** 通讯作者 E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

收稿日期: 2009-04-13 接受日期: 2009-08-20

土壤水分作为土壤的重要组成物质,同时也是影响土壤生产力的基本因素之一(傅伯杰,2001),尤其在黄土丘陵干旱半干旱地区,土壤水分是生态农业建设的重要基础物质,也是决定该区生态系统结构和功能的关键因子(张超,2004)。土壤水分在空间上的分布受到地形的海拔、坡度、坡向等环境因子(刘梅,1990;傅伯杰,2001)和土地利用类型(王军,2000;黄奕龙,2005;汪齐瑞,2008)的影响。目前许多研究都证明了土壤水分存在水平方向的空间自相关(王军,2000;胡良军,2004;毕华兴,2006),对垂直方向上土壤水分的空间变异特征也有一些研究,大都是根据土壤的物理性质(孔祥旋,2000)、土地利用类型(陈海滨,2003;刘春利,2006)、降雨量(张超,2004)等因子对土壤划分为不同的层次(崔灵周,2001),采用的方法也多为经典统计法(王云强,2006;牛海,2008)或小波变换(蒋太明,2005)。还有一些研究是利用地统计学方法,但研究方向也主要为不同的土地利用方式(张继光,2008)或土壤质地(李红,2003)。相比较而言,利用地统计学方法根据不同地形因子对土壤水分的垂直分布的研究并不多见。已有研究表明,地形因子对土壤水分的分布是有一定影响的,吕贻忠等(2002)研究认为,地形和表层土壤水分具有明显的空间自相关性;王玉宽等(2004)认为丘陵小流域土壤水分分异明显,主要是受地形和微地貌控制;何福红等(2002)对黄土高原沟壑区土壤水分研究后认为,同一地理位置会受到坡度、坡向等地形因子的影响,存在空间变异特征。土壤水分在垂直方向的变异性是多方面因素综合作用的结果,对于不同地形的土壤水分垂直方向上空间变异性的研究可以丰富土壤水分时空变异特征及其定量研究内容,深化不同地形因子及其空间格局对土壤水分的影响,具有重要的意义(张丽丽,2007)。

本文以地统计学方法的半变异函数为分析工具,结合GIS技术,对黄土高原典型小流域县南沟土壤水分垂直分布的变异特征和变程范围作了研究,用球状模型对半方差函数曲线图进行了拟合度,并分析了6种不同土地利用类型及坡度、坡向地形因子对土壤水分在垂直方向的空间变异性的影响。

1 研究地区特征

研究区域位于陕北安塞县南沟,土地总面积约为44.85 km²,处于黄土丘陵沟壑区的中心地带,

在气候上处于暖温带半湿润向半干旱过渡区,冬季干旱,夏秋多雨。太阳辐射较强,光照充足,历年平均气温8.8℃,年均降雨量505.3 mm,年际变化大,分布不均,多集中在7—9月,占全年降雨总量的63%,耕作土壤为黄绵土为主,长期以来掠夺式的垦殖制度,滥砍滥伐,导致自然林草植被急剧减少,土面蒸发强烈,是典型受人类活动影响的水土流失严重区。

2 研究方法

2.1 取样方法

根据研究区域不同的土地利用类型和地形状况,在流域内共选取91个典型采样点,每个样点均利用手持GPS进行定位,并记录每个采样点的土地利用类型和坡度、坡向地形因子,土壤水分含量的测定方法为土钻取样,间隔为20 cm,测定深度为5 m,共分25层,利用烘干法(105℃)测定土壤水分。取样时间为2008年5—10月,每月对采样点测定一次土壤水分。

2.2 统计方法

地统计学以协方差和半变异函数为主要工具(徐建华,2004),考虑地理数据的空间自相关(张朝生,1998),克服了经典统计学在描述地学变量时的不足(张朝生,1997),主要研究分布于空间并同时具有结构性和随机性的自然现象。地统计学在许多文献(Western,1998;Pontius,2001;郭怀成,2008)中都有详细说明,这里不再赘述。

综合研究区域的土地利用类型可划分为果园、坡耕地、林地、灌木、梯田和草地6类,根据土地利用不同类型各选取不同研究样点,对其6个月的土壤水分连续采样数据取平均值,并求半变异函数,并进行理论模型的拟合计算。选取土地利用为坡耕地,坡向同为半阳坡,坡度为3°、20°和33°三个采样区6个月的水分取样作为研究数据,计算半变异函数,分析坡度对土壤水分垂直分布的影响。选取土地利用类型为坡耕地,坡度为20°—25°,不同坡向的3个区域6个月的土壤水分统计数据,计算半变异函数,分析坡向对土壤水分垂直分布的影响。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型土壤水分数据分析

由表1可知,几乎所有采样点的土壤水分含量在0.2 m或0.4 m处都有一个跳跃式变化,这是因

表 1 不同土地利用类型 6 个月土壤水分数据(%)
Tab. 1 Soil water contents of different land use types in six months

植被类型	观测月份	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	...	460 ~ 480 cm	480 ~ 500 cm
果园	5	12. 69	15. 06	...	9. 07	9. 19
	6	9. 98	6. 95	...	11. 41	12. 14
	7	7. 01	6. 62	...	9. 41	8. 92
	8	4. 77	5. 49	...	8. 94	9. 24
	9	8. 3	6. 24	...	7. 98	10. 24
	10	9. 92	10. 51	...	10. 06	10. 57
坡耕地	5	4. 94	11. 85	...	11. 07	10. 79
	6	15. 03	15. 02	...	13	11. 91
	7	13. 12	14. 93	...	11. 41	11. 58
	8	15. 47	11. 43	...	10. 78	11. 75
	9	11. 88	13. 2	...	12. 03	11. 64
	10	12. 64	14. 63	...	11. 54	12. 06
灌木	5	5. 52	8. 09	...	7. 64	7. 7
	6	18. 01	16. 2	...	8. 72	8. 59
	7	12. 33	7. 47	...	7. 95	7. 82
	8	12. 46	7. 2	...	7. 67	6. 81
	9	7. 57	7. 73	...	7. 48	7. 08
	10	11. 18	13. 14	...	6. 71	7. 19
梯田	5	10. 6	14. 37	...	13. 49	13. 56
	6	16. 18	16. 73	...	12. 77	11. 91
	7	12. 19	14. 88	...	12. 69	12. 48
	8	12	11. 09	...	13. 21	12. 67
	9	15. 31	13. 77	...	13. 89	14. 88
	10	15. 09	16. 93	...	13. 01	12. 85
林地	5	5. 64	8. 22	...	10. 4	9. 94
	6	14. 64	15. 09	...	8. 28	10. 03
	7	12. 45	6. 77	...	8. 93	9. 92
	8	6. 92	9. 18	...	7. 87	8. 73
	9	10. 2	5. 01	...	7. 57	9. 91
	10	15. 03	14. 89	...	8. 88	9. 61
草地	5	8. 09	14. 72	...	16. 4	17. 11
	6	16. 94	16. 09	...	16. 38	16. 25
	7	10. 06	16. 12	...	15. 32	14. 88
	8	10. 01	11. 79	...	15. 02	16. 26
	9	14. 7	16. 22	...	14. 39	15. 72
	10	16. 86	19. 34	...	14. 93	15. 79

为表层土壤水分更容易受到气温、降雨、地形以及其他因素的影响,所以变化比较大,更深层的土壤水分含量变化则相对平缓。

果园对土层水分含量垂直变化的影响主要集中在 1 ~ 2 m,其中 5 月各土层分布比较集中,在 9% ~ 14%,土壤水分含量在 11% ~ 13% 所占的比例达到了 80%,这是因为 5 月气温不高,降雨也不多,土壤水分受到外界影响较小,所以分布较均匀。到 6、7 和 8 月,随着气温升高,水分蒸发和果树叶面蒸腾加剧,土壤水分含量逐渐降低,在 8 月达到最低点。到 9、10 月份,气温开始降低,土壤水分含量也有所

增大。

坡耕地的土壤水分含量比较高,在 11% ~ 14% 所占的比例达到了 80%,垂直变化不明显,基本特征是先增加后减少,最高值都分布在 2 ~ 3 m 处。在时间上分布特征是先减少,后增加,8 月的水分含量最低。

林地的土壤水分含量比较低,大部分都 < 9%,垂直变化明显,大致分 2 个层次,一是随土层深度增加,土壤水分含量呈现增加趋势,到达 1. 4 m 左右深度后,又呈现减小趋势,且分布趋于稳定状态。林地的根系发达,一般在 1 m 以下,因此,林地的土壤水分含量的最大值在 1. 2 ~ 1. 4 m,这正是林地对水分作用的临界区,在其之上,水分含量逐渐增大,在其之下,水分含量逐渐减少,且到达一定深度,超过林地根系作用力之外,水分含量又呈现增大态势。表层土壤水分因日照蒸发和深层土壤水分随林地叶面蒸腾,使得在 8 月份各土层水分含量不仅达到了最低值,而且各土层水分含量相差不大。

灌木的土壤水分含量整体比较低,主要在 6% ~ 10%,水分含量变化也主要分布在 0 ~ 2 m 深度的土层,时间变化上也是从 5—8 月逐渐减低,8 月土壤水分含量到达以最低点,然后又慢慢回升。

梯田的土壤水分含量和坡耕地相似,含量高且分布相对均匀,在 14% ~ 16% 所占的比例达到了 70% 以上。梯田的土壤水分含量在 9 月达到最小值,这可能是因为所种作物在 9 月份是主要生长季节,消耗水分比其他月份较多,10 月份又慢慢回升。土壤水分的垂直变化深度集中在 1 ~ 2 m 处,2 ~ 5 m 的变化并不明显。

草地的水分含量也比较高,主要集中在 12% ~ 15%,所占比例近达 80%,且垂直变化的深度范围主要表现在 1 m 以内,8 月份土壤水分含量达到最低值。

3. 2 不同土地利用类型对土壤水分垂直分布的影响

从图 1 可以看出,在 1 ~ 3 m,大部分的半方差函数曲线比较平滑且值较小,表示在这个步长范围内,土壤水分的分布具有的明显空间自相关性,且随着步长增加,相关性逐渐减小。其中林地比其植被的半方差函数值都大,表示林地水分受到植被的影响最大;其次是草地,在 0 ~ 1 m 处有大的波动,说明这个范围内土壤水分受草地影响较大,然后在 1 ~ 3 m 曲线趋于平缓,底层的水分受外界干扰减弱,

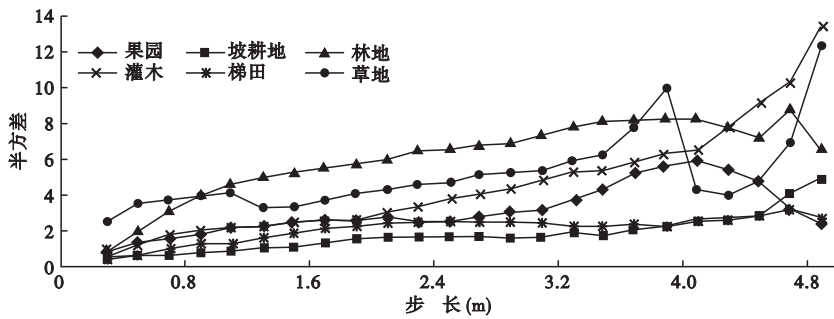


图1 不同土地利用类型土壤水分的半方差函数图
Fig.1 Semivariogram of soil moisture of different land use types

呈现明显自相关性 ;果园、坡耕地、灌木和梯田的土壤水分在 1 ~ 3 m 曲线平缓 ,变化不大。半方差曲线图证实了土壤水分在垂直方向存在不同的空间变异特征 ,总体上随着步长的增加而变大 ,4 m 以后波动较大 ,与表层水分不再具有明显的相关性。

本文对半方差函数曲线拟合采用的是球状模型。从图 1 可以看出 ,土壤深度为 4 ~ 5 m 范围内 ρ 种不同土地利用方式的土壤水分都有大的波动 ,呈突变状态 ,表明这个范围已经超出了半方差函数的变程 ,表层水分和底层水分已经丧失了相关性 ,所以在对变异曲线进行模型拟合时就不能再采用这些数据。对于具体取值范围 ,应参照图 1 在曲线变化平滑的区间内选择数据。

表 2 是不同土地利用类型的土壤水分变异函数理论模型得出的相应参数 ,决定系数都在 0.8 以上 ,证明球状模型对实际变异函数有很好的拟合度 , F 检验为非常显著水平 ,说明理论模型可以反映实际土壤水分的空间结构性。坡耕地和梯田的含水量较高 ,且分布比较均匀 ,计算的块金值比较小 ,变程相对大一些 ,原因是坡耕地和梯田无论是土壤质地还是地形条件 ,相对其他土地利用类型来说持水性能比较好 ,因此这两种作物区域的土壤水分的空间结构性比较强 ,垂直方向空间自相关的距离也比其他

植被的距离大。另外 ,从计算结果来说 ,坡耕地和梯田的块金值和基台值都比较小 ,且变程比较大 ,显示土壤水分受到农作物的影响比较小 ,所以显示了较强的空间结构 ,表层水分和深层水分仍具有一定的自相关性。林地对土壤水分的垂直分布影响最大 ,在 0.2 ~ 1.5 m 的步长范围内 ,水分的空间自相关性急剧下降 ,虽然在 1.5 ~ 4 m 的步长内半变异函数没有大的波动 ,曲线平缓 ,但空间自相关性已经大大降低。这是因为林地表面覆盖有树叶等落物 ,保持水分能力大 ,所以表面土壤水分含量通常较高 ,在整体上分布形成突变 ,影响垂直方向上的空间自相关性。在 1.4 m 以下 ,由于林地根系对土壤水分的吸收作用 ,水分含量又较低 ,到了林地根系作用不到的深度 ,水分含量又会增加且变得平缓 ,这都增强了林地土壤水分含量的异质性 ,草地的半变异函数变化最为突出 ,在 0.2 ~ 1.2 m 步长范围 ,半变异函数逐步增大 ,但在 1.4 处又突然减小 ,然后变得平缓 ,显示出强的自相关性。这是因为草地在土地表层 1 m 的范围内对土壤水分的空间结构有较大的影响 ,随着土层深度加大 ,草地的作用性较小 ,土壤水分又显示出空间结构性 ,本文对草地 0 ~ 0.8 m 的土壤水分随机性变化大的数据没有采用 ,选择 1.2 ~ 3.8 m 步长的变异函数数据构建球状模型 ,显示了较好的拟合效果。

表 2 土壤水分半变异函数理论模型的相关参数

Tab.2 Best-fitted semivariogram models of soil moisture corresponding parameters

土地利用类型	理论模型	块金值	基台值	块金值与基台值之比(%)	变程(m)	决定系数	F 值
果园	球状模型	0.97	2.95	32.88	2.74	0.91	58.39
坡耕地	球状模型	0.45	2.55	17.65	5.94	0.92	104.04
林地	球状模型	1.41	8.21	17.17	3.91	0.96	226.22
灌木	球状模型	0.58	2.88	20.14	2.02	0.94	50.50
梯田	球状模型	0.64	2.70	23.19	4.05	0.85	61.45
草地	球状模型	1.45	6.08	23.85	4.52	0.99	375.68

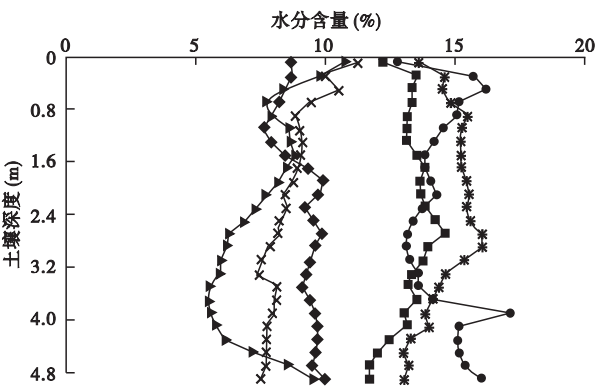


图 2 不同土地利用类型土壤水分含量
Fig.2 Soil moisture content of different land use types

从表 2 可知,不同土地利用类型对土壤水分含量变化影响程度,分别是林地和果园比较大,其次是灌木和草地,坡耕地和梯田的影响最小。变化的主要深度范围都集中在 1 m 以上,从土壤水分随深度的分布图 2 也可以看出,在 0~1 m 深度,林地的土壤水分变化最大,其次是草地、灌木和果园,梯田和坡耕地的水分变化最小,和半方差图的匹配度的比较好,可以充分说明各种植被对土壤水分含量在垂直方向的影响。

3.3 不同坡度对土壤水分在垂直分布的影响

3 个采样区的植被类型和坡向相同,都为坡耕地和半阳坡,坡度分别为 3°、13°、25°和 33°,通过对 6 个月的土壤水分的统计数据进行分析,计算得到半变异函数曲线图(图 3a)和土壤水分分布图(图 4a)。从图 4a 可知,在 0~2.4 m 深度范围内,3°区域的水分变化最大,半方差函数在这个步长内也比其他坡度的大,其次是 33°区域和 13°区域,25°区域的土壤水分含量变化最小,基本上是一平缓下降的状态,所以其半方差函数也比较小。土壤深度达 3 m 以后,3°区域的土壤水分和表层的土壤水分已经看不到相关性,几乎完全是随机的,13°区域的土壤水分仍然具有一定的空间结构,在土壤水分分布图也可以看出这个坡度的水分是平缓分布。由此可知,半方差函数图可以反映土壤水分含量的自相关性大小,但对于不同坡度对水分含量的相关性的影响却并不能很好的反应,也就是说坡度和土壤水分在垂直方向分布的相关性并不明显,这也和 Ladson 和 Moore (1992)的研究一致。其中 33°区域的土壤水分比 13°区域的土壤水分含量大,可能是因为土壤种类不一样,导致含水量不同。土壤水分的含量一个土壤、植被类型、地形等多因子共同作用的结果。

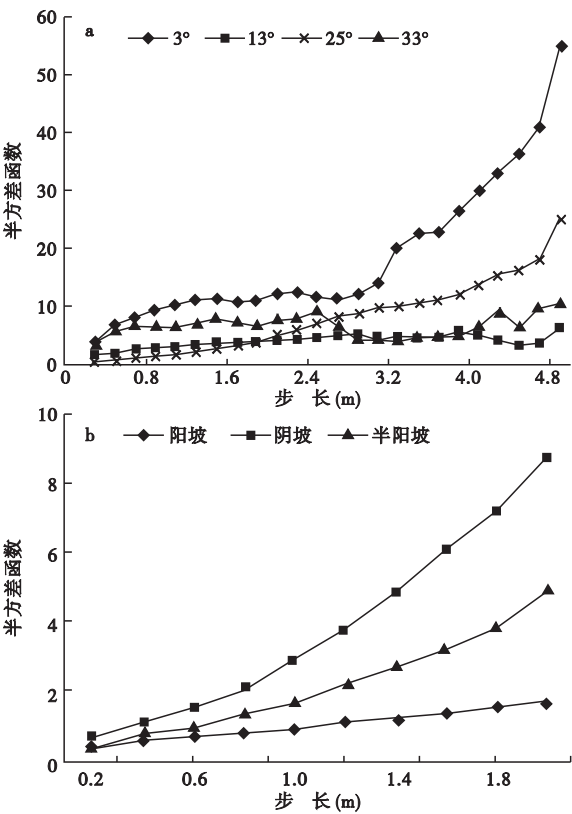


图 3 不同地形因子的土壤水分半方差图
Fig.3 Semivariogram of soil moisture based on different terrain factors

果(邱扬 2007)。

3.4 不同坡向对土壤水分在垂直分布的影响

由于坡向对土壤水分的显著影响只是在发生土壤表面(黄奕龙 2005),对于深层土壤的水分作用并不大,考虑到坡耕地在土层表面对水分分布的影响较小,选取了土地利用类型为坡耕地的阳坡、阴坡和半阳坡 3 个区域,土壤深度为 2 m 的 6 个月水分统计数据,得到其半方差函数图(图 3b)以及土壤水分分布图(图 4b)。在步长较短时(<0.4 m),3 个不同坡向区域的半方差函数相差不大,但随着深度的增加,半方差函数呈现明显的差异,阴坡的增长比较快,而阳坡的相对稳定,变化缓慢,半阳坡的居于中间变化状态,表明 3 个区域相邻的土壤水分变化不大,但随着比较的深度加大,阴坡的土壤水分含量变化最大,阳坡的最小。从土壤含水量变化的角度看,由于日照等的原因,土壤水分在阳坡的变动比阴坡的要大。0.2~0.6 m 深度,阴坡的土壤水分增幅最小,表示这个区域的表层土壤水分受到坡位的影响最小,但由于土壤性质等原因,阳坡的含水量最大,其次是半阳坡,阴坡的含水量最小,且随着土壤

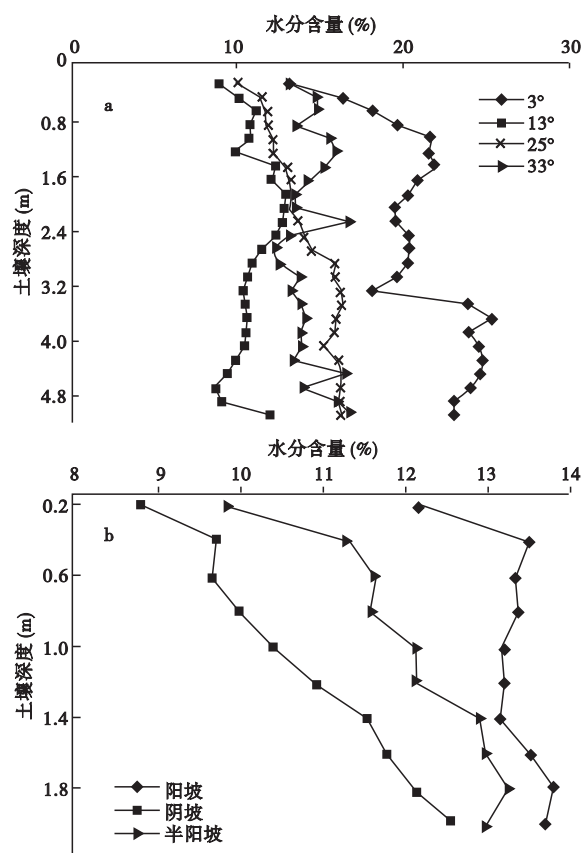


图4 不同地形因子的土壤水分含量示意图
Fig. 4 Soil moisture content of different terrain factors

深度增加,阳坡的含水量波动不大。相反,阴坡的含水量是逐渐增大,表层的水分含量远远小于底层。半阳坡的土壤水分变动幅度在阳坡和阴坡之间。但坡向对土壤水分变异特征的影响,并没有明显的规律性,在更大程度上应取决于土地性质、利用类型等因素。

4 结论与讨论

通过分析不同土地利用类型、坡度和坡向地形因子的土壤水分数据,计算其半方差函数和水分随土壤深度的分布图,可以得到以下结论(1)球状模型对不同地物土壤水分半方差函数可以进行很好的拟合,决定系数都在0.8以上, F 检验值也比较显著,块金值和基台值之比大都在25%以下,说明土壤水分在垂直方向具有相当大的空间自相关性,根据不同的土地利用类型在不同深度呈现不同的变异特征(2)林地和草地的块金值和基台值都比较大,从土壤含水量图中也可以看出这两种地物的水分变化最为剧烈,尤其在0~0.4 m,水分的跳跃性变化表示表层土壤水分受到多方面因素的影响,完全是

随机变化的,随着土壤深度加大,开始出现一定的结构性,水分变化也比较连续,半方差图上也反映这种趋势,0~0.8 m的半方差函数增长比较快,也说明了水分变化呈现大的波动性。主要原因是林地的表层有树叶等覆盖物,持水性能较好,根系对土壤水分作用范围在1 m以下,导致土壤水分形成多级变化状态,空间结构性不强。草地对土壤水分的消耗较少,作用范围也在表层土壤,其中又有气温、风力等外界条件的影响,所以土壤水分含量在表层呈现大的变化。随着土层加深,土壤水分变化平缓。坡耕地和梯田块金值和基台值都比较小且变程较大(>4 m),说明农作物对土壤水分分布的影响比其他的植被要小,这些区域的水分在较深的土壤都具有空间自相关性。这是因为坡耕地和梯田的土壤质地以及地形条件使得这些区域的持水性能较好,所以水分含量较高,且分布均匀,垂直方向上变化平缓。同时,由于所种农作物主要生长季节不同,会导致土壤水分含量在不同的时期达到最低值。(3)对不同坡度、坡向的土壤水分的垂直分布图以及半变异函数分析可知,这些地形因子对土壤的水分含量是有一定影响的,但并不是主要因素,特别是对土壤水分自相关的影响就更小,更多的应该考虑土壤的性质、植被类型以及气候等因素。

土壤水分在垂直方向的变化是土地利用(植被)、气象(降雨)、地形、土壤、人为活动等多因子综合作用的结果,而且在不同的尺度上占主要地位的因子也不同。本研究利用了坡面尺度的土壤水分数据,以上结论对于大尺度的土壤水分能否适用还有待研究。另外,地形湿度指数对土壤水分的变异特征也占有主要地位(邱扬,2007)。

参考文献

- 毕华兴,李笑吟,刘鑫,等. 2006. 晋西黄土区土壤水分空间异质性的地统计学分析. 北京林业大学学报, 28(5): 59-66.
- 陈海滨,孙长忠,安锋,等. 2003. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(I)——土壤水分的垂直变化和季节变化特征. 西北林学院学报, 18(4): 13-16.
- 崔灵周,李占斌,丁文峰. 2001. 四川中部丘陵地区不同种植模式下旱地土壤水分变化规律. 干旱区农业研究, 19(1): 87-92.
- 傅伯杰,杨志坚,王仰麟,等. 2001. 黄土丘陵坡地土壤水分空间分布数学模型. 中国科学(D辑), 31(3): 185-191.
- 何福红,黄明斌,党廷辉. 2002. 黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征. 水土保持通报, 22(4): 6-9.

- 郭怀成,周丰,刀谓. 2008. 地统计方法学研究进展. 地理研究, **27**(5):1191-1202.
- 胡良军,邵明安,杨文治. 2004. 黄土高原土壤水分的空间分异及其与林草布局的关系. 草业学报, **13**(6):14-20.
- 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等. 2005. 黄土丘陵小流域土壤水分空间格局及其影响因素. 自然资源学报, **20**(4):483-492.
- 蒋天明,刘海隆,刘洪斌,等. 2005. 黄壤坡地土壤水分垂直变异特征分析. 农业工程学报, **21**(3):6-11.
- 孔祥旋,孙克刚,杨占平,等. 2000. 黄泛平原粗砂潮土农田土壤水分动态研究. 华北农学报, **15**(3):109-113.
- 李红,周连第,张有山. 2003. 京郊平原区粮田土壤水分垂直变异性的半方差表征. 华北农学报, **18**(1):111-113.
- 刘梅,蒋定生,黄国俊,等. 1990. 不同坡面位置土壤水分差异规律分析. 水土保持通报, **10**(2):16-20.
- 刘春利,邵明安. 2006. 六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究. 中国生态农业学报, **14**(4):54-56.
- 吕贻忠,李保国,胡克林,等. 2002. 鄂尔多斯夏初不同地形土壤水分的空间变异. 中国农业大学学报, **7**(5):38-43.
- 牛海,李和平,赵萌莉,等. 2008. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究. 干旱区资源与环境, **22**(2):157-163.
- 邱扬,傅伯杰,王军,等. 2007. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. 生态学杂志, **26**(1):100-107.
- 王军,傅伯杰. 2000. 黄土丘陵小流域土地利用结构对土壤水分时空分布的影响. 地理学报, **55**(1):84-91.
- 王军,傅伯杰,邱扬,等. 2000. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征——半变异函数. 地理学报, **55**(4):428-438.
- 王齐瑞,谭晓风,高峻. 2008. 太行山山前坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征. 水土保持学报, **22**(4):100-110.
- 王云强,张兴昌,从伟,等. 2006. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究. 农业工程学报, **22**(12):65-71.
- 王玉宽,朱波,高美容. 2004. 小流域土壤水分空间分异特征及时稳性分析. 山地学报, **22**(1):116-120.
- 徐建华. 2004. 现代地理学中的数学方法(第2版). 北京:高等教育出版社.
- 张朝生,章申,何建邦. 1998. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——空间自相关与分形方法. 地理学报, **53**(1):87-96.
- 张朝生,章申,何建邦. 1997. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法. 地理学报, **52**(2):184-192.
- 张超,王会肖. 2004. 黄土高原丘陵沟壑区土壤水分变化规律的研究. 中国生态农业学报, **12**(3):47-50.
- 张继光,苏以荣,陈洪松,等. 2008. 喀斯特典型洼地土壤水分的垂直变异研究. 水土保持通报, **28**(3):5-11.
- 张丽丽. 2007. 土壤水分垂直方向相关性研究和动态预报(硕士学位论文). 武汉:华中农业大学.
- Western AW, Blöschl G, Grayson RB, et al. 1998. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarawarra catchment. *Journal of Hydrology*, **205**:20-37.
- Ladson AR, Moore ID. 1992. Soil water prediction on the Konza Prairie by microwave remote sensing and topographic attributes. *Journal of Hydrology*, **138**:385-407.
- Pontius RG, Cornell JD, Hall CAS. 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: Application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **85**:1-13.

作者简介 白天路,男,1979年生,硕士生。研究方向为GIS的开发和应用。E-mail: baitianlu@126.com
责任编辑 王伟
