陕北黄土区缓台土壤水分空间变异性

马 欢，朱清科，赵维军，刘蕾蕾，姚文俊，王 瑜
（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）

摘 要：陕北黄土区坡面微地形土壤水分的空间变异性分析对近自然植被恢复具有重要意义。对不同规模的缓台微地形土壤水分数据进行了测定和分析。结果表明：(1) 面积大小不同的缓台土壤水分有着明显的差异，总体呈面积越大水分条件越好的趋势。(2) 土壤水分变异系数在 0—60 cm 土层深度呈现：小规模缓台(<100 m^2)>大规模缓台(>1 000 m^2)>中规模缓台(100～1 000 m^2)的规律，并且随着土层的加深，缓台土壤水分变异系数有减小的趋势。(3) 在大规模缓台的内部，土壤水分在纵坡向上的变异系数要高于横坡向。通过对大规模缓台内部 0—60 cm 土壤水分数据做地统计学分析，球状模型被选为最优的半方差理论模型。由克里格插值生成的土壤水分分布图表明，在缓台与其上部陡坎微地形连接处的土壤水分条件要优于缓台其它部位的水分条件。

关键词：黄土高原；微地形；缓台；土壤水分；空间变异性
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2014)02-0192-05 **中图分类号**：S152.7
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.041

Spatial Variability of Soil Moisture of Micro-topography Platform on Loess Slope in North Shaanxi Province

MA Huan, ZHU Qing-ke, ZHAO Wei-jun, LIU Lei-lei, YAO Wen-jun, WANG Yu
(*Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Spatial variability of soil moisture on micro-topography is an important factor influencing the distribution and restoration of vegetation on the Loess Plateau of China. Soil moisture of different size of platforms in loess hilly-gully region was investigated and analyzed. The results showed that: (1) The size of platform had a significant impact on soil moisture content. Overall, the larger platform showed a better soil moisture condition; (2) The variation coefficient of soil moisture in 0—60 cm soil layer of platforms ranked as follows: small size platform(<100 m^2)>large size platform(>1 000 m^2)>medium size platform(100～1 000 m^2); (3) Within the large size platform, the variation coefficient of soil moisture along the up and down slope direction(parallel to slope) was higher than that along the contour. Geo-statistics was used to analyze the spatial heterogeneity of soil moisture(0—60 cm) in large size platform. A spherical model was used to fit the change of semivariance with separated distance. Kringing interpolation showed that within the large size platform, soil moisture on the joint part of platforms and the scarp on upslope was higher than other parts.

Keywords: the Loess Plateau; micro-topography; platform; soil moisture; spatial variability

水分是制约黄土高原地区植被恢复工作的一个重要因素，在有限的降水条件下最大限度的提高土壤中水分的利用效率，是提高植被恢复成功率的一条重要途径。黄土高原坡面在不同形式土壤侵蚀力的作用下，产生了高低不平的微地形，这些微地形对坡面降雨、径流的再分配以及地表蒸发产生影响，使得坡面尺度内仍然存在水分条件的差异。因此在植被恢复重建过程中，为了避免出现人工林成活率低或林分生长不良等问题，开展了不同规模缓台微地形的土壤水分空间变异性分析。

微地形一般指小尺度上的地形变化，黄土坡面的微地形是指在坡面尺度以内由于各种土壤侵蚀作用

收稿日期：2013-05-20 **修回日期**：2013-08-05
资助项目：国家“十二五”科技支撑计划项目“黄土高原及华北石质山地水土保持林体系构建技术研究”(2011BAD38B06)
作者简介：马欢(1988—)，男(汉族)，甘肃省陇南市人，硕士研究生，研究方向为水土保持及生态环境地理学。E-mail:yiyu263@qq.com。
通信作者：朱清科(1956—)，男(汉族)，宁夏自治区固原市人，教授，博士生导师，主要从事水土保持和林业生态工程方面的研究。E-mail:zhuqingke@sohu.com。

形成的与原始坡面存在坡度差异、形状各异、大小不等并且使得土壤养分和水分在小范围内发生变化的局部地形,朱清科、张岩等[1]将黄土坡面上的微地形划分为浅沟、切沟、塌陷、缓台、陡坎 5 种。由于坡面造林计量是以米为计量单位,因此本研究中微地形是指面积大于 1 m^2 的微小地形。其中缓台是指其坡度明显小于原状坡坡面坡度的一种微地形,有研究[2]提出,缓台的土壤水分条件优于同一立地条件类型下其它几种微地形,可优先考虑栽植乔木树种。因此,根据实地调查数据,首先根据面积的数量级定义了大(>1000 m^2)、中(>100 m^2,<1 000 m^2),小(>1 m^2,<100 m^2)3 种规模的缓台进行研究比较。

目前,在黄土坡面及区域尺度上的土壤水分空间变异特征研究较多,但在微地形尺度的土壤水分空间变异性研究比较少,目前的研究[2-4]均集中在不同微地形种类的水分条件的差异性分析。李萍等[5]通过研究不同规格的人工整地鱼鳞坑发现,规格上的不同会使得鱼鳞坑在水分条件上明显的不同,作为天然集水区的缓台来说,在实际调查中我们发现,微地形的面积大小从 1～4 000 m^2 不等,由于面积的不同导致凹凸地表在径流、集水区和蒸发上的差异势必会影响到微地形内的水分条件,而规模大小导致的水分条件的差异还鲜见报道,为了更好地了解土壤水分在微地形尺度上的分布规律,本研究通过对陕北黄土区不同面积大小的缓台水分条件及空间变异性进行研究,籍以探索土壤水分条件在不同面积大小微地形上的表现,以期为黄土坡面进行植被优化配置提供理论指导。

1　研究区概况

研究区位于陕西省延安市吴起县的合家沟流域(北纬 36°33′33″—37°24′27″,东经 107°38′57″—108°32′49″)。吴起县地处黄土高原丘陵沟壑区,属半干旱大陆性季风气候,年平均气温 7.8 ℃,无霜期 96～146 d;1957—2009 年平均降水量 466 mm,降水量年及变化较大,季节分配不均匀,7—9 月降水占全年降水量的 64% 以上,多年平均陆地蒸发量 400～450 mm;该区土壤类型为地带性黑垆土剥蚀后广泛发育在黄土母质上的黄绵土,质地为轻壤。

研究区合家沟流域自 1998 年以来实行全流域封山禁牧,采取人工封育的方式进行植被恢复。目前该流域植被以天然草地为主,主要草本群落有百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespide zdavurica*)、委陵菜(*Potentilla chinenisis*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等。在沟底部位散生有少量灌木和乔木。流域内坡面地形破碎,微地形大量分布,人为干扰因素较少,为本研究的进行提供了有利条件。

2　研究方法

2.1　土壤水分布点及测定

为了研究缓台规模对其土壤水分的影响,选择吴起县分布较广泛的坡度在 25°～35°的东坡和西坡等立地类型中不同规模的缓台作为研究对象。采样点所在坡面植被全部为天然草地。在小规模缓台和中规模缓台中采用随机布点的采样方式设置土壤水分观测点,分别在不同的缓台内部进行取样,取样尽量覆盖缓台的特征点。对于大规模的缓台,采取以 5 m×5 m 的间距均匀布设样点。同时取每个缓台同一高度处两侧的原状坡土壤样品作为对照。土壤水分测定方法采用土钻分层采土室内烘干的方法,包括 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 等 5 个土层,3 个重复的平均值作为该层次的土壤含水量。

土壤水分观测样点数量根据不同缓台规模分别为小规模缓台 20 个、中规模缓台 25 个和大规模缓台 107 个,对照组坡面样地 36 个。

2.2　分析方法

2.2.1　土壤水分差异显著性检验　Wilcoxon 秩检验适用于配对资料的差异比较,如果计算结果中的 $p<0.05$,说明两组数据存在统计学上的显著差异,如果 $p<0.01$,则表示两组数据在统计学上存在极显著差异。利用 SPSS 18.0 对不同规模的缓台水分数据进行了两两配对的 Wilcoxon 秩检验,观测其水分差异情况。

2.2.2　土壤水分变异系数　变异系数 C_v 和标准差 SD 的计算公式为:

$$C_v=\frac{\mathrm{SD}}{\bar{x}} \tag{1}$$

$$\mathrm{SD}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})} \tag{2}$$

式中:$\bar{x}$——为样本(土壤水分观测值)平均值;n——样本总个数;x_i——样本的地 i 个观测值。

变异系数表征了土壤水分变异的程度,在本研究中该值反映了土壤各层水分在空间上的稳定性,C_v 越大说明土壤水分变化越剧烈,越小说明土壤水分越稳定。当 $C_v\leqslant 10\%$ 时为弱变异性,当 $10\%<C_v<100\%$ 时为中等变异,当 $C_v\geqslant 100\%$ 为强变异性。

2.2.3　地统计学法　地统计学由法国学者 Matheron

于 20 世纪 60 年代建立，他提出了区域变量理论，使传统的地学方法与统计学方法相结合。地统计学是以区域化变量、随机函数和平稳性假设等概念为基础，以变异函数为核心，以克立格插值法为手段分析研究自然现象的空间变异问题。关于地统计学的研究方法国内外文献都有大量介绍[6-11]，本文不再赘述。本研究利用 ArcGIS 9.3 中的 geostatistical analyst 模块对研究区进行统计学分析，生成缓台内部的土壤水分分布图。

3 结果分析

3.1 不同规模缓台水分特征

3.1.1 不同规模缓台土壤含水量比较 利用 SPSS 18.0 对不同规模的缓台水分数据进行两两配对样本的 Wilcoxon 秩检验，检验结果详见表 1。

表 1 不同规模缓台土壤水分差异性检验

缓台规模	大	中	小	原状坡
大	1	0.049*	0.046*	0.008**
中		1	0.463	0.045*
小			1	0.039*
原状坡				1

注：* 表示以显著性水平 $p=0.05$ 检验，差异显著；** 表示以显著性水平 $p=0.01$ 检验，差异极显著。

由表 1 可以看出，3 种规模的缓台与原状坡的土壤含水量均有显著的差异性（$p<0.05$），这与以前的研究结果[7]是一致的，说明缓台微地形的水分条件明显不同于原状坡面，因此在人工植被恢复的过程中需要区别对待。同时，大规模缓台的水分含量和中等规模及小规模的含水量也有着显著的差异（$p<0.05$），说明由于缓台面积的差异导致的含水量的差别是存在的。这主要是由于缓台规模的大小影响了径流的入渗时间，从而影响了不同规模缓台的土壤水分含量。

为了比较不同规模缓台的水分含量的大小差异，本研究引入土壤水分指数 K 值（K＝缓台水分含量/对应原状坡水分含量），当 $K>1$ 时表示该缓台水分优于其所在坡面的原状坡，当 $K<1$ 时则表示该缓台水分含量低于其所在坡面的原状坡，通过数据处理得当阴坡和阳坡的 3 种规模缓台的 K 值（图 1）。

由图 1 可以看出，在阳向坡上，3 种规模的缓台总体上呈现面积越大，水分条件越好的趋势，但小规模缓台表现出了水分条件和原状坡面差别不大，中等规模的缓台表现出当土层深度＞40 cm 时水分条件才优于原状坡面。说明了在阳坡，小规模的缓台尽管有一定的集水蓄水效果，但在强烈的蒸发作用下，使得其保水效果较差。在阴向坡，大规模缓台土壤水分总体上同样要优于其它两种缓台及原状坡，但在 0—20 cm 土层内，大规模缓台的水分含量较低，仅优于中规模的缓台，这主要是因为在阴向坡的大规模缓台上，草本覆盖度较高，草本植物的蒸腾作用使得表层土壤水分含量较低。

因此在土壤含水量上，在两种坡向上只有大规模的缓台土壤水分含量明显好于原状坡，其它两种规模的缓台水分条件也均优于原状坡面，但相比较大规模缓台，其优越程度要小，同时在中规模和小规模缓台之间的大小趋势变化不明显，这与前面得到的结论一致，说明当缓台越大水分条件越好，但这一趋势应该在缓台面积达到一定规模的时候才能体现。

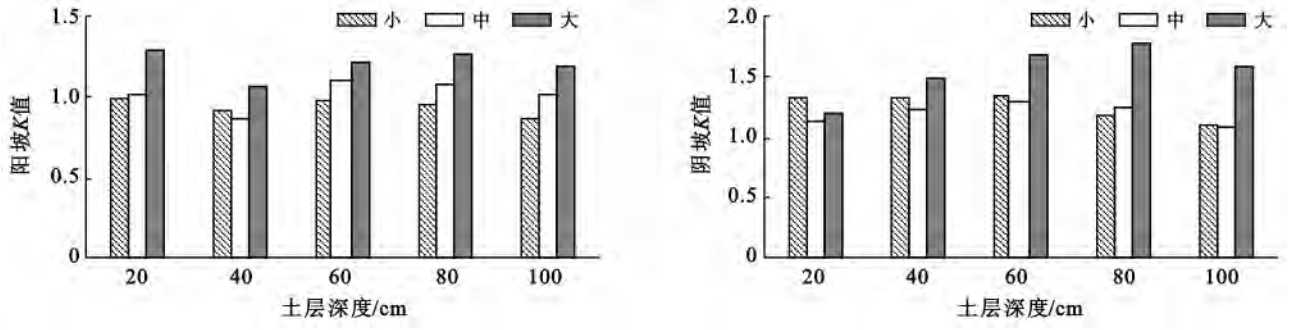


图 1 研究区不同规模缓台含水量指数

3.1.2 不同规模缓台水分变异系数 变异系数反映了不同面积大小的缓台水分变化的差异性，从表 2 中数据可以得出，3 种规模的缓台和原状坡随着土层深度的增大，土壤水分变异系数变化趋势一致，均表现出表层水分空间变化激烈，下层水分比较稳定的趋势，这主要是因为在土壤表层水分的下渗、蒸发等水分活动较剧烈，表层土壤水分较底层土壤水分含量较少，同时由于地形分异使得不同位置土壤蒸发量有所不同，因此土壤表层水分差异较大。

在土壤水分变异系数的总体变化中，变异系数在

0—60 cm 各层均呈现小规模缓台>大规模缓台>中规模缓台的趋势。这主要是因为小规模的缓台更容易受坡度、坡向和植被的影响,从而使得其接受的降雨、径流及蒸发差别较大,所以导致了小规模的缓台在水分上的差异比较大。而通过数据得出大规模缓台的变异系数也比较高,可以推断其内部不均衡的水分分布使得变异系数在总体上呈现一个比较高的数值。在土层深度大于 60 cm 时各种缓台水分变异系数均比较小(<10%)且差别不大,主要是因为随着土层深度的增加,深层水分和表层以及大气进行交换活动比较缓慢,使得深层水分含量在空间上分布较为稳定。

3.2　大规模缓台水分空间分布

3.2.1　土壤水分在垂直方向上的变异规律　由表 3 可以看出,除了表层土壤水分以外,从坡上部到坡下部(东西向),土壤水分变异总体呈中等变异($10\%<C_v<100\%$),表明在坡面纵向上水分变异程度较高,坡脚处和缓台边缘处之间水分差异较大。沿着坡向向下,变异系数呈增加的趋势,这和以前的研究结论略有差异[2,6-18],这主要是因为该处缓台上草本植被覆盖度总体较高,使得土壤表面蒸发量趋于一致。有研究[8]证明,土壤水分的变异程度和土壤的水分含量均值呈正相关关系,因此由于植物的耗水,使得表层土壤含水量较低。使得表层土壤变异系数较低。

表 2　研究区不同规模缓台土壤水分变异系数　%

土层深度/cm	小规模缓台	中规模缓台	大规模缓台	原状坡
0—20	29.6	24.3	25.9	23.4
20—40	22.4	19.4	23.2	18.3
40—60	12.3	6.8	13.2	7.5
60—80	6.1	5.6	5.9	5.6
80—100	5.2	4.5	5.1	5.5
0—100	15.1	12.1	14.7	12.1

由表 4 可以看出,在沿坡向横向上(南北向),土壤水分变异程度与纵向相比较弱,只有在 40—60 cm 土壤处呈中等变异,0—40 cm 土层均呈弱变异,这说明在大规模缓台沿坡向横向上土壤水分总体较稳定,变化程度不明显。

综合比较纵向和横向上的水分变异程度,可以得出在大规模缓台的内部,由于水分初始分布不均引起的水分变化程度要大于由于蒸发导致的变化,总体使得在大规模缓台内部,沿坡向纵向的变化大于横向变化。

表 3　大规模缓台纵坡向土壤水分统计特征值

土层深度/cm	均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布类型
0—20	11.76	9.44	10.76	0.004	6.86	−0.332	0.340	N
20—40	11.30	10.38	12.61	0.008	10.45	−0.113	−0.892	N
40—60	9.60	9.51	13.55	0.013	13.64	−0.523	0.703	N
0—60	11.20	9.44	13.55	0.012	10.40	0.418	−0.531	N

注:N 为正态分布。下同。

表 4　大规模缓台横坡向土壤水分统计特征值

土层深度/cm	均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	分布类型
0—20	11.08	9.29	12.58	0.010	9.31	0.429	0.570	N
20—40	11.05	10.51	12.61	0.008	6.97	−0.957	−0.382	N
40—60	11.69	9.40	13.53	0.012	10.27	0.434	1.488	N
0—60	11.28	9.29	13.53	0.011	9.36	−0.011	−0.168	N

3.2.2　土壤水分在水平方向上的变异规律　通过对一个独立连续的大规模缓台 0—60 cm 土壤水分数据进行基本统计特征分析,得到其土壤水分数据的偏态系数和峰度系数分别为 1.161 和 0.96,近似正态分布,因此,可以对大规模缓台内 0—60 cm 土层土壤数据进行地统计分析。

实验半方差及其理论变异函数拟合模型如图 2 所示,根据决定系数最大和残差平方和最小的原则对半方差模型进行筛选,选取球状模型为最优的半方差理论模型,最终对未测点的土壤水分数据进行克里格插值方法进行最优估计,得到大规模缓台内部的土壤水分(为 0—60 cm 土壤水分平均值)分布图(图 3)。

由图 3 可以得出,在研究区内部,土壤水分介于 8.5%～13.0%,具有较大的差异。沿坡面纵向土壤平均水分含量呈逐渐降低的趋势,这种趋势主要是因为在降水产生径流之后,由上坡集水区产生的径流首先经由缓台上方的陡坎流入坡脚处下渗,使得坡脚处的土壤水分初始值较高,同时由于坡脚处在下午太阳高度降低时首先进入由梁峁造成的阴影区,使得日蒸发量比远离坡脚处的小。另外,在调查中发现坡脚处

的草本植物盖度也较高，使得直接辐射到地表的太阳辐射减小，这些因素共同影响使得在大规模缓台内部，水分呈现出沿坡面纵向逐渐减小的趋势（西高东低）。

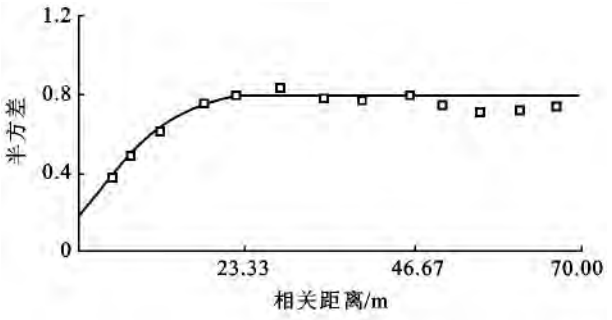


图 2 大规模缓台 0－60 cm 土壤水分半方差函数及拟合模型图

在沿坡面横向上，土壤平均水分呈现“中间高两头低”的趋势，并且在缓台北向边缘水分含量要高于缓台南向边缘。这是因为在缓台南北两头各有一个较大的侵蚀沟，使得缓台内部水分发生侧向迁移而产生损失。该缓台总体上呈“哑铃”形状，在坡脚处有一道梁的存在使得缓台南北发生了坡向上的变化，使得南端呈现出更倾向阳坡的水分特征，北段呈现出类似于阴坡的水分特征。总体上使在缓台内部出现以坡脚水分含量最高，向四周辐射下降的趋势。因此在进行植被恢复的过程中，不仅对于不同面积的缓台要区别对待，配置不同的乔灌木树种，对于面积较大的缓台，在其上的配置也需要有一定的差异。

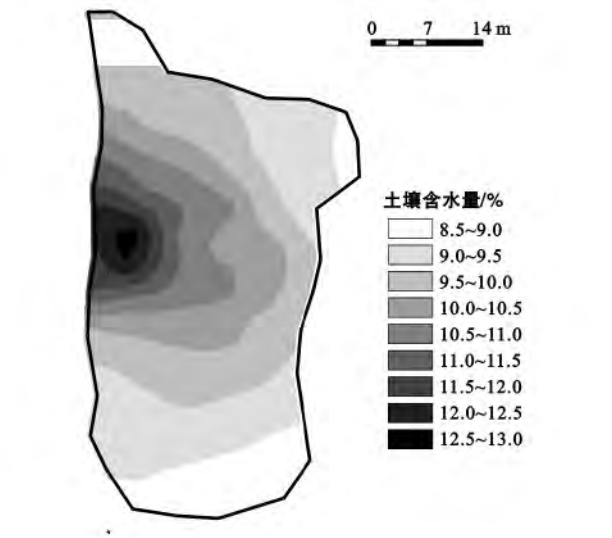


图 3 大规模缓台内部 0－60 cm 土壤平均水分分布

4 结 论

（1）无论是在阴坡还是阳坡，大规模缓台（面积＞1 000 m^2）的水分条件要好于中等规模（100～1 000 m^2）和小规模（＜100 m^2）的缓台，而中等规模缓台和小规模缓台在水分含量差别不大。证明只有当缓台面积达到一定程度的时候，其水分条件会出现明显的优势，在进行植被配置时可以采用比原状坡面高一等级的植被配置模式。

（2）随着土层深度的增加，土壤水分变异系数总体呈现逐渐减小的趋势，就规模来说，各缓台的变异系数存在小规模缓台＞大规模缓台＞中规模缓台的趋势。

（3）在大规模缓台内部，在缓台上边界靠近陡坎处土壤水分条件较好，由于缓台周围的地表起伏遮挡引起的太阳辐射的不均衡对缓台内部水分分布的影响是明显的，因此在进行植被配置的过程中，对于大规模的缓台，除了在整体配置上要优于原状坡面的等级配置，同时在缓台内部也要注意合理的布局，可以在坡脚处考虑配置以灌木为主的植被群落，在远离坡脚处的缓台边缘则应以需水量较小的草本为主。

（4）通过分析发现，由于面积的大小不一致导致的水分的差异在缓台微地形的表现较为明显的，然而在本研究中，中等规模的缓台和小规模的缓台水分差异程度并不大，因此，当缓台面积何种程度的时候才会对对其中的水分产生显著的影响，需要进行进一步的研究来确定。同时在研究大规模缓台水分分布时发现，缓台的自然形状也会对其中的水分产生明显的影响，因此形状因子对微地形土壤水分分布的影响也应将在未来的研究中加以考虑。

［ 参 考 文 献 ］

[1] 朱清科，张岩，赵磊磊，等. 陕北黄土高原植被恢复及近自然造林[M]. 北京：科学出版社，2012.

[2] 王晶，朱清科，赵荟，等. 陕北黄土区阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报，2011，31(4)：16-21.

[3] 张宏芝，朱清科，赵磊磊，等. 陕北黄土坡面微地形化学性质研究[J]. 中国水土保持科学，2011，9(5)：20-25.

[4] 张宏芝，朱清科，王晶，等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报，2011，31(6)：55-58.

[5] 李萍，朱清科，王晶，等. 半干旱黄土丘陵沟壑区不同规格鱼鳞坑集水效果研究[J]. 灌溉排水学报. 2011，30(5)：91-94.

[6] 赵荟，朱清科，秦伟，等. 黄土高原干旱阳坡微地形土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报，2010，30(3)：64-68.

[7] 赵磊磊，朱清科，聂立水，等. 陕北黄土区陡坡土壤水分变异规律研究[J]. 生态环境学报，2012，21(2)：253-259.

[8] 胡伟，邵明安，王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究[J]. 农业工程学报，2005，21(8)：11-16.

（下转第 203 页）

汉:华中农业大学,2007.
[8] 郑华伟,张锐,刘友兆.基于物元分析的土地利用系统健康诊断[J].中国土地科学,2012,26(11):33-39.
[9] 郭杰,吴斌.土地利用系统健康评价[J].中国土地科学,2011,25(4):71-77.
[10] FAO Proceedings. Land Quality Indicators and Their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development [R]. Proceedings of the Workshop organized by the land and Water Development Division FAO Agriculture Department, 1997.
[11] Rainer W. Development of environmental indicator systems: Experiences from Germany[J]. Environmental Management, 2000,25(6):613-623.
[12] 颜利,王金坑,黄浩.基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价[J].资源科学,2008,30(1):107-113.
[13] 仇蕾.基于免疫机理的流域生态系统健康诊断预警研究[D].江苏 南京:河海大学,2006.
[14] 高珊,黄贤金.基于 PSR 框架的 1953—2008 年中国生态建设成效评价[J].自然资源学报,2010,25(2):341-350.
[15] 郑华伟.基于改进熵值法的耕地利用集约度评价[J].新疆农垦经济,2010,29(4):53-58.
[16] 陶晓燕,章仁俊,徐辉,等.基于改进熵值法的城市可持续发展能力的评价[J].干旱区资源与环境,2006,20(5):38-41.
[17] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].5 版.北京:科学出版社,2010.
[18] 郭锐利,郑钦玉,刘娟,等.基于熵值法和 GM(1,1)模型的重庆城市生态系统健康评价[J].中国环境科学,2012,32(6):1148-1152.
[19] 周瑞平.GM(1,1)模型灰色预测法预测城市人口规模[J].内蒙古师范大学学报:自然科学(汉文版),2005,34(1):81-83.
[20] 戴亚南,贺新光.长株潭地区生态可持续性[J].生态学报,2013,33(2):595-602.
[21] 张军以,苏维词,张凤太.基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J].中国环境科学,2011,31(6):1039-1044.

(上接第 196 页)

[9] 胡伟,邵明安,王全九.黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J].水科学进展,2006,17(1):74-81.
[10] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究[J].农业工程学报,2006,22(8):54-58.
[11] 毕华兴,李笑吟,刘鑫,等.晋西黄土区土壤水分空间异质性的地统计学分析[J].北京林业大学学报,2006,28(5):59-66.
[12] 张伟,陈洪松,王克林,等.喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J].土壤学报,2006,43(4):554-562.
[13] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):5-9.
[14] Whitaker M P L. Small-scale spatial variability of soil moisture and hydraulic conductivity in a semi-arid range land soil in Arizona[D]. Tucson: University of Arizona, 1993.
[15] 李笑吟.晋西黄土区土壤水分时空变化规律研究[D].北京:北京林业大学,2006.
[16] 朱岩.黄土高原土壤水分空间变异及模拟[D].北京:北京林业大学,2011.
[17] 王云强,邵明安,刘志鹏.黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2012,23(3):310-316.
[18] 路保昌,薛智德,朱清科,等.干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究[J].水土保持通报,2009,29(1):62-65.
[19] Nagamatsu D, Mirura O. Soil disturbance regime in relation to micro-scale landforms and its effect on vegetation structure in a hilly area in Japan[J]. Plant Ecology, 1997,133(2):191-200.
[20] 罗勇,陈家宙,林丽蓉,等.基于土地利用和微地形的红壤丘岗区土壤水分时空变异性[J].农业工程学报,2009,25(2):36-41.