

# 古尔班通古特沙漠南缘春季沙丘不同部位 表层土壤水分空间变异性研究<sup>\*</sup>

张建兵<sup>1,3</sup>, 熊黑钢<sup>2,3</sup>, 郭宇翔<sup>1,3</sup>, 钟秀娟<sup>1,3</sup>, 于言哲<sup>1,3</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学 应用文理学院, 北京 100083;

3. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:** 研究春季沙丘土壤水分含量及其变异特性对沙丘植被建设、防风固沙工程具有重要意义。对 4 月初古尔班通古特沙漠南缘半固定沙丘迎风坡、背风坡及丘间低地表层土壤水分研究发现, 丘间低地土壤含水量(14.86%) 远高于迎风坡(7.65%) 及背风坡(7.38%); 表层土壤水分的变异强弱与土壤含水量高低呈正相关, 具体为丘间低地> 迎风坡> 背风坡, 其变异系数分别为 0.23, 0.15, 0.14。迎风坡、背风坡及丘间低地表层土壤水分空间自相关程度高, 前两者能很好地拟合为球状模型, 后者为指数模型, 3 者变程差距大, 分别为 24.32 m, 8.79 m, 91.00 m。沙丘各部位表层土壤含水量等值线图一方面显示了坡面中部及下部土壤水分总体上高于上部, 另一方面也直观体现了各部位表层土壤水分的空间变异性。

**关键词:** 半固定沙丘; 不同部位; 土壤水分; 空间变异性

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0125-05

## Study on Spatial Variability of Surface Soil Moisture in Different Positions of Sand Dunes in South Gurbantonggut Desert

ZHANG Jiar bing<sup>1,3</sup>, XIONG Hei gang<sup>2,3</sup>, GUO Yu xiang<sup>1,3</sup>, ZHONG Xiur juan<sup>1,3</sup>, YU Yarr zhe<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Urban Department of College of Art & Science of Beijing Union University; Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** It is important to study the soil moisture content and its spatial variability of the dunes in spring for the vegetation construction and the sand-fixation project. This article has studied the surface soil moisture of windward, leeward and inter-dune lowland in April of semi-fixed dunes in south Gurbantonggut desert. The results showed that soil water content of inter-dune lowland (14.86%) is higher than that of windward (7.65%) and leeward (7.38%). The variation degree of soil water is positively related to the soil water content, and the variation degree order is soil water in inter-dune lowland, windward and leeward with the variation coefficient are 0.23, 0.15, 0.14 respectively. There is a clear spatial autocorrelation of soil water in all positions, the best fitted semivariogram models of windward and leeward are spherical model, and is exponential model for inter-dune lowland. There is big separation distance difference among three positions, whose separation distances are 24.32 m, 8.79m and 91.00 m. The contour line map of soil water content indicates that the soil water content of middle and bottom part is higher than that in the top part slope, it also exhibits the obvious spatial variability.

**Key words:** semi-fixed dunes; different position; soil moisture; spatial variability

防风固沙、植被建设和维护是西部生态恢复与 重建中最为重要的环节。这不仅要考虑当地社会经

\* 收稿日期: 2009-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(40771194); 北京市属高等学校人才强教计划(PHR200906125)

作者简介: 张建兵(1984-), 男, 四川广安人, 硕士, 主要从事干旱区资源与环境研究。E-mail: zhangjianbing666@163.com

通信作者: 熊黑钢(1956-), 男, 教授, 博士, 现主要从事干旱区研究。E-mail: xhg1956@sohu.com

济发展现状,更重要的是必须结合其自然生境特点。在干旱区特别要注重水量平衡问题<sup>[1]</sup>,土壤水分状况对土壤物理性质和植被生长状况有重要影响,其变化是限制长期定居植物种类和数目的主要因素,对植物的生存生长具有重要意义,同时,土壤水分是控制沙漠化的主要约束因素,是决定绿洲、荒漠生态系统结构与功能的关键因子,因此成为干旱、半干旱地区农牧业生产和治沙造林的主要限制因子<sup>[2-5]</sup>。

土壤水分具有异质性,其异质性的存在对各种水文过程和土壤形成过程均有显著的影响,因此,了解土壤水分的异质性对理解和预测各种过程就显得十分重要<sup>[6]</sup>。土壤表层水分含量的变化在大的时空尺度上影响生态系统对物理环境改变的响应,尤其是影响陆地表面能量对潜热和感热的划分,这不仅导致了能量和水分的垂直流动,也导致了水分的水平流动—径流的产生<sup>[7]</sup>。已有的研究表明,土壤水分是将气候、土壤和植被对水分循环过程的影响作用与水分循环对植被格局的动态影响综合起来的关键因子<sup>[8]</sup>,它通过调节气候—土壤—植被系统的复杂动态来控制植被的时空分布格局<sup>[9]</sup>。在干旱、半干旱地区,春季土壤含水状况是否引起扬沙天气的重要原因,也是影响当年植被和作物生长的重要因素<sup>[10]</sup>。研究此时沙丘表层土壤水分的空间变异性,有助于了解其分布状况,对防风固沙、植被建设具有重要意义。

## 1 研究区概况

研究区为新疆奇台县西北部沙漠区,位于古尔班通古特沙漠南缘,地处东经  $89^{\circ}13' - 91^{\circ}22'$ ,北纬  $43^{\circ}25' - 49^{\circ}29'$ ;该区多年平均气温为  $4.7^{\circ}\text{C}$ ,7月极端最高气温  $43^{\circ}\text{C}$ ,1月极端最低气温为零下  $42.6^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量为 176 mm,蒸发量为 2 141 mm,无霜期平均 156 d,年日照时数 2 840~3 230 h,夏季炎热,冬季寒冷,属于中温带大陆性干旱半干旱气候。研究区经过防风固沙工程的改造,现已基本为固定半固定沙丘,地表植被简单量少,其中灌木种主要为人工种植梭梭,草本层为少量猪毛菜及短命植物。实验地为一半固定沙丘,坡面基本无植被,丘间低地有少量植被,为梭梭及短命植物。

## 2 研究方法

4月在研究区选取一典型沙丘,分别在沙丘的迎风坡、背风坡以及丘间低地选取  $20\text{ m} \times 55\text{ m}$  的矩形样地,并按  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  布设方形的网格,测量各网格点土壤表层 0~15 cm 含水量,因此一样地 60

个样点,3样地共采集 180 个土壤水分数据,样点分布如图 1 所示。另外在沙丘顶部及丘间低地分别挖取 70 cm 深度剖面,测量其表层、15、25、35、45、55、65 cm 深处土壤含水量,以研究两部位土壤水分的垂直变化特征。

土壤含水量测量仪器为时域反射仪(TDR),所测值为土壤体积水分含量。仪器为德国 IMKO 公司生产的 TRIME-T3 管式 TDR 土壤含水量测量系统,分探针与管式两种测量方式,本试验使用的为探针测量,其测量范围为 0~60% 体积含水量;测量精度:当含水量为 0~40% 时是  $\pm 2\%$ ,含水量为 40%~60% 时是  $\pm 3\%$ ,标定误差小,满足精度要求。利用 Excel 2003 及 DPS 数据处理系统对观测数据进行统计分析,并利用地统计学软件 GS+ 进行变异函数、Moran's I 系数、分数维分析,利用 Surfer v 8.0 进行克立格空间插值估计、绘制土壤含水量等值线图。

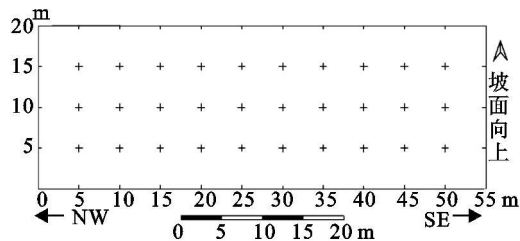


图 1 样点分布图

## 3 结果与分析

### 3.1 各部位土壤水分的统计特征值

沙丘不同部位土壤水分含量具有较大差异(表 1),丘间低地水分含量表征值(最大值、最小值、中位数及均值)均远大于迎风坡和背风坡,后两者相差较小,3 者土壤含水量均值分别为 14.10%、7.65%、7.38%,这是地形因子对土壤水分的直接影响结果,坡面导致土壤水分势能大,向下运移显著,加上坡面受风等气象因子的影响显著,土壤涵水性能差;而丘间低地的洼地地形利于积水,且受蒸发等因子的影响小于坡面,所以含水量较高。丘间低地土壤水分变化区间大,最高最低值相差大(13.50%),迎风坡变幅最小,两极值仅相差 4.3%。研究区 4 月初背风坡土壤含水量小于迎风坡,这与在甘肃民勤沙漠区半固定沙丘的研究结果一致<sup>[11]</sup>。

变异系数 CV 值反映了土壤水分的变异性大小,一般认为:变异系数  $CV \leq 0.1$  时为弱变异性;  $0.1 < CV < 1$  时为中等变异性;  $CV \geq 1$  时为强变异性<sup>[12]</sup>,沙丘各部位土壤水分均为中等变异性(表 1)。另外,体现变异程度的方差、标准差及变异系数显

示, 丘间低地、迎风坡、背风坡的变异程度依次减小, 这与其含水量大小顺序一致, 即越大的降雨和越高

的土壤水分含量经常伴随着越高的变异性, 反之亦然<sup>[13 15]</sup>。

表 1 沙丘各部位土壤水分统计特征

沙丘部位	最大值/ %	最小值/ %	中位数/ %	均值/ %	方差	标准差 <i>SD</i>	变异系数 <i>CV</i>
迎风坡	10. 50	6. 20	7. 91	7. 65	1. 32	1. 15	0. 15
背风坡	9. 90	5. 30	7. 45	7. 38	1. 11	1. 05	0. 14
丘间低地	23. 25	9. 75	14. 86	14. 10	11. 43	3. 38	0. 23

注: 样本数为 60, 土壤水分含量为体积含水量, 下同。

3.2 沙丘顶部、丘间低地土壤水分的垂直变化特征

丘间低地剖面各层土壤含水量均大于沙丘顶部, 且各特征值之间相差较大(表 2), 最大值, 最小值, 中位数及均值的差值分别为 12. 10%, 5. 40%, 7. 60%, 9. 00%。这与其地形因子、地表状况及植物根系密切相关, 沙丘顶部由于相对高的海拔、单一砂质外表及较粗的土壤颗粒度而具有更大的蒸发强度, 涵水能力弱, 土壤水分少; 相反, 丘间低地不仅处于低洼地, 而且地表有一定的植被覆盖, 所以其涵水能力较强, 从而具有较高的含水量。

沙丘顶部与丘间低地土壤水分的垂直变化特征

表 2 沙丘顶部与丘间低地土壤水分剖面特征值

沙丘部位	最大值/ %	最小值/ %	中位数/ %	均值/ %	方差	标准差 <i>SD</i>	变异系数 <i>CV</i>
沙丘顶部	9. 50	7. 40	9. 20	8. 51	0. 91	0. 96	0. 11
丘间低地	21. 60	12. 80	16. 80	17. 51	10. 66	3. 27	0. 19

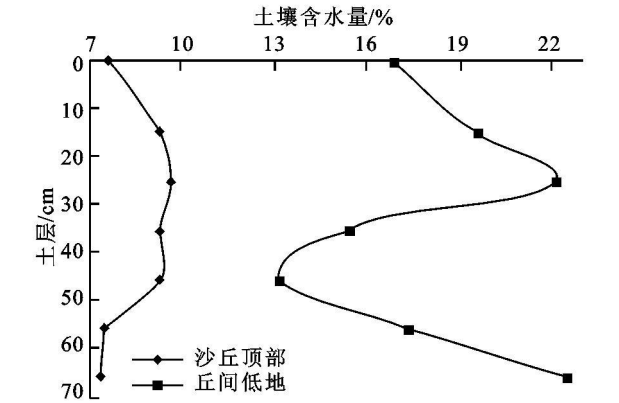


图 2 沙丘各部位土壤水分垂直变化特征

3.3 各部位土壤水分的空间变异

3.3.1 土壤含水量的变异函数分析 变异函数  $\chi(h)$  是地统计学的重要组成部分, 是抽样间隔为  $h$  时样本值方差数学期望的一半, 所以又可称为半方差函数。以变异函数  $\chi(h)$  为  $Y$  轴, 抽样间隔  $h$  为  $X$  轴, 可绘成变异函数曲线图, 并根据变异函数曲线的变化趋势拟合成不同的理想模型, 目前, 用于拟合该函数应用较成熟且较适合描述土壤特性空间变异的模型主要有球状模型、线性模型和指数模型等<sup>[10, 16]</sup>。半方差函数中,  $Co$  为块金值, 反映区域化变量随机性大小;  $Co + C$  为基台值, 反映变量变化幅度或系统

显著, 2 者土壤含水量随着土层的变化呈震荡变化趋势(图 2)。依变异系数划分标准<sup>[12]</sup>, 丘间低地及沙丘顶部土壤水分的垂直变异性均属中等变异强度, 但后者变异程度更强。土壤水分的垂直变化与剖面各层的土壤性质及植被根系具有显著关系, 沙丘顶部 0– 65 cm 土壤性质较单一, 且无植物根系的干扰, 土壤水分的垂直分布较均匀, 变异程度弱; 而沙丘低地的土壤性质较为复杂, 这与其接收的风积物质直接相关, 再加上 0– 65 cm 土层深度刚好为植物根系层, 根系对土壤水分的干扰作用强, 故其变异性大。

的总变异程度;  $a$  为变程, 也称自相关距,  $C/(Co + C)$  为结构方差比, 表征空间异质性程度, 表示由自相关部分引起的空间变异占系统总变异的比列, 可反映变量的空间相关程度, 一般认为, 该值小于 25%, 说明变量具有较弱的空间相关性, 25% ~ 75% 之间, 变量具有中等的空间相关性, 大于 75% 时, 变量空间相关性强烈<sup>[16 17]</sup>。经正态性检验, 沙丘各部位土壤含水量观测值均服从正态分布, 即满足平稳假设, 可进行地统计分析<sup>[10]</sup>。根据半方差函数的理论及计算模型得表 3 及图 2。

半方差函数的理论模型及参数的确定可参考有关文献<sup>[18 19]</sup>, 沙丘各部位表层土壤水分的空间变异规律均能很好的拟合成变异函数的理论模型, 其中迎风坡及背风坡为球状模型, 丘间低地为指数模型(表 3, 图 2)。3 者均表现出小块金值, 大的基台值, 说明空间结构特征明显; 结构方差比  $C/(Co + C)$  显示沙丘不同部位的自相关程度高, 丘间低地的空间自相关程度为中等偏强( $C/(Co + C)$  值为 0. 689), 而迎风坡及背风坡则均属于强空间自相关, 其结构方差比  $C/(Co + C)$  值分别为 0. 958, 0. 999。

变程  $a$  的大小反映区域化变量影响范围的大小, 或者说反映该变量自相关范围的大小, 在变程范围内, 变量具有空间自相关特性, 反之则不存在<sup>[20]</sup>。

丘间低地变程(91.00 m)远大于迎风坡(8.79 m)及背风坡(24.32 m),这说明沙丘不同部位土壤水分的影响范围有着较大差别,丘间低地由于其相对稳定的地表环境,较高的土壤含水量,土壤水分空间自相关性存在于更大的范围内;迎风坡变程较小的原因是该部位受外界因素影响大,表层环境变化较快,所以土壤水分的自相关存在于较小的范围内;而在背风坡,虽然其土壤水分含量较低,但是由于其环境相对稳定,所以土壤水分的影响尺度也较大。同时,变程对采样设计的有效性有一定的指导意义<sup>[21]</sup>,变程以外的取样距离对任何内插和制图均无效<sup>[22]</sup>,试验区沙丘各部位土壤水分变程最小为 8.79 m,说明在研究该沙丘空间变异性时,其采样距离不能大于 8.79 m,同时说明本文所布设的测量网格间距 5 m × 5 m 对研究该沙丘土壤水分的空间变异性是有

效的。

分维数  $D$  的大小,表示变异函数曲线的曲率,  $D = (4 - m) / 2$ ,  $m$  是变异函数  $\lambda(h)$  和抽样间距  $h$  双对数线性回归的斜率,  $D$  随着变异函数对数曲线斜率的增加而减少,斜率越陡( $m$  越大),  $D$  越小,格局变异的空间依赖性越强,反之,由随机因素引起的异质性占有较大的比重<sup>[10,15,21]</sup>。沙丘迎风坡、背风坡及丘间低地的分维数分别为 1.926, 1.636, 1.910,说明由空间自相关部分引起的空间异质性高<sup>[23]</sup>。

3.3.2 各部位土壤含水量的 Moran's I 系数分析

Moran's  $I$  系数可定量描述研究变量在空间上的依赖关系。 $I$  的取值为  $-1 \sim 1$ 。 $I > 0$  表示变量在空间上呈正相关, $I < 0$  表示研究变量在空间上呈负相关, $I = 0$  表示研究变量在空间依赖性小或空间随机变异较大<sup>[10]</sup>。

表 3 沙丘各部位土壤水分半方差函数模型类型及相关参数值

沙丘部位	分布类型	理论模型	$C_0$	$C_0 + C$	$C / (C_0 + C)$	$a/m$	分维数 $D$ (Fractal)
迎风坡	正态分布	球状模型	0.056	1.341	0.958	8.790	1.926
背风坡	正态分布	球状模型	0.001	1.428	0.999	24.320	1.636
丘间低地	正态分布	指数模型	7.460	23.980	0.689	91.000	1.910

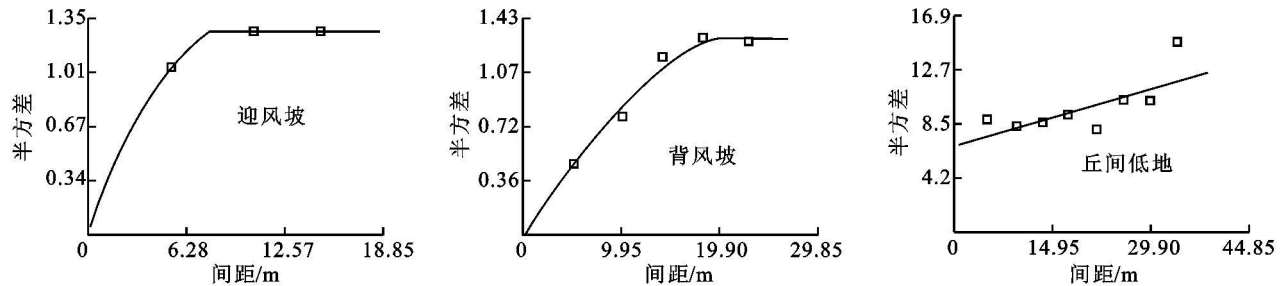


图 3 沙丘各部位表层土壤含水量变异函数

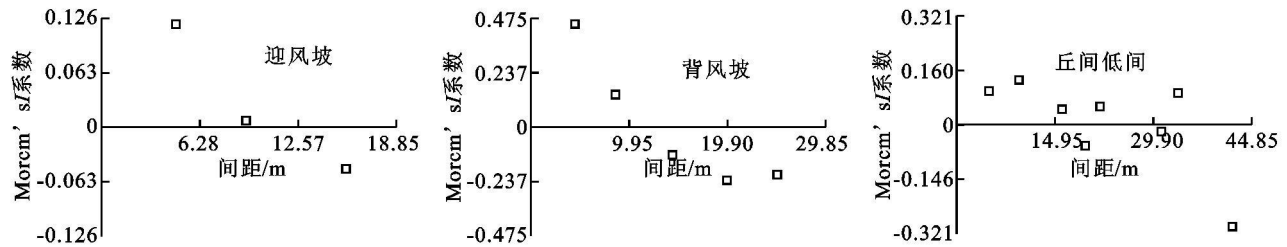


图 4 沙丘各部位土壤含水量的 Moran's I 系数

迎风坡、背风坡及丘间低地的 Moran's  $I$  系数分别在  $-0.063 \sim 0.126$ ,  $-0.237 \sim 0.475$ ,  $-0.321 \sim 0.160$  之间(图 3)。这表明各部位土壤含水量在空间上的相关程度并不高,并且随着间距的增加逐渐出现负相关,说明沙丘表层土壤水分在空间上的依赖性小,4 月初,研究区冷季趋于末期,气象环境变化比较大,这导致了沙丘表层土壤含水量在空间上的低依赖关系。

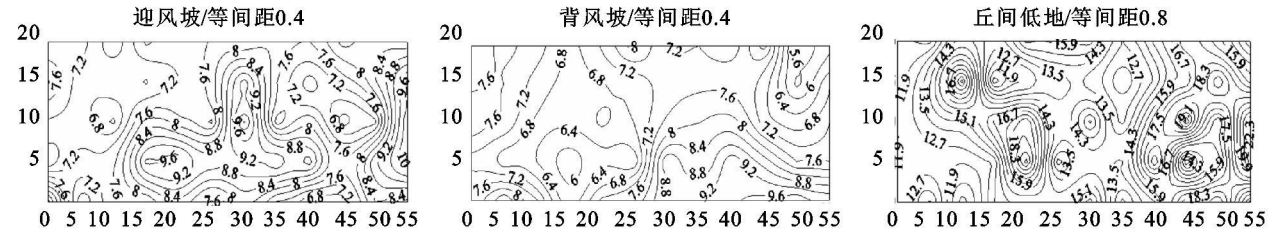
3.3.3 土壤含水量插值分析 沙丘各部位土壤含水

量等值图直观反映了其空间变异格局,即丘间低地>迎风坡>背风坡(图 4)。丘间低地的土壤水分空间分布复杂,等值线密且出现多个封闭小圆,说明土壤水分的分布随机性较高,出现了多个极值点,且相互之间存在较大差异,从而导致其密集的等值线,这也显示了其高空间变异性(变异系数为 0.23);迎风坡等值线图东南边的等值线分布也较密且有少许封闭圆的出现,但比丘间低地情况较简单;而背风坡的等值线图则分布较均匀,全图等值线少,间距大,这说明背风

坡表层土壤水分分布较为均匀, 各点含水量差异小, 从而表现出弱较小的变异性(变异系数为 0.14)。

一般情况下, 土壤水分含量与海拔呈负相关, 这在沙丘坡面土壤水分的分布上也有明显体现, 迎风坡及背风坡的中部及下部含水量较大, 而在上部稍小, 这便是海拔高差的直接影响结果。另外, 3 等值

线图的西北边土壤含水量较东南边普遍偏低, 且等值线的分布也较东南边稀疏, 这与研究区的主风向有关。由于该区域盛行西北风, 在风的影响下, 无论是背风坡还是迎风坡其西北边的土壤水分损失多, 导致该方向表层土壤含水量较低, 且相互之间差别小于东南边。



图中纵横坐标表示样点位置, 单位为 m  
图 5 沙丘不同部位土壤体积含水量(v%)等值线图

4 结 论

研究区 4 月初沙丘各部位土壤水分含量不同, 迎风坡、背风坡表层土壤含水量低, 两者差值小, 其水分均值分别为 7.65%, 7.38%; 而丘间低地与前两者差距大, 含水量均值高, 为 14.10%。表层土壤水分的变异强弱与土壤含水量高低呈正相关, 沙丘各部位变异性高低顺序依次为丘间低地、迎风坡、背风坡。

土壤含水量的变异函数分析可知迎风坡、背风坡及丘间低地表层土壤水分自相关程度高, 前两者能很好地拟合为球状模型, 后者为指数模型; 3 者变程差距大, 分别为 8.79, 24.32, 91.00 m, 其最小变程显示在 4 月初对研究区表层土壤水分进行空间变异性研究时, 其采样距离不能大于 8 m。另外沙丘迎风坡、背风坡及丘间低地的分维数在 1.636~1.926 之间, 说明由空间自相关部分引起的空间异质性高, 而 3 者的 Moran's I 系数则体现了土壤表层土壤含水量的低空间依赖性。

沙丘各部位表层土壤含水量等值线图直观反映出坡面中部及下部土壤水分总体上高于上部, 西北边(迎风面)低于东南边; 并且土壤水分在其含量较低的地方分布较为均匀。同时, 等值线图也体现了表层土壤水分的空间变异性, 丘间低地等值线密集且出现多个封闭区域, 说明其空间变异程度强; 背风坡等值线稀疏, 分布较均匀, 封闭区域少, 体现了其较小的空间变异性, 而迎风坡的情况则介于前两者之间。

参考文献:

[1] 张志山, 王新平, 李新荣. 沙漠人工植被区土壤蒸发测定[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 145-150.  
[2] 蒋进, 王雪芹, 雷加强. 古尔班通古特沙漠工程防护体

系内土壤水分变化规律[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 74-77.  
[3] 张国盛, 王林和, 董智, 等. 毛乌素沙区风沙土机械组成及含水率的季节变化[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 145-150.  
[4] Nash M S, Wierenga P J, Butler- Nance A. Variation in tension water content and drainage rate along a 91m transect[J]. Soil Science, 1989, 148: 94-101.  
[5] Nash M S, Wierenga P J, Gutjahr A. Time series analysis of soil moisture and rainfall along a line transect in arid rangeland[J]. Soil Science, 1991, 152: 189-198.  
[6] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕耕地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74-81.  
[7] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 106-109.  
[8] Noy- Meir I. Desert ecosystems: Environment and producers[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 25-51.  
[9] Porporato A, Odriguez- Iturbe I. Ecohydrology: a challenging multidisciplinary research perspective [J]. Hydrological Sciences Journal, 2002, 47(5): 811-821.  
[10] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 等. 不同土地利用方式下沙地土壤水分空间变异规律[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 43-48.  
[11] 贾宝全, 慈龙骏, 蔡体久, 等. 绿洲- 荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 203-208.  
[12] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.  
[13] Charpentier M A, Groffman P M. Soil moisture variability within remote sensing pixels[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 18987-18995.

(3) 相关性分析表明: 山地森林/ 干旱河谷交错带土壤微生物数量与土壤养分含量之间存在密切的相关关系, 土壤微生物数量可作为评价土壤肥力的指标。

(4) 次生林的各项土壤养分指标高于封禁造林地, 可以看出交错带土壤条件是由海拔高处向低处逐渐变差, 在干旱河谷区恢复森林植被, 从上到下逐步恢复应是一个较易取得成效的途径。在交错带下缘地段, 随着植被的恢复, 土壤理化性状均高于封禁造林地, 表明植被恢复对土壤具有明显的改良作用。至于灌木林地各项土壤养分指标高、土壤微生物数较大, 则主要是由于牲畜干扰较少所致。从而也进一步表明在人为干扰较大的区域, 进行封禁管理, 对提高植被恢复效果具有十分重要的作用。

参考文献:

[ 1 ] 张荣祖. 横断山区干旱河谷[ M ]. 北京: 科学出版社, 1992.

[ 2 ] 刘兴良, 慕长龙, 向成华, 等. 四川西部干旱河谷自然特征及植被恢复与重建途径[ J ]. 四川林业科技, 2001, 22( 2 ): 10- 17.

[ 3 ] 王金锡. 四川西部干旱河谷的生态环境与退耕还林[ J ]. 四川林业科技, 2001, 22( 1 ): 27- 31.

[ 4 ] 关文彬, 冶民生, 马克明, 等. 岷江干旱河谷植物群落物种周转速率与环境因子的关系[ J ]. 生态学报, 2004, 24( 11 ): 2367- 2373.

[ 5 ] 包维楷, 王春明. 岷江上游山地生态系统的退化机制[ J ]. 山地学报, 2000, 18( 1 ): 57- 62.

[ 6 ] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[ J ]. 土壤学报, 2003, 40( 2 ): 280- 285.

[ 7 ] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 等. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化[ J ]. 林业

科学研究, 1997, 10( 4 ): 373- 379.

[ 8 ] 殷国兰, 李梅, 吴宗兴, 等. 岷江干旱河谷辐射松人工林土壤微生物数量的季节动态[ J ]. 四川农业大学学报, 2007, 25( 4 ): 410- 414.

[ 9 ] 肖玲, 王开运, 张远彬, 等. 岷江冷杉根际土壤微生物对大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应[ J ]. 应用生态学报, 2006, 17( 5 ): 773- 777.

[ 10 ] 杨芳, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山不同林地土壤微生物和酶活性研究[ J ]. 内蒙古林业科技, 2008, 34( 1 ): 5- 7.

[ 11 ] 张秀艳. 川西常绿阔叶林不同恢复阶段土壤微生物区系研究[ D ]. 四川雅安: 四川农业大学, 2004.

[ 12 ] 杨芳. 川西亚高山森林土壤微生物和酶活性分布特征研究[ D ]. 重庆北碚: 西南农业大学, 2004.

[ 13 ] 张秀艳, 杜卫兵, 张小平, 等. 川西植被恢复过程中的土壤微生物评价及与土壤因子的关系[ J ]. 生态环境, 2007, 16( 5 ): 1470- 1474.

[ 14 ] 齐泽民, 王开运. 川西亚高山不同密度缺苞箭竹对土壤生物学特性的影响[ J ]. 水土保持学报, 2007, 21( 4 ): 154- 158, 176.

[ 15 ] 南京农业大学, 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理学[ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1978.

[ 16 ] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[ M ]. 北京: 科学出版社, 1985.

[ 17 ] 何其华, 何永华, 包维楷. 岷江上游干旱河谷典型阳坡海拔梯度上土壤水分动态[ J ]. 应用与环境生物学报, 2004, 10( 1 ): 68- 74.

[ 18 ] 薛立, 陈红跃, 邝立刚. 湿地松混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[ J ]. 应用生态学报, 2003, 14( 1 ): 157- 159.

[ 19 ] 蔡艳, 薛泉宏, 侯琳, 等. 黄土高原几种乔灌木根区土壤微生物区系研究[ J ]. 陕西林业科技, 2002( 1 ): 4- 9.

[ 20 ] 叶镜中. 森林生态学[ M ]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1992.

( 上接第 129 页 )

[ 14 ] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [ J ]. Journal of Hydrology, 1998, 210: 259- 281.

[ 15 ] 潘颜霞, 王新平, 苏延桂, 等. 荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性[ J ]. 生态学报, 2009, 29( 2 ): 993- 1000.

[ 16 ] 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.

[ 17 ] 程先富, 史学正, 于东升, 等. 江西省兴国县土壤全氮和有机质的空间变异及其分布格局[ J ]. 应用与环境生物学报, 2004, 10( 1 ): 64- 67.

[ 18 ] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变

异性特征[ J ]. 农业工程学报, 1999, 15( 3 ): 33- 38.

[ 19 ] 侯景儒, 尹镇南, 李维明, 等. 实用地质统计学[ M ]. 北京: 地质出版社, 1998: 31- 72.

[ 20 ] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[ M ]. 北京: 科学出版社, 1999: 96- 100.

[ 21 ] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征— 半变异函数[ J ]. 地理学报, 2000, 55( 4 ): 428- 438.

[ 22 ] 周慧珍, 龚子同, Lamp. 土壤空间变异性研究[ J ]. 土壤学报, 1996, 33( 3 ): 232- 241.

[ 23 ] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[ J ]. 应用生态学报, 1998, 9( 6 ): 651- 657.