

科尔沁沙地东南缘大青沟自然保护区 土壤水分的时空分布特征

张楠楠¹, 关文彬^{1,*}, 谢 静², 于明涛², 冶民生², 苏繁星²

(1. 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治部级重点实验室, 北京 100083)

摘要 用 TDR 分层对科尔沁沙地东南缘大青沟国家级自然保护区土壤水分进行定位观测, 采用多重比较等方法, 对土壤水分与环境因子关系的差异进行分析, 通过 Kriging 插值法用 Surfer 软件绘制土壤水分等值线图, 研究结果表明: 土壤含水率在不同的生长季节上变化, 表现为夏季 > 秋季 > 春季, 各层间没有显著差异; 月均 (5、7、9 月) 土壤含水率的变异系数坡向 > 植被类型 > 坡位; 层均 (0 ~ 60 cm) 土壤含水率变异系数坡位 > 植被类型 > 坡向 > 样带。月均土壤含水率从高到低依次为: 阔叶林 > 矮林 > 樟子松林 > 疏林草原 > 灌丛, 不同植被类型各层月均土壤含水率总体上差异极显著, 阔叶林远远高于其它植被类型; 层均土壤含水率, 各植被类型各月份间总体差异极显著, 总体趋势从高到低为: 阔叶林 > 矮林 > 樟子松林 > 灌丛 > 疏林草原, 阔叶林明显高于其它类型。

月均土壤含水率坡向间总体上差异显著, 层间无显著差异; 东、西坡与北坡有显著差异, 东西坡高于南北坡; 层均土壤含水率, 同一月份各个坡向间差异不明显, 7 月明显高于其它月份; 各月总体表现为: 东 > 西 > 南 > 北坡。月均土壤含水率除 31 ~ 45 cm 外, 3 个坡位间各层均有极显著差异, 下坡位明显高于上坡位与中坡位; 中坡位各层月均土壤含水率差异极显著; 层均土壤含水率各月份各坡向间差异极显著, 下坡位远大于上坡位与中坡位。

该区从沟底到坡顶的植被变化逐渐由湿生—中生—旱生逐渐过度, 垂直分布明显, 这类天然残遗植被与土壤水分及其与环境因子的关系, 对于促进周边沙地植被恢复具有重要的参照意义, 据此建议了大青沟周边沙地植被恢复模式相应的最低土壤水分阈值, 沙地 0 ~ 30 cm 土层土壤含水率 9.1% ~ 11.5%、8.1% ~ 9.0%、6.0% ~ 8.0%, 沙地 31 ~ 60 cm 土层土壤含水率 11.1% ~ 13%、8.5% ~ 11%、6.0% ~ 8.4%, 分别适合恢复为疏林、灌丛、半灌丛。

关键词 土壤含水率; 空间分布; 土壤水分阈值; 大青沟自然保护区

文章编号: 1000-0933 (2007) 09-3860-14 中图分类号: Q142 S154.1 文献标识码: A

Temporal and spatial distribution of soil moisture of Daqinggou Nature Reserve in the southeastern margin of Horqin sandy land, Inner Mongolia, China

ZHANG Nan-Nan¹, GUAN Wen-Bin^{1,*}, XIE Jing², YU Ming-Tao², YE Min-Sheng², SU Fan-Xing²

¹ Nature Reserve college of Beijing Forestry University, Beijing 100083, P. R. China

² Key Laboratory of Soil and Water Conservation and desertification combating Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (9) 3860 ~ 3873.

Abstract: Soil moisture distributions in selected transects in the Daqinggou Nature Reserve, the southeastern margin of Horqin sand in Inner Mongolia, China were measured with the Time Domain Reflectometry (TDR) technique. Data were

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30170180); 北京林业大学研究生自选课题基金资助项目 (05JJ005)

收稿日期: 2006-06-23; 修订日期: 2007-07-24

作者简介: 张楠楠 (1980 ~), 女, 吉林人, 硕士生, 主要从事自然保护区与生物多样性保护研究. E-mail: dada1980111@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: desertwx@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30170180) and Beijing Forest University Graduate Foundation (No. 05JJ005)

Received date 2006-06-23; **Accepted date** 2007-07-24

Biography ZHANG Nan-Nan, Master candidate, mainly engaged in nature reserve and biodiversity conservation. E-mail: dada1980111@126.com

analyzed by the Kriging interpolation method in the SURFER software. We found that the summer months had the highest variation , followed by the fall and spring months. There were no significant differences in soil moisture content among soil layers. The coefficient of variation (CV) of average monthly soil moisture (May , July , September) were the highest among slope aspects , followed by vegetation types and slope positions. Broadleaf forests had the highest average monthly soil moisture content followed by bosquet , *Pinus sylvestris* var. *mongolica* , Savanna , and shrub. Average monthly soil moisture changed significantly in different vegetation communities with the broadleaf forests being on top of the list. The average soil moisture for the entire soil profile varied significantly among vegetation types over time. The ranking from high to low was : broadleaf forests > bosquet > *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation > shrub > Savanna. Soil moisture content in the east and west facing slope was higher than that in the south and north facing slopes. Average soil moisture content of all layers changed little with slope directions in the same month. In east and west facing slopes , soil moisture in different months changed significantly with July being the highest. Overall east facing slopes had the highest changes , followed by west , south , and north facing slopes. The variations of average monthly soil moisture were significant among three slope positions for all layers , except for that of 31 — 45 cm depth. Soil moisture of the foothill was much higher than other slope positions. In the middle slope , the average monthly soil moisture in different layers varied significantly. The average soil moisture for the entire soil profile changed greatly among slope positions over time. We found a strong vertical vegetation gradient , including hygrocolumous-mesophilic-xerophytic. Based on our study , the lowest soil moisture thresholds for local vegetation restoration is proposed , soil moisture content of the 0 — 30 cm in depth is 9.1% — 11.5%、8.1% — 9.0%、6.0% — 8.0% , while that of 31 — 60 cm in depth is 11.1% — 13%、8.5% — 11%、6.0% — 8.4% , respectively for woodland , shrub , semishrub.

Key Words : soil moisture ; spatial distribution ; soil moisture threshold ; Daqinggou Nature Reserve

内蒙古大青沟国家级自然保护区位于号称 “八百里瀚海 ” 的科尔沁沙地的东南缘 , 沟外沙丘一望无际 , 沟内却是长白植物区系、内蒙古植物区系和华北植物区系交互作用产生的珍贵的天然残遗森林植被景观 , 群落类型极其特殊^[2]。该区以往的研究主要在森林群落稳定性^[3]、森林群落演替^[4]、森林群落物种多样性^[5]、植物群落起源^[1]、景观多样性^[6]及周边地区植被退化与恢复^[7 ~ 9]等方面 , 而对该地区的土壤水分的研究未见报道。水分是影响半干旱、干旱地区植被分布的重要环境因子之一 , 长期的人为干扰和自然环境的严酷导致了地区的植被退化。如能科学地揭示保护区内外不同的自然环境和人类活动条件下土壤水分时空分布特征及植被分布的规律 , 对于促进沙地植被恢复具有十分重要的生态意义。因而 , 本文采用先进的土壤含水率测试手段 , 对大青沟土壤水分的空间变异与环境因子的关系加以分析。

1 研究地区概况

大青沟地区处于全球气候变化的敏感区域 , 地处内蒙古通辽市科尔沁左翼后旗甘旗卡西南 24 km 处 , 南面与辽宁省彰武县接壤。地理位置为 E122°13' ~ 122°15' , N42°45' ~ 42°48' , 区内有大小两条深沟 , 谓之大小青沟。该区在中国气候区划上中属东北温带半湿润气候区向内蒙古温带半干旱气候区的过渡地带 , 年降水量 500 mm 左右 , 主要集中在 6 ~ 8 月份 , 约占全年降水量总量的 70% 以上 , 沟内年平均相对湿度比沟外大 20% ~ 25% ; 年日照时数在 2800 h 以上 , 年总辐射 543.79 J/ (cm²·a) ~ 585.62 J/ (cm²·a)。最高气温 29 ℃ , 最低气温 30 ℃ , 年平均气温 6 ℃ 左右。日平均气温超过 10 ℃ 的年积温在 3200 ℃ 以上 , 无霜期 120 d 左右。土壤属非地带性 , 以沙土为主 , 兼有沙壤土带 , 主要以固定沙丘为主 , 沟坡个别地段也有风积沙 , 冲积沙和淋溶现象^[1]。大青沟沙地残遗植被是中国特殊的生态系统类型 , 现残留的生态系统类型颇多、结构完整、十分茂密的天然阔叶林植被 , 其 “绿岛 ” 景观 , 与周边地区的沙坨形成鲜明的对照 , 具有较高的稳定性 , 在不足 9000hm² 的地域内 , 仅高等植物就达 700 余种 , 植被类型 20 余种^[10] , 具有华北、内蒙、长白 3 个植物区系的交汇性 ; 区内分布的水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、黄菠萝 (*Phellodendron amurense*)、紫椴 (*Tilia amurensis*) 等珍贵阔叶

树种及山葡萄 (*Vitis amurensis*) 等多种藤本植物均属第三纪残遗植物,表明了该区植被的古老性。大青沟保护区是沙漠化地区天然的生物多样性宝库,区内拥有丰富的动植物资源,珍禽、兽类、鱼类等百余种,国家级保护物种或本区特有种 20 余种,如野大豆 (*Glycine ussuriensis*)、科尔沁杨 (*Populus koerqinensis*) 等。这些物种种群及其组成的生物群落,将为周边的沙漠化地区生物群落、植被景观的恢复与重建,提供了丰富的种质资源^[2]。

2 研究方法

2.1 样带和样地的设计

在大青沟自然保护区内选设 5 条样带,选取 3 个时段于 2004 年进行测定,选取的 3 个时段分别为春末(5 月 20 日)、夏中(7 月 19 日)、秋初(9 月 23 日)。在当年测量的各月内,降雨量分别为 5 月份 45.3 mm、7 月份 138.7 mm、9 月份 28.1 mm,年平均降雨量为 439.7 mm。采用时域反射仪 (Time Domain Refletrometry TDR) 分层对土壤水分进行了土壤体积含水量的定位观测。TDR 是通过测定土壤的介电常数,进而推算土壤含水率。该方法能精确、快速和连续的在不取土样的条件下测定土壤含水率,是目前推广的一种新型的测定土壤含水率的方法^[1,12]。本次实验测定均在测试当天完成,测试前 3d 与测量当天在该地区无降雨,每个点重复 3 次测量,实验结果取其平均值进行统计,根据沟的走向每条样带间隔 1.5 ~ 2 km 选取植被类型与地形较典型地设置样带。样带设置是顺着大青沟的走向从北到南,沿沟的纵剖面顺次设置 5 条“U”形样带。每条样带均从沟顶→沟坡→沟底,每隔 10 m 布设一个点(沟顶向外围沙地辐射 200 m),布点兼顾不同的植被类型、地形、坡向等因素(图 1)。用 GPS 定点,记录每条样带上每个点的地理坐标、坡向、坡位、坡形等环境因子与植物群落特征(表 1)。

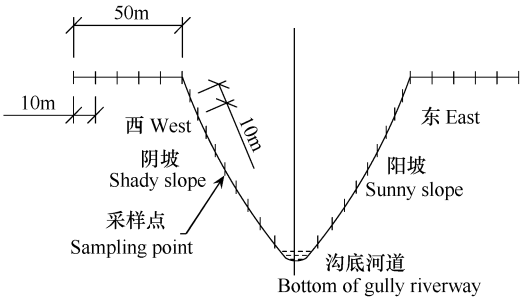


图 1 布点样带剖面简图

Fig. 1 Profile of sampling locations

水率的方法^[1,12]。本次实验测定均在测试当天完成,测试前 3d 与测量当天在该地区无降雨,每个点重复 3 次测量,实验结果取其平均值进行统计,根据沟的走向每条样带间隔 1.5 ~ 2 km 选取植被类型与地形较典型地设置样带。样带设置是顺着大青沟的走向从北到南,沿沟的纵剖面顺次设置 5 条“U”形样带。每条样带均从沟顶→沟坡→沟底,每隔 10 m 布设一个点(沟顶向外围沙地辐射 200 m),布点兼顾不同的植被类型、地形、坡向等因素(图 1)。用 GPS 定点,记录每条样带上每个点的地理坐标、坡向、坡位、坡形等环境因子与植物群落特征(表 1)。

2.2 数据的处理和计算

由于不同的土壤类型的介电常数的特征完全不同,对 TDR 所测数值需要重新进行标定,在沟顶、沟坡、沟底,分别用环刀在靠近探头测试点取原状土样,用烘干法求其体积含水量,重复测试 3 次求平均值后与 TDR 测值进行标定,求出标定方程分别为 $y = 1.5245x - 1.2243, R^2 = 0.9773$; $y = 0.7273x + 2.4611, R^2 = 0.9112$; $y = 1.1188x - 0.6255, R^2 = 0.9897$, 所统计数据均经过标定后计算得出。SURFER 软件是具有功能强大的绘制等值线图及三维立体图的软件包,能迅速地将离散的测量数据通过插值转换为连续的数据曲面^[13],应用 SURFER 8.0 软件,采取 Kriging 插值方法进行网格化处理生成土壤含水率分布等值线图;用 SPSS 软件对该区不同坡向、坡位、植被及不同样带之间的土壤含水率的变异系数进行计算,进而做单因素方差分析和多重比较。

3 结果和分析

大青沟地区在调查样线的主要植被类型及分布为:沟底是水曲柳林、春榆林(以下统称阔叶林);坡面中坡位除了科尔沁杨林(第 1 样带),其余表现为矮林景观,有小叶朴矮林、色木槭矮林、大果榆矮林、蒙古栎矮林等(以下统称矮林);上坡位是大果榆疏矮林、山里红灌丛、山荆子灌丛、胡枝子灌丛等(以下统称为灌丛)。

各样带 2004 年 5、7、9 月份用 TDR 监测的土壤含水率,用 SURFER 软件采取 Kriging 插值法进行网格化处理生成等值线与三维线框分布图(图 2 ~ 图 4)。

3.1 土壤水的空间变化

3.1.1 不同样带的土壤含水率变化

同一样带各层间月均土壤含水率没有显著差异,5 条样带间 0 ~ 60 cm 平均土壤含水率是 1、3 带明显高

表 1 大青沟内各条样带情况

Table 1 Transects characteristics in Daqinggou Nature Reserve					
位置概况 Site situation	样带 1 1 transect	样带 2 2 transect	样带 3 3 transect	样带 4 4 transect	样带 5 5 transect
坡向 Slope exposure	东,西 East ,West	东,西 East ,West	东,西 East ,West	东,西 East ,West	南,北 South ,North
坡顶海拔 Top elevation	253m	246m	251m	239m	230m
沟底生境特点 Habitat characteristics of the bottom	(1) 湿生,水面宽 2 米左右,河岸两侧地表非常湿润,土壤有较厚的腐殖层,主要为金银忍冬-水曲柳林	(2) 湿生,河面宽广,河岸两侧,地表非常湿润,土壤腐殖层深厚,为朝鲜柳林、春榆-水曲柳林	(3) 湿生,河面宽广,河岸两侧苔藓和蕨类植物丰富,土壤腐殖层深厚,为短梗五加-水曲柳林,长势良好	(4) 湿生,河岸两侧土壤疏松、湿润,土壤腐殖层较厚,为山荆子-春榆林,长势良好	(5) 湿生,有宽广河面,河岸地势平坦,苔草属植物丰富,为春榆-水曲柳林,乔木砍伐严重
沟坡生境特点 Habitat characteristics of the middle	(6) 湿润-中生,西坡较陡,东坡平缓为科尔沁杨林,上部为胡枝子灌丛	(7) 中生,主要为大果榆-小叶朴矮林,群落结构较复杂、长势良好;上部山里红灌丛	(8) 湿润-中生,东坡地形差异较大,为蒙古栎矮林,群落结构复杂;上部为山里红灌丛	(9) 中生-旱生,沟坡主要位铁杆蒿-大果榆矮林;上部为山荆子灌丛	(10) 旱生,坡形陡峭,有部分裸沙
沟顶生境特点 Habitat characteristics of the bottom	(11) 旱生,为铁杆蒿-榆树疏林草原	(12) 旱生,地表较硬,有鼠洞,为榆树疏林草原	(13) 旱生,地表较硬,为人工樟子松林	(14) 旱生,主要为大果榆疏林草原	(15) 旱生,地表坚硬,凸坡地表裸露,为大果榆疏林草原

(1) Hygrocolous ,the river width is about 2 meters ,the riversides it have more wet soil , and the soil has thick humus horizon , which mainly covered by *Lonicera maacki -Fraxinus mandshurica* ;(2) Hygrocolous ,it has wide river surface , and the riversides have highly wet soil and thick humus horizon ,which mainly covered by Form. *Salix koreensis* , Form. *Ulmus japonic - Fraxinus mandshurica* ;(3) Hygrocolous ,it has wide river surface , the riversides have lichen and species richness of fern and thick humus horizon , which covered by Form. *Acanthopanax sessiliflorus-Fraxinus mandshurica* with well growing ; (4) Hygrocolous ,riversides have wet and loose soil and thick humus horizon ,which covered by Form. *Malus baccata -Ulmus japonica* with well growing ; (5) Hygrocolous ,it has wide river surface , the slope of river sides is flat with abundant lichen , which covered by Form *Ulmus japonica-Fraxinus mandshurica* , though the trees fell seriously ;(6) Hygrocolous — mesophilous , sharp in the west slope ,while flat in the east with Form. *Populus keesqinensis* exist , and Form. *Lespedeza bicolor* at the top ;(7) Mesophilous , mainly Form. *Ulmusmacrocarpa-Celtis bungeana* , high complexity in the architecture , which covered by Form. *Crataegus pinnatifida* with well growing at the top ;(8) Hygrocolous — mesophilous , it has more differences between the east and west slopes , which covered by Form. *Quercus mongolicus* with high complexity in the architecture of plant community , and the top covered with Form. *Crataegus pinnatifida* ;(9) Xerophytic — mesophilous , it mainly covered by Form. *Artemisia sacrorum-Ulmus macrocarpa* which exists in the middle of slope , and the top covered by Form . *Siberian crabapple* ;(10) Xerophytic ,sharp slope with scattered sandy soil ;(11) Xerophytic ,it mainly covered by Form. *Artemisia sacrorum -Ulmus pumila* , which exists in the open wood steppe ;(12) Xerophytic , the soil is hard more mousehole , itcovered by Form. *Ulmus pumila* , which exists in the open wood steppe ; (13) Xerophytic , it has hardstand which covered by Form. *Pinus sylvestris* var. *mongolica* man-made forestry ;(14) Xerophytic , it mainly covered by Form. *Ulmus macrocarpa* , which exists in the open wood steppe ; (15) Xerophytic ,it has hardstand and bare convex slope ,which covered by Form. *Ulmus macrocarpa* which exists in the open wood steppe

于 4、5 带。表层 0 ~ 15cm 月均土壤水分差异显著,1 带 > 3 带 > 2 带 > 5 带 > 4 带,1、3 带也明显高于 4、5 带(表 2)。主要由于表层受外界环境的作用和影响最直接,受降水、温度、通风状况等气象因子的影响^[4]比其他层次受的影响更大,加之该区地处半干旱地区,沙土缺乏毛管孔隙,土壤水分移动性很差,地表蒸发作用只影响到 0 ~ 15cm 以上的土层^[1]。

表 2 土层深度-样带的土壤含水率方差分析 (ANOVA) 和多重比较 (LSD)

样带 Transect	土壤层 (cm) Soil layer					F 值 F value
	0 ~ 15cm	16 ~ 30cm	31 ~ 45cm	46 ~ 60cm	0 ~ 60cm	
1 样带 1 transect	13. 18c	12. 15c	14. 16c	12. 40cd	12. 91cd	0. 18
2 样带 2 transect	10. 64ce	9. 06dc	11. 41cd	9. 31dc	10. 10de	1. 93
3 样带 3 transect	11. 81cd	9. 63dc	12. 55cd	11. 83cd	11. 31d	0. 89
4 样带 4 transect	8. 45e	7. 33ed	10. 66cd	9. 89dc	8. 85e	1. 33
5 样带 5 transect	9. 10de	7. 94ed	8. 34ed	7. 34ed	8. 25e	0. 42
F 值 F value	2. 54 **	2. 27	1. 55	1. 20	6. 67 ***	

同行列中字母相同表示无显著差异 ($P > 0.05$) ; * * 表示 $P = 0.01$ 的极显著水平 ; * * * 表示 $P = 0.001$ 的极显著水平 ,下同

The same letter indicate no significant difference ($P > 0.05$) , * * $P < 0.01$, * * * $P < 0.001$,the same below

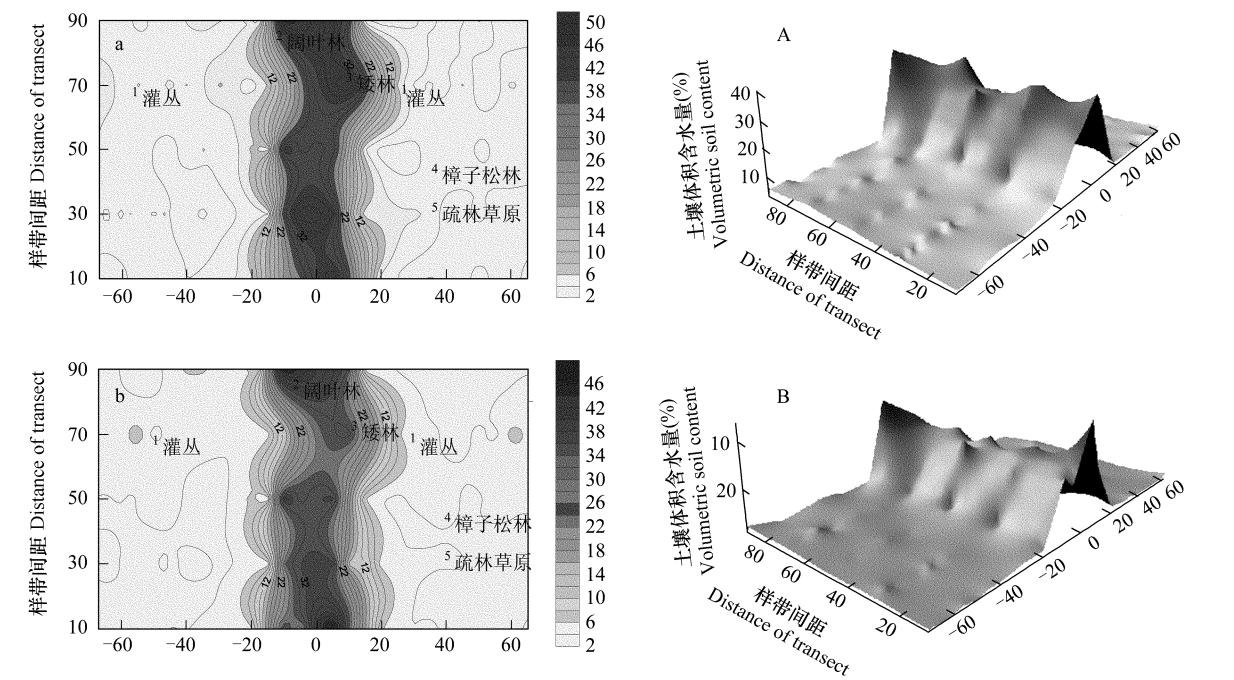


图 2 2004 年 5 月各层土壤水分等值线图与三维线框图

Fig. 2 The contour map and 3D wire frame map of the soil moisture in different layers in May ,2004

a ,b 及 A ,B 分别表示 :在 0 ~15cm ,16 ~30cm 层土壤水分值 ,对于前 4 条样带 ,在 X 轴从 -60 至 0 方向分别表示 ,西坡坡顶 ,沟坡部分和沟底部分 ,从 0 至 60 分别表示沟底 ,东坡沟坡及坡顶部分 ,第 5 条样带则 0 的左侧代表南坡 ,其右侧代表北坡。各条样带从左至右均按照从阳坡至阴坡过渡 ;Y 轴坐标从 10 至 90 每间隔 20 分别代表从 1 至 5 的 5 条样带 ;下同

a ,b and A ,B,respectively represent the SMC in the 0 ~15cm ,16 ~30cm ;for the first four transects in the x axis from -60 to 0 in order represent the top ,the middle and the bottom of west slope ;from 0 to 60 in order represent the bottom ,middle and the top of east slope ,but for the fifthly transect in the left side of 0 represent south slope ,the contrary is the north slope. Y axis set the mark from 10 to 90 at interval of 20 represent respectively from the first transect to the fifth transect ;the same below ;

1 Shrub 2 Broad-leaved forests 3 Bosquet 4 *Pinus Sylvestris* var. *mongolica* 5 Savanna the same below

3.1.2 不同植被类型的土壤含水率变化

根据前述各样带监测数据求算不同深度土层土壤含水率的变异系数如表 3。由表 3 可知 ,不同植被类型各层土壤含水率的变异依次为 :阔叶林 > 灌丛 > 矮林 > 樟子松林 > 疏林草原 ,其中阔叶林变异较大 ,其它植被类型变异很小。疏林草原和樟子松林的变异系数较小与其所处的坡位有关 ,由于二者都处于坡顶位置 ,坡顶虽地表覆盖物少 ,但地势相对平缓而且起伏小 ,有利于土壤水分在各层平稳入渗。

表 3 不同植被类型在不同深度土层上的变异系数

变异系数 Variation coefficient	土壤层 Soil layer (cm)				平均 Average
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	
阔叶林 Broad-leaved forests	3.20	5.57	4.56	5.94	4.82
矮林 Bosquet	1.75	1.56	1.28	1.00	1.40
灌丛 Shrub	2.01	2.56	1.48	1.15	1.80
疏林草原 Savanna	1.53	0.92	0.86	1.20	1.13
樟子松林 <i>Pinus Sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	1.24	1.27	0.62	1.35	1.11

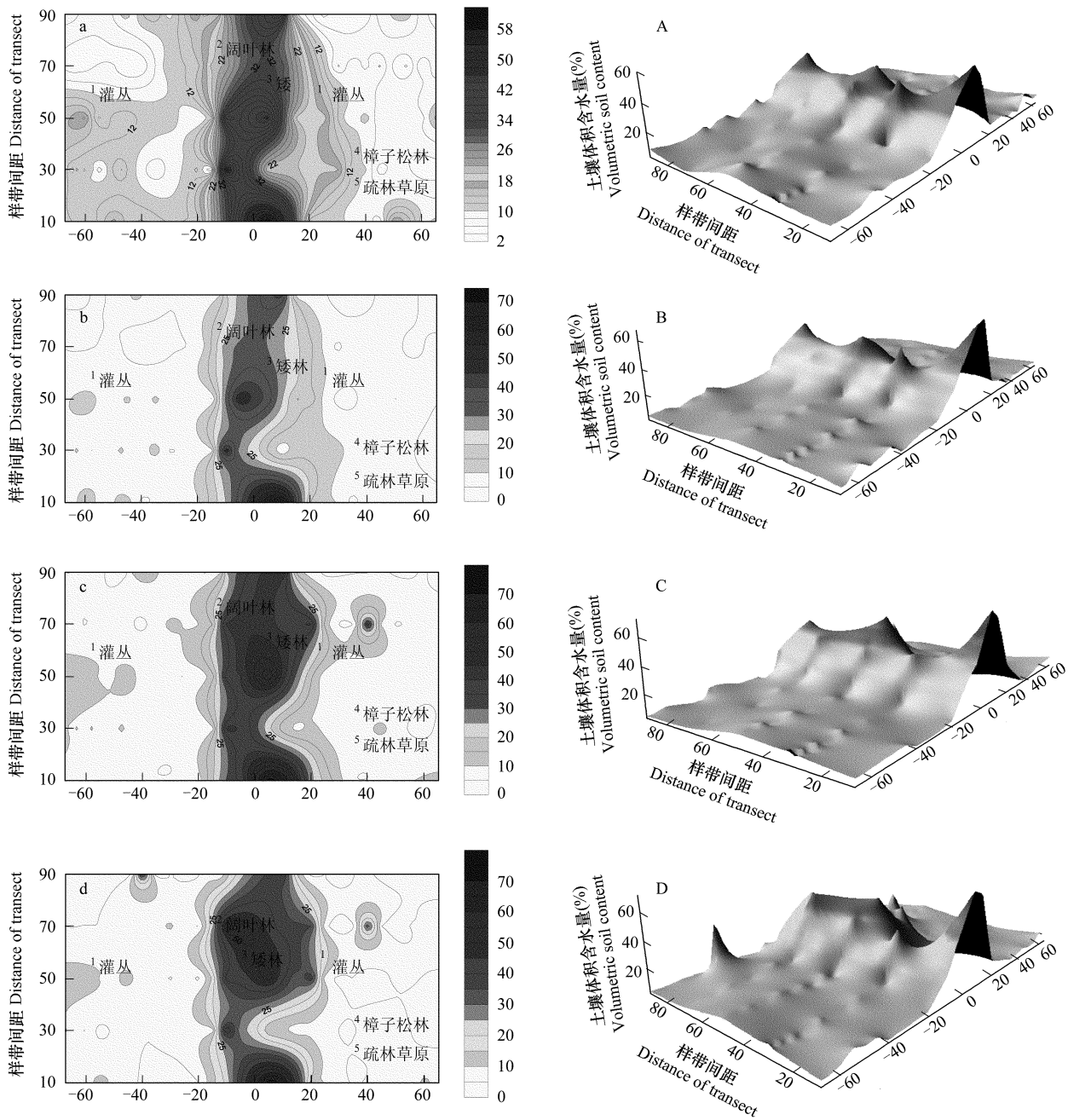


图 3 2004 年 7 月各层土壤水分等值线图与三维线框图

Fig. 3 The contour map and 3D wire frame map of the soil moisture in different layers in July ,2004

a , b , c , d 及 A , B , C , D 分别表示 : 在 0 ~ 15 cm , 16 ~ 30 cm , 31 ~ 45 cm , 46 ~ 60 cm 层土壤水分值
a , b , c , d and A , B , C , D respectively represent the soil moisture in the 0 - 15 cm , 16 - 30 cm , 31 - 45 cm , 46 - 60 cm

在不同土层深度上的变异系数阔叶林、矮林和灌丛较大 , 樟子松林、疏林草原较小。其中阔叶林各层变异系数最高 , 主要由于以湿生树种为主的阔叶林位于河边土壤含水率变化的最活跃的地带 , 矮林和灌丛在前两层月均土壤含水率变化大于后两层 , 并且矮林随土壤深度增加其变异系数表现为逐渐减小的趋势 , 樟子松林的变异系数在后两层波动较前两层剧烈 , 其原因在于 , 樟子松林主要根系层在 25 ~ 50 cm 土层^[15] , 该层是水分吸收的主要集中区域 , 土壤水分主要受植物根系蒸腾作用的影响较大 , 疏林草原各层变异系数波动不大 , 总体趋势随深度的增加而减小 , 相对平稳。

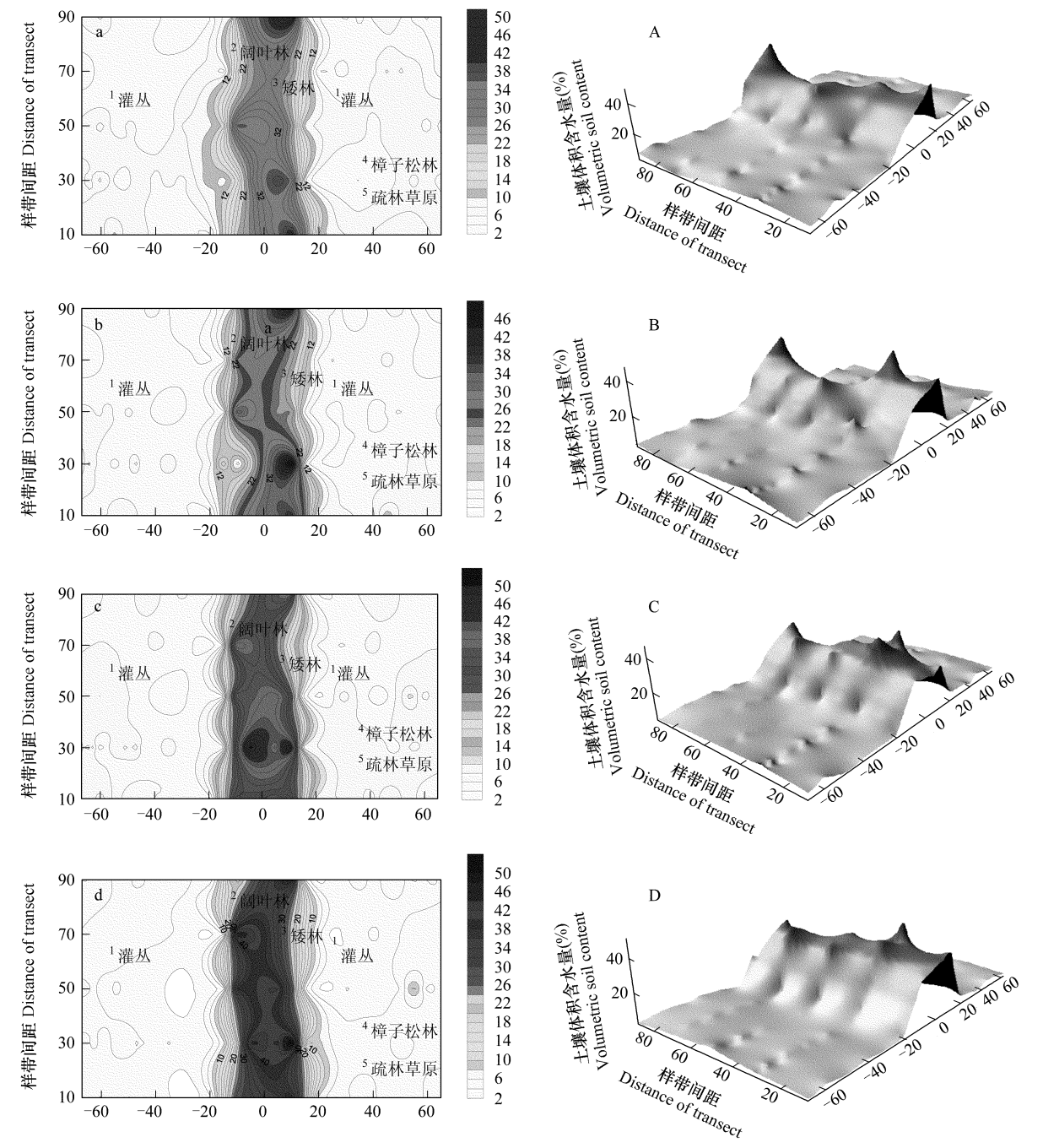


图 4 2004 年 9 月各层土壤水分等值线图与三维线框图

Fig. 4 The contour map and 3D wire frame map of the soil moisture in different layers in Sep, 2004

a, b, c, d 及 A, B, C, D 分别表示 在 0 ~ 15 cm, 16 ~ 30 cm, 31 ~ 45 cm, 46 ~ 60 cm 层土壤水分

a, b, c, d and A, B, C, D respectively represent the soil moisture in the 0 ~ 15 cm, 16 ~ 30 cm, 31 ~ 45 cm, 46 ~ 60 cm

通过方差分析可知,不同植被类型各不同深度土层月均土壤含水率之间总体上差异极为显著,通过 F 值看出其差异性随着土壤深度的增加而降低。经多重比较可知,无论是各层的还是 4 层平均,阔叶林月均土壤含水率和其它植被类型间存在着显著差异,而且其它 4 种植被类型间也在不同层表现出一定差异,矮林与沙地人工樟子松林,其它各层基本接近,但灌丛和疏林草原各层上二者均无显著性差异;与阔叶林、矮林差异显著,月均土壤含水率的总趋势从高到低依次为:阔叶林 > 矮林 > 樟子松林 > 疏林草原 > 灌丛(表 4)。

表 4 土层深度-植被类型间的土壤含水率方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

植被类型 Vegetation type	土壤层 Soil layer (cm)					F 值 F value
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	0 ~ 60	
阔叶林 Broadleaf forests	32. 57ab	30. 76b	37. 63a	37. 15a	33. 95a	2. 77 *
矮林 Bosquet	10. 06c	8. 26c	9. 87c	9. 51c	9. 42c	0. 71
灌丛 Shrub	6. 73d	5. 29e	6. 91d	5. 02e	4. 88e	5. 57 ***
疏林草原 Savanna	6. 65d	5. 42e	6. 68d	5. 11e	5. 97e	11. 92 ***
樟子松林 Pinus Sylvestris var. mongolica	8. 62cd	7. 14ce	9. 36c	5. 95ec	8. 40ce	2. 76 *
F 值 F value	261. 95 ***	219. 00 ***	164. 83 ***	141. 42 ***	294. 13 ***	

该区的植物分布从沟底到沟沿逐渐由湿生—中生—旱生逐渐过渡 ,垂直分布明显。土壤含水率变化随着土壤深度的增加而呈现出降低—升高—降低的趋势 ,主要由于植被的分布 ,地被物较多 ,土壤表层有不同程度的腐殖质层 ,加之 ,沟坡以沙土为主 ,沙土持水性差 ,降水时土壤水分入渗快。

3. 1. 3 不同坡向的土壤含水率变化

不同坡向上 0 ~ 60 cm 范围各层的土壤含水率变异趋势表现为 :东、西坡随土壤含水率深度的增加而增加 ,北坡变化幅度较小 ,南坡变化幅度剧烈 ,南坡变化趋势表现先微弱增加然后下降又增大的趋势 (表 5) ;月均土壤含水率 0 ~ 60 cm 总体趋势从高到低的表现为东 > 西 > 南 > 北 (表 6)。由方差分析可知 ,坡向间总体上差异显著 ,4 层间均无显著差异 ,多重比较表明 0 ~ 60 cm 月均土壤含水率东、西坡与北坡有显著差异 ,东西坡高于南北坡 ,南坡略高于北坡 (表 6)。主要由于南-北坡的 5 号样带处于沟尾 ,南坡冬季坡顶吹雪较多 ,春季土壤水分较高 ,加之南坡植被稀少 ,蒸腾耗水及毛管导水供地表蒸发也相应的减少 ,在干旱、半干旱地区 ,植被蒸腾作用对深层土壤湿度的控制作用是比较普遍的 [16 ,17]。

表 5 土层深度-坡向上的变异系数

变异系数 Variation coefficient	土壤层 Soil layer (cm)				平均 Average
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	
东 East	10. 66	13. 34	15. 95	19. 96	14. 98
西 West	8. 66	9. 65	11. 43	14. 82	11. 14
北 North	13. 03	12. 71	12. 78	15. 53	13. 51
南 South	6. 63	8. 49	1. 28	10. 46	6. 72

另外 ,由图 4 可以看出 ,东、西、南坡月均土壤含水率随着土壤深度的增加均为先减小而后增加 ,再减小的趋势。

表 6 土层深度-坡向间的土壤含水率方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

坡向 Slope exposure	土壤层 Soil layer (cm)					F 值 F value
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	0 ~ 60	
东 East	11. 32bc	9. 97bc	13. 13b	11. 65bc	11. 52bc	1. 14
西 West	10. 83bc	9. 18c	11. 38bc	10. 15c	10. 39bc	1. 11
北 North	8. 47cd	7. 59dc	8. 78cb	7. 29dc	8. 03d	0. 13
南 South	9. 68bc	8. 27cd	7. 93db	7. 39dc	8. 32cd	0. 53
F 值 F value	0. 91	0. 68	1. 74	1. 19	4. 42 ***	

3. 1. 4 不同坡位的土壤含水率变化

不同坡位的月均土壤含水率变异系数下坡位的变异系数远大于上坡位与中坡位 ,上坡位与中坡位的变异系数接近 ,变异很小 (表 7)。

表7 土层深度-坡位上的变异系数

变异系数 Variation coefficient	土层层 Soil layer (cm)				平均 Average
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	
上坡位 Upper slope	0.43	0.24	0.47	0.50	0.41
中坡位 Middle slope	0.56	0.71	0.58	0.80	0.66
下坡位 Lower slope	3.25	3.39	6.02	9.49	5.54

从方差分析表 8 中得出 除 31 ~ 45 cm 外 3 个坡位间各层均有极显著差异 ,月均土壤含水率下坡位明显高于上坡位与中坡位 ,中坡位各层月均土壤含水率差异极显著 46 ~ 60 cm 低于其它层。

表8 土层深度-坡位间的土壤含水率方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

坡位 Position	土层层 Soil layer (cm)					F 值 F value
	0 ~ 15	16 ~ 30	31 ~ 45	46 ~ 60	0 ~ 60	
上坡位 Upper slope	6.43d	5.22dc	7.09d	6.65dc	6.35d	1.055
中坡位 Middle slope	7.04d	5.37ed	6.73d	4.34e	5.87d	7.90 ***
下坡位 Lower slope	10.06c	8.26c	9.87c	9.51c	9.43c	0.70
F 值 F value	10.18 ***	11.80 ***	2.83	3.97 **	21.74 ***	

3.2 土壤水分季节动态

各月份的监测结果 0 ~ 60 cm 层土壤含水率从高到低顺序为 7 月份 > 9 月份 > 5 月份 (图 5)。最低值出现在旱季 5 月份 ,此时气温升高但降水比较少而且植物根系也开始活动 ,土壤水分易蒸散消耗 ,7 月份是降雨量最集中的季节 ,土壤含水率达到最大 ,随着降雨量的增加而迅速增加 ,9 月份受气温降低和降水减少的影响 ,植物的蒸腾作用降低 ,土壤水分消耗比较少。

甘肃民勤的绿洲荒漠过度区土壤含水率的年际变化可以分为土壤水积累期 (4 ~ 6 月份)、消耗期 (7 ~ 8 月份)、稳定期 (10 月至翌年春天) 3 个阶段 ,在 4 ~ 6 月份是积雪融化期 ,土壤水分得到有效补给 ,7 月份影响土壤含水率的因素较多 ,除了植物蒸散和气温作用外 ,降雨起到重大作用 [18]。大青沟地区则不同 ,7 月份的土壤含水率并没有因为植物进入生长盛期而低于 9 月份 ,表明在季节变化上 ,植物的蒸腾作用不是影响该地区土壤水分变化的主导因素 ,该结论与章古台沙地樟子松人工林土壤水分动态研究的研究结果一致 [15]。说明在我国由于各地的区域和气候条件的差异 ,不同的荒漠化地区土壤水分的季节变化规律存在不同差异。

3.2.1 不同月份各样带之间的比较

层均土壤含水率各月份样带间的变异系数较小 ,低于植被类型间的变异系数 ,差异不大 ,7 月份略高 (表 9) ,说明可以应用取样数据进行其它环境因子分析。

表9 月份-植被类型间与月份-样带间土壤含水率变异系数

变异系数 Variation coefficient	Table 9 Variation coefficient of SMC in Month-vegetation type and Month-Transect						
	5 月份 May	7 月份 July	9 月份 September	样带 Transect	5 月份 May	7 月份 July	9 月份 September
阔叶林 Broad-leaved forest	2.60	6.21	3.49	1 样带 1 transect	0.82	0.94	1.00
矮林 Bosquet	1.16	2.72	2.36	2 样带 2 transect	0.87	1.23	0.91
灌丛 Shrub	4.13	2.58	3.64	3 样带 3 transect	0.91	1.19	0.94
疏林草原 Savanna	0.32	1.22	0.53	4 样带 4 transect	1.07	1.14	0.99
樟子松林 Pinus Sylvestris var. mongolica	0.17	0.12	0.45	5 样带 5 transect	0.78	1.10	0.90

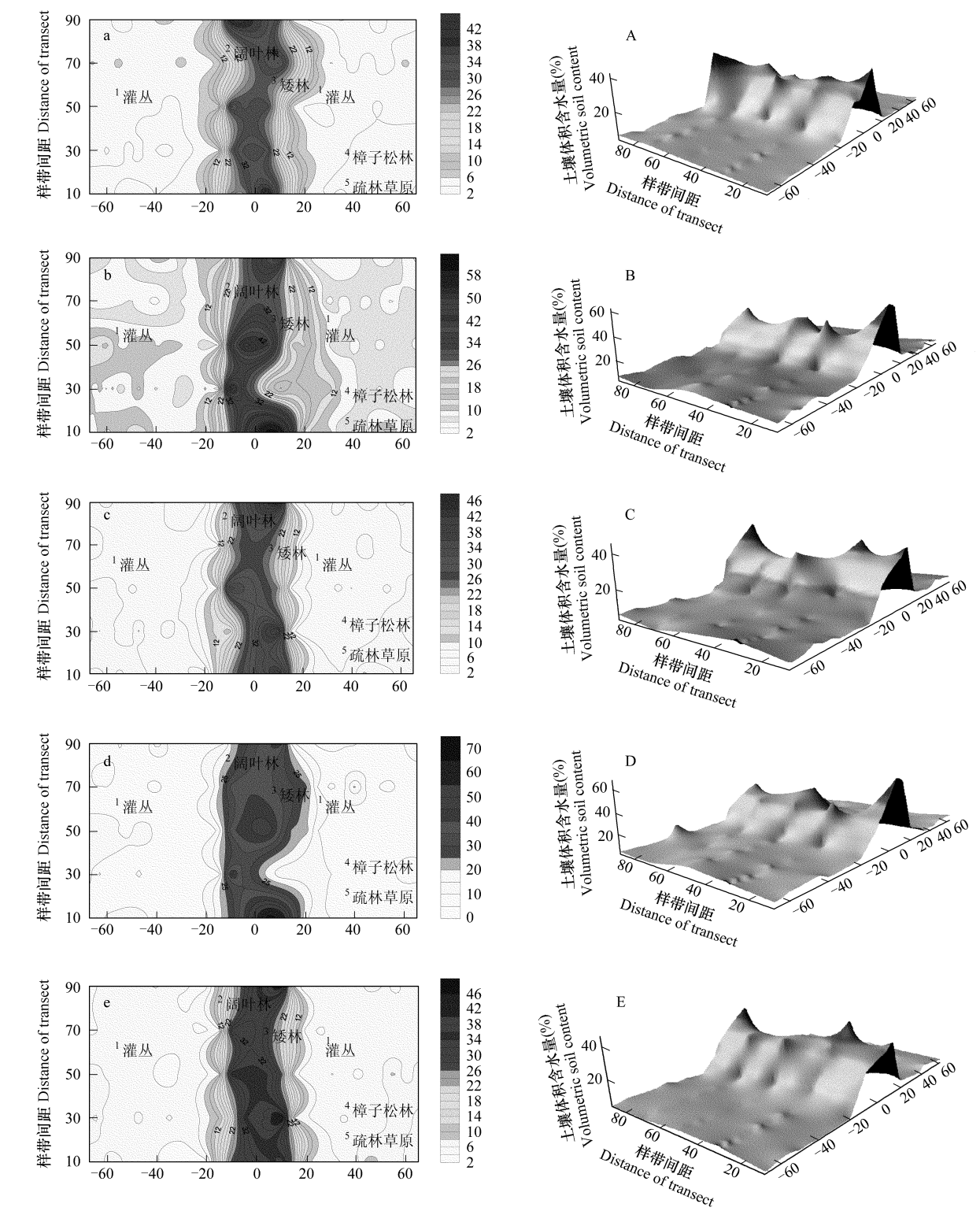


图5 各个季节的土壤水分等值线图与三维线框图

Fig.5 The contour map and 3D wire frame map of the soil moisture in the growth season
a ,b ,c 及 A ,B ,C 分别表示 2004 年 5 ,7 ,9 月 0 ~30 cm 层土壤水分平均值 d ,e 及 D ,E 分别表示 2004 年 7 ,9 月 0 ~60 cm 层土壤水分平均值
a ,b ,c 及 A ,B ,C 分别表示 2004 年 5 ,7 ,9 月 0 ~30 cm 层土壤水分平均值 d ,e 及 D ,E 分别表示 2004 年 7 ,9 月 0 ~60 cm 层土壤水分平均值

0 ~ 60 cm 土壤深度平均土壤含水率 ,除 3 样带各月份差异显著外 (表 10) ,其它样带各月份间、各月份各样带间均无显著差异。各样带的层均土壤含水率从高到低依次为 :1 样带 > 3 样带 > 2 样带 > 4 样带 > 5 样带 ;各月份层均土壤含水率从高到低依次为 :7 月份 > 9 月份 > 5 月份。

表 10 月份-样带间的土壤含水率方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

Table 10 ANOVA and LSD of SMC in Month-Transect					
样带 Transect	5 月 May	7 月 July	9 月 September	平 均 Average	F 值 F value
1 样带 1 transect	9.08cd	16.94c	10.80cd	12.27c	1.90
2 样带 2 transect	7.80d	11.04cd	10.20cd	9.68cd	0.84
3 样带 3 transect	8.18d	14.67cd	9.52cd	10.79cd	2.85 *
4 样带 4 transect	7.56d	11.35cd	6.98d	8.63d	1.79
5 样带 5 transect	8.17d	9.02d	7.52d	8.24d	0.17
F 值 F value	0.08	1.68	0.68	1.77	

3.2.2 不同月份各植被类型间的差异

土壤含水率各植被类型变异系数 ,阔叶林、矮林、灌丛变异较大 ,疏林草原、樟子松林变异较小 (表 9)。0 ~ 60 cm 土壤深度层均土壤含水率 ,各植被类型的各月份间总体差异极显著总体趋势从高到低为 :阔叶林 > 矮林 > 樟子松林 > 灌丛 > 疏林草原 ,阔叶林明显高于其它类型 ,矮林与人工樟子松林适中、二者接近 ,灌丛与疏林草原最低、二者相近 ;同一植被类型各月份间差异显著或极显著 ,7 月份最高 ,9 月份、5 月份次之 (表 11)。

表 11 月份-植被类型间的土壤含水率的方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

Table 11 ANOVA and LSD of SMC in Month-vegetation type					
植被类型 Vegetation type	5 月 May	7 月 July	9 月 September	平均 Mean	F 值 F value
阔叶林 Broad-leaved forest	27.59b	39.03a	32.35b	32.99b	2.47 *
矮林 Bosquet	7.89d	12.73c	6.59d	9.07d	5.92 **
灌丛 Shrub	4.50e	7.85d	4.88e	5.74d	23.64 ***
疏林草原 Savanna	4.16e	7.43d	5.43d	5.67d	49.67 ***
樟子松林 Pinus Sylvestris var. mongolica	4.73de	10.23cd	6.89d	7.28d	14.67 **
F 值 F value	128.12 ***	76.17 ***	242.34 ***	291.12 ***	

3.2.3 不同月份各坡向间的差异

土壤含水率各坡向的变异系数 ,南、西坡变异较大 ,东、北坡异较小 (表 12)。0 ~ 60 cm 土壤深度层均土壤含水率 ,同一月份各个坡向间差异不明显 ,东坡各月份间差异显著、西坡月份间差异极显著 ,7 月明显高于其它月份 (表 13)。

表 12 月份-坡向间与月份-坡位间土壤含水率变异系数

Table 12 Variation coefficient of SMC in Month-Slope exposure and Month-Slope position							
变异系数 Variation coefficient	5 月份 May	7 月份 July	9 月份 September	坡位 Slope position	5 月份 May	7 月份 July	9 月份 September
东 East	0.87	0.97	0.93	上坡位 upper slope	4.65	1.74	5.12
西 West	0.94	1.21	0.97	中坡位 middle slope	4.06	3.36	5.28
北 North	0.80	0.80	0.74	下坡位 lower slope	1.16	1.94	2.34
南 South	0.81	1.87	1.37				

0~60cm 土壤深度层均土壤含水率各月总体表现为:东>西>南>北坡(图5)。

表 13 月份-坡向间的土壤含水率方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

Table 13 ANOVA and LSD of SMC in Month-Slope exposure

坡向 Slope exposure	5 月 May	7 月 July	9 月 September	平均 Average	F 值 F value
东 East	8.43d	14.04c	10.10cd	10.86cd	2.69 *
西 West	7.92d	12.93c	8.88d	9.91d	3.94 * *
北 North	6.05d	8.77dc	8.28d	7.70d	0.25
南 South	10.12cd	9.25dc	6.81d	8.43d	0.56
F 值 F value	0.42	0.99	0.44	1.07	

3.2.4 不同月份各坡位的差异

总体上来看 0~60 cm 土壤深度层均土壤含水率各月份各坡位间的变异系数大于植被类型、坡向、样带间的变异系数,从大到小依次为 9 月份、5 月份、7 月份(表 12)。

0~60 cm 土壤深度层均土壤含水率,各月份各个坡向间差异极显著,下坡位远大于上坡位与中坡位(表 14),各坡位 0~30 cm 的土壤含水率 5 月份相差较小,在 7 月份与 9 月份相差较大(图 5)。

表 14 月份-坡位间的土壤含水率方差分析 (ANOVA)和多重比较 (LSD)

Table 14 ANOVA and LSD of Soil moisture in Month/ Slope position

坡位 Slope position	5 月份 May	7 月份 July	9 月份 September	平均 Average	F 值 F value
上坡位 upper slope	4.43e	8.39d	4.86e	5.89e	9.63 ***
中坡位 middle slope	4.64e	7.74d	4.90e	5.76e	17.82 ***
下坡位 lower slope	7.89d	12.73c	6.59d	6.99d	5.92 ***
F 值 F value	3.84 **	5.23 ***	5.14 **	11.28 ***	

3.3 土壤水分阈值

章古台沙地人工樟子松沙丘下部 0~50 cm 波动范围是 5.05%~6.32%;沙丘上部为 4.61%~8.23%^[15];中国科学院奈曼沙地定位研究站观测 0~60 cm 范围,丰水年(1986)沙地人工樟子松林的土壤含水率波动范围在 5.47%~5.91%;次水年(1988)2.95%~3.58%^[19-20]。根据大青沟周边土壤水分变异分析的结果,采用平均数±2 倍标准差设置置信区间,结合以往周边地区研究结果适度调整,建议大青沟周边沙地植被恢复模式的最低土壤水分阈值如表 15。

表 15 大青沟周边沙地植被恢复模式最低土壤水分阈值

Table15 The lowest threshold of SMC in vegetation restoration model around Daqinggou

恢复模式 Restoration model	立地 Site 沙丘 Dune	5 月 May		7 月 July		9 月 September		平均 Average	
		0~30cm	31~60cm	0~30cm	31~60cm	0~30cm	31~60cm	0~30cm	31~60cm
疏林 Wood land	下部 Lower	7.1~9.0	8.6~10.0	11.1~15	13.1~16.0	8.1~10.0	8.6~13.0	9.1~11.5	11.1~13.0
灌丛 Shrub	中下部 Middle-upper	5.0~7.0	5.6~8.5	8.6~11.0	9.1~13.0	6.6~8.0	7.0~8.5	8.1~9.0	8.5~11.0c
半灌丛 Subshrub	顶部 Upper	4.0~5.0	4.5~6.0	7.5~8.5	7.5~9.0	5.5~6.5	5.5~7.0c	6.0~8.0	6.0~8.4

4 结论与建议

4.1 大青沟及其周边地区土壤含水率在不同的生长季节上变化,表现为夏季>秋季>春季,各层间没有显著差异;月均土壤含水率的总趋势从高到低依次为:阔叶林>矮林>樟子松林>疏林草原>灌丛,不同植被类型各不同深度土层月均土壤含水率之间总体上差异极为显著,阔叶林和其它植被类型间存在着显著差异,矮林

与沙地人工樟子松林、灌丛和疏林草原总体上无显著性差异。0~60 cm 土壤深度层均土壤含水率,各植被类型的各月份间总体差异极显著。总体趋势从高到低为:阔叶林>矮林>樟子松林>灌丛>疏林草原。阔叶林明显高于其它类型,矮林与人工樟子松林适中、二者接近,灌丛与疏林草原最低、二者相近。同一植被类型各月份间差异显著或极显著。7 月份最高,9 月份、5 月份次之。月均土壤含水率的变异系数坡向>植被类型>坡位。层均土壤含水率变异系数坡位>植被类型>坡向>样带。

4.2 月均土壤含水率坡向间总体上差异显著,层间均无显著差异。东、西坡与北坡有显著差异,东西坡高于南北坡,南坡略高于北坡。主要由于南-北坡的 5 号样带处于沟尾,南坡冬季坡顶吹雪较多,春季土壤水分较高,加之南坡植被稀少,蒸腾耗水及毛管导水供地表蒸发也相应的减少。层均土壤含水率,同一月份各坡向间差异不明显,东坡各月份间差异显著、西坡月份间差异极显著。7 月明显高于其它月份,各月总体表现为:东>西>南>北坡。

4.3 月均土壤含水率除 31~45 cm 外,3 个坡位间各层均有极显著差异,下坡位明显高于上坡位与中坡位;中坡位各层月均土壤含水率差异极显著,46~60 cm 低于其它层。层均土壤含水率各月份各坡向间差异极显著,下坡位远大于上坡位与中坡位,各坡位 0~30 cm 的土壤含水率,5 月份相差较小,在 7 月与 9 月相差较大。

4.4 大青沟地区从沟底到坡顶的植被变化逐渐由湿生—中生—旱生逐渐过度,垂直分布明显,这类天然残遗植被与土壤水分及其与环境因子的关系,对于促进周边沙地植被恢复具有重要的参照意义,大青沟周边沙地植被恢复模式的最低土壤水分阈值,沙地 0~30 cm 土层土壤含水率 9.1%~11.5%、8.1%~9.0%、6.0%~8.0%;沙地 31~60 cm 土层土壤含水率 11.1%~13.0%、8.5%~11.0%、6.0%~8.4%,分别适合恢复为疏林、灌丛、半灌丛。

References :

[1] Zheng Y R. The origin of plant community in Daqinggou. *Scientia Silvae Sinicae*,1998,34 (6) :22—28.

[2] Guan W B ,Xie C H. The analysis of Landscape and Community Diversity in Daqinggou National Natural Reserves in Ke'rqin lands. Beijing : China Forestry Press ,2002. 333—345.

[3] Zheng Y R. Stability of Daqinggou forest communities. *Acta Ecologica Sinica* ,1999 ,19 (4) :578—580.

[4] Zheng Y R. Succission prediction of the forest community in Daqinggou , Inner Mongolia. *Scientia Silvae Sinicae* ,1999 ,35 (2) :22—25.

[5] Zheng Y R. Species diversity of Daqinggou forest plant community. *Chinese Biodiversity* ,1998.6 (3) :191—196.

[6] Guan W B ,Zeng D H ,Jiang F Q. Ecological study on relationship between desertification process and vegetation dynamics in west of northeast China Vegetation classification. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2000 ,11 (6) :907—911.

[7] Guan W B. Restoration of Damaged Vegetation in Sandy desertification region in the Western Part of Northeast China. *Research of Soil and Water Conservation* ,2000 ,7 (1) :9—14 29.

[8] Guan W B ,Zeng D H ,Jiang F Q. Ecological studies on the relationships between the process of desertification and vegetation dynamics in the west of Northeast China :community diversity and desertification process. *Acta Ecologica Sinica* ,2000 ,20 (1) :93—98.

[9] Jiang F Q ,Cao C Y ,Zeng D H. Degradation and restoration of ecosystems on Keerqin sandy land. Beijing : China Forestry Press ,2002. 108—122.

[10] Cao X S ,Nan Y G ,Zhu T Y ,*et al.* A study on the relic forest vegetation community in Daqinggou , Inner Mongolia and forestation problem in Xiliahe watershed. *Acta Phytocologica Sinica* ,1982 ,6 (3) :185—206.

[11] Topp G C ,Davis J L ,Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content :measurements in coaxial transmission lines. *Water Resource Res* ,1980 ,16 :574—582.

[12] Gong Y S ,Li Z Z ,Li C Y. Measurement of Crop Water Requirements and Crop Coefficients Using Time Domain Reflectometry. *J Chin Agric Univ* ,1998 ,3 (5) :61—67.

[13] Bai S B ,Chen Y ,Wang J. An introduction to nine gridding methods and their application in surfer version 7.0. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* ,2002 ,24 (2) :157—162.

[14] Chen H B ,Sun C Z ,An F ,*et al.* A Study on Forest Soil Water Features of Loess Plateau Gully and Hilly Region-Vertical and Seasonal Variation Soil Water. *Journal of Northwest Forestry University* 2003 ,18 (4) :13—16.

[15] Bai X F ,Wang G C ,Zhang R S ,*et al.* Soil water dynamics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands in Zhanggutai areas.

Journal of Liaoning Forestry Science & Technology ,2004 2 :11 — 13.

[16] Chen Y J ,Guan S Y ,Li S L , *et al.* Soil Water Regime of Hunshandake Sandy Land in Inner Mongolia. Journal of Arid Land Resources and Environment ,2000 ,14 (1) 80 — 85.

[17] Ma K M ,Fu B J ,Liu S L , *et al.* Multiple-scale soil moisture distribution and its implications for ecosystem restoration in an arid river valley , China. Land Degradation & Development ,2004 ,15 :75 — 85.

[18] Wang B ,Cui X H ,Ma Q L. Water and heat balance and its coupling simulation at transitional region between oasis and desert. Beijing :Chinese Scientific and Technological Press 2003.

[19] He Z B ,Zhao W Z. Characteristics of Soil Moisture of Different Vegetation Types in Initial Stage of Fixed Sand Dime of Semi-arid Region. Journal of Soil and Water Conservation 2003 ,17 (4) :164 — 167.

[20] Zhao W Z. Impact of plantation on spatial heterogeneity of soil moisture in Horqin sandy land. Acta Pedologica Sinica 2002 ,39 (1) :113 — 119.

参考文献：

[1] 郑元润. 大青沟植物群落起源探讨. 林业科学 ,1998 ,34 (6) 22 ~ 28.

[2] 关文彬,谢春华. 科尔沁沙地大青沟自然保护区景观与群落多样性分析. 见 :中国科学院生物多样性委员会. 生物多样性保护与区域可持续发展. 北京 :中国林业出版社 2002. 333 ~ 345.

[3] 郑元润. 大青沟森林群落稳定性研究. 生态学报 ,1999 ,19 (4) 578 ~ 580.

[4] 郑元润. 大青沟森林群落演替预测研究. 林业科学 ,1999 ,35 (2) 22 ~ 25.

[5] 郑元润. 大青沟森林植物群落物种多样性研究. 生物多样性 ,1998 ,6 (3) :191 ~ 196.

[6] 关文彬,曾德慧,姜凤岐. 中国东北西部地区沙质荒漠化过程与植被动态关系的生态学研究 :植被的分类. 应用生态学报 2000 ,11 (6) : 907 ~ 911.

[7] 关文彬. 中国东北西部沙质荒漠化地区植被的生态恢复. 水土保持研究 2000 ,7 (1) 9 ~ 14 ,29.

[8] 关文彬,曾德慧,姜凤岐. 中国东北西部地区沙质荒漠化过程与植被动态关系的生态学研究 :群落多样性与沙质荒漠化过程. 生态学报 , 2000 ,20 (1) 93 ~ 98.

[9] 姜凤岐,曹成有,曾德慧. 科尔沁沙地生态系统退化与恢复. 北京 :中国林业出版社 2002. 108 ~ 122.

[10] 曹新孙,南寅镐,朱廷曜,等. 内蒙古大青沟残遗森林植物群落与西辽河流域造林问题的初步探讨. 植物生态学与地植物学丛刊 ,1982 ,6 (3) :185 ~ 206.

[12] 龚元石,李子忠,李春友. 应用时域反射仪测定作物需水量和作物系数应用. 中国农业大学学报 ,1998 ,3 (5) 61 ~ 67.

[13] 白世彪,陈晔,王建. 等值线图软件 SURFER 7.0 中九种插值法介绍. 物探化探计算技术 2002 ,24 (2) :157 ~ 162.

[14] 陈海滨,孙长忠,安锋,等. 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 , 2003 ,18 (4) :13 ~ 16.

[15] 白雪峰,王国晨,张日升,等. 章古台沙地樟子松人工林土壤水分动态研究. 辽宁林业科技 2004 , (2) :11 ~ 13.

[16] 陈有君,关世英,李绍良,等. 内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况分析. 干旱区资源与环境 2000 ,14 (1) 80 ~ 85.

[18] 王兵,崔相慧,马全林. 绿洲荒漠过渡区水热平衡规律及其耦合模拟研究. 中国科学技术出版社 2003.

[19] 何志斌,赵文智. 干旱区流沙固定初期不同植被类型的土壤湿度特征. 水土保持学报 ,2003 ,17 (4) :164 ~ 167.

[20] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响. 土壤学报 ,2002 ,39 (1) :113 ~ 119.