

# 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异

王 蕙<sup>1,2</sup>, 赵文智<sup>1,\*</sup>, 常学向<sup>1</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所临泽内陆河流域综合研究站, 流域水文及应用生态实验室, 兰州 730000 ;  
2. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070 )

**摘要** 荒漠绿洲过渡带是绿洲生态系统的重要组成部分,对维持绿洲稳定具有重要作用。过渡带土壤湿度和植被之间的相互关系是了解荒漠绿洲过渡带的重要科学问题,从而开始受到重视。研究是在黑河中游荒漠绿洲过渡带,选择一条 1700m×200m 的样带(包括 3 条平行样线),在对土壤湿度、植被高度、盖度等调查的基础上,应用统计分析和地统计的方法,研究了荒漠绿洲过渡带土壤水分和植被的空间变异性特征。结果表明:在荒漠绿洲过渡带上,0~200cm 土层中土壤平均湿度介于 1.45%~3.85%,变异系数在 27.7%~83.2%,植被盖度介于 9%~80%,变异系数为 80%。植被盖度、冠幅与 0~20、20~40cm 两层土壤湿度显著负相关( $p<0.05$ ),与 120~140、140~160cm 两层土壤湿度显著正相关( $p<0.01$ )。土壤水分和植被空间分布在样带上存在明显的空间异质性,表现在小于 100m 的尺度上随机分布,而在 100~3110m 的尺度上呈聚集分布格局。

**关键词** 土壤湿度;植被;异质性;荒漠绿洲过渡带;黑河中游

文章编号:1000-0933(2007)05-1731-09 中图分类号:Q149,Q948,S812 文献标识码:A

## Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin

WANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHAO Wen-Zhi<sup>1,\*</sup>, CHANG Xue-Xiang<sup>1</sup>

1 Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Laboratory of Basin Hydrology and Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1731~1739.

**Abstract**: Desert-oasis ecotone, an important constituent of oasis ecosystem has vital role in maintaining the stability of oasis. The correlation between soil moisture and vegetation of the ecotone is the primary scientific issue to better understand the desert-oasis ecotone. This study, a transaction of 1700m×200m with three parallel sampling lines was established and soil moisture, vegetation height and coverage were investigated. The characteristics of spatial heterogeneity in soil moisture and vegetation distribution and their relationships were identified using the method of classical statistic and geostatistical analysis. The result show: in the desert-oasis ecotone, the soil moisture at the 0—200cm soil layer is, on average, 1.45%—3.85% and the variable coefficient is 27.7%—83.2%; the vegetation coverage is 9%~80% and the variable coefficient is 80%. The coverage and crown diameter are negatively related ( $p<0.05$ ) to the soil moisture at the 0—20cm and the 20—40cm, and are positively related ( $p<0.01$ ) to the soil moisture at the 120—140cm and 140—160cm. Soil

基金项目 国家自然科学基金项目(40571026);中国科学院野外台站基金资助项目(2005410)

收稿日期 2006-05-20;修订日期 2006-11-10

作者简介 王蕙(1979~),女,甘肃天水人,硕士生,主要从事生态水文学研究. E-mail: wanghui@ns.lzb.ac.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowzh@ns.lzb.ac.cn

**Foundation item** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40571026);The Foundation of Field Research Stations, CAS (No. 2005410)

**Received date** 2006-05-20; **Accepted date** 2006-11-10

**Biography**: WANG Hui, Master candidate, mainly engaged in eco-hydrology. E-mail: wanghui@ns.lzb.ac.cn

moisture and vegetation exist strong distribution pattern of spatial heterogeneity ,showing a random distribution at small scale (<100m ) and a mass distribution structure in larger scale (100 — 3110m ).

**Key Words** : soil moisture ; vegetation ; heterogeneity ; desert-oasis ecotone ; middle reaches of Heihe River Basin

荒漠绿洲过渡带是绿洲生态系统的重要组成部分 ,对维持绿洲稳定具有重要作用。过渡带土壤湿度和植被之间的相互关系是了解荒漠绿洲过渡带的重要科学问题 ,从而开始受到重视 [1~3]。

20 世纪 60 年代 Matheron 建立的地统计学 (Geostatistics )区别于经典统计学的显著特征在于它注重变量因子的空间过程 ,考虑其空间分布特征和空间自相关 [4] ,已在包括生态学在内的地球科学研究中得到应用和发展 ,被证明是分析包括土壤水分在内的生态因子空间特征及其变异规律最为有效的方法之一 [5,6]。应用地统计学研究土壤水分和植被空间格局空间异质性已有许多实例 ,如森林 [7]、草地 [8,9]、沙地 [10~12]、农田 [13,14] 等 ,其中 ,王政权等对阔叶红松林的类似研究得出土壤水分具有明显的空间异质性 [7] ;邱扬等对黄土高原区的研究表明 ,不同剖面层土壤水分空间异质性不同 ,并且受到不同因子影响 [15]。这些研究对认识不同群落和土地利用方式土壤水分格局与动态具有重要意义。

生态过渡带是指两个生态系统 (或斑块 )之间的接触带 ,荒漠绿洲过渡带就是荒漠生态系统和绿洲生态系统之间的接触带。近年来对荒漠绿洲过渡带的研究陆续展开 ,例如贾宝全研究了民勤绿洲荒漠绿洲过渡带的植被盖度、沙丘密度和沙包占地面积的变化 ,分析了过渡带环境演变过程和机制 [2] ;何志斌等 [16]对过渡带优势植物泡泡刺、红砂种群的密度、盖度以及泡泡刺沙堆体积和高度的空间格局进行研究 ,结果表明泡泡刺种群在样地内靠近绿洲和浅山区有几条明显的分布带 ,而红砂分布相对均匀 ,两种种群盖度和密度的变程在 34m 以内 ,同时指出泡泡刺种群空间格局的塑造主要受降水量及其形成的地表径流的控制 ;李秋艳等 [17,18]对戈壁和沙漠两种生境条件下泡泡刺种群的空间分布特征、动态及其对风沙干扰的响应进行研究 ,结果表明戈壁生境中的泡泡刺灌丛沙堆趋向于斑块小、密度大、空间自相关距离短 ,而沙漠生境中则相反 ,常学向等 [19]对荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况的研究表明土壤湿度随植被盖度增大而减小 ,随着植物生长土壤湿度下降。但这些研究多集中在植物种群空间格局特征 ,以及土壤湿度 [3]、降水和地下水变化对群落消长 [20]方面 ,有关荒漠绿洲过渡带土壤特性 ,特别是土壤水分与植被相结合的空间异质性研究涉及并不多。

本文旨在采用地统计学的方法 [21] ,研究黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被的空间异质性程度、空间异质性组成、尺度 ,以及土壤水分与植被之间的相互关系 ,为维持过渡带生态系统功能和安全利用该区资源提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区选在河西走廊中段 ,黑河流域中游的甘肃省临泽县北部绿洲边缘 ,中心区地理坐标 (39°20'N ,100°08'E ) ,处于荒漠、巴丹吉林沙漠和张临高绿洲的交汇处 ,样地的南侧和东侧为绿洲 ,西侧为祁连山余脉浅山区 ,北侧为荒漠戈壁和巴丹吉林沙漠延伸带 ,地势平坦 ,平均海拔 1350 m 左右 ,年平均降水量 117mm ,最高 210 mm ,最低 83 mm ,多集中于 7、8、9 月份 ,约占全年 65 %。空气相对湿度 46 % ,年蒸发量高达 2390 mm ,年平均气温 7.6 ℃ ,最高达 39. 1 ℃ ,最低为 -27.3 ℃ ,≥10℃年积温为 3085 ℃ ,属于干旱荒漠气候。风向以西北风为主 ,年平均风速为 3.2m·s<sup>-1</sup> ,最大风速 21 m·s<sup>-1</sup> ,大于 17 m·s<sup>-1</sup>大风日数年平均为 15 d。地带性植被为中温带荒漠化草原植被 ,主要由超旱生灌木、半灌木或盐生、旱生肉质半灌木组成。主要植物种有泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*)、红砂 (*Reaumuria soongorica*)、沙拐枣 (*Calligonum chinense*)、梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、怪柳 (*Tamarix ramosissima*)等。地带性土壤为灰棕漠土 ,荒漠戈壁地势平坦 ,地表有少量小砾石及灰棕色细土结皮 ,其下为较均一的青灰色细沙 ,1~0.25 mm 的沙粒占 73 %~91 % ,有机质含量一般为 0.1 %~0.4 %。样带大致为南北走向 ,地表为覆沙地 ,覆沙厚度 2~5m ,由南向北覆沙厚度逐渐增加。

1.2 研究方法

1.2.1 样地描述及空间取样设计

研究样地选择在距中国生态系统研究网络临泽内陆河流域综合研究站东 5km 的一块处在绿洲荒漠过渡带上的长方形区域 ,面积约 34hm<sup>2</sup> (南北长约 1700m ,东西宽约 200m )。在样地内 ,沿南北走向设置 3 条平行样线 ,按东西、南北间隔 100m 取样 ,共有 54 个样点 ,并以每个样点为中心设置 20m × 20m 样方。土壤湿度调查是在每块样方内的垂直剖面上取 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80、80 ~ 100、100 ~ 120、120 ~ 140、140 ~ 160、160 ~ 180、180 ~ 200cm 的土样 3 个重复。

1.2.2 土壤湿度测定

采用烘干法测定土壤湿度。为了便于分析比较 ,主要考虑不受降水影响 ,选择在 8 月份一次雨后 8 ~ 10 天对整个样带进行集中采样。取样时 ,先除去表层枯枝落叶 ,然后用土壤钻 (直径 = 4cm ) 取样 ,剔除样品中明显的植物根段和枯落物等杂质 ,装入编号的铝盒中 ,带回实验室 ,在 105℃ 的烘箱内烘 12h 后 ,取出后称重 ,计算出土壤湿度。土壤贮水量按  $WC = 0.1RVH$  计算 ,式中  $WC$  为土壤贮水量 (mm ) , $R$  为土壤重量含水量 (%) , $V$  为土壤容重 (g/cm<sup>3</sup>) , $H$  为土层厚度 (cm )。依据该公式分别计算出各层的土壤贮水量 ,然后累加计算出 2m 土层的水分贮量。最后将算得的土壤湿度和土壤贮水量值用于空间变异性分析。

1.2.3 植被调查方法

调查每个小样方内植物的种类、株数、冠幅、高度 ,由此计算出样方内的植被密度、盖度值。其中以样方内所有植物的冠幅所占整个样方的比例作为盖度值。本文采取 54 个 20m × 20m 小样方中获取的植被盖度、密度、高度、种类数、冠幅数据来分析荒漠绿洲过渡带植被的空间变异。

1.2.4 数据分析

采用 GS<sup>+</sup> 进行地统计学变异函数数据分析。考虑到在地统计学中 ,变异函数的计算要求数据符合正态分布 ,或近似正态分布 ,否则可能存在比例效应 ,所以统计分析分两步骤 :① 对土壤水分和植被盖度等数据用单样本 Kolomogorov-Semirnov (KS ) 方法进行正态分布检验 (SPSS 13.0 软件 )。② 变异函数的计算 ,用于估计半方差的公式为 :

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

式中 , $N(h)$  是距离等于  $h$  时的点对数 , $Z(x_i)$  是样点  $Z$  在位置  $x_i$  的实测值 , $Z(x_i + h)$  是与  $x_i$  距离为  $h$  处样点的值。变异函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义<sup>[21]</sup>。本研究中球状模型 (spherical model ,公式 2) 和指数模型 (exponential model ,公式 3) 土壤水分和植被盖度等的的数据符合要求。球状模型的变程等于相关距离  $a$  ;而指数模型并不表现出有限变程 ,但实践中变程值近似用  $3a$  表示。

$$\begin{cases} r(h) = C_0 + C(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}) & h \leq a \\ r(h) = C_0 + C & h \leq a \end{cases} \tag{2}$$

$$r(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}) \tag{3}$$

式中  $C_0$  为块金值 (nugget) , $C_0 + C$  为基台值 (sill) , $a$  为相关距离 (correlation length)。

分维数  $D$  的计算由变异函数和步长  $h$  之间的关系确定 ,即 :

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

上式取双对数后再对双对数曲线进行线性回归 ,得到回归直线的斜率  $k$  ,分维数可用斜率  $k$  估算 :

$$D = 1/2 (4 - k) \tag{5}$$

分维数  $D$  的大小 ,表示变异函数曲线的曲率。不同变量  $D$  值之间的比较 ,可以确定空间异质性的程度。

2 结果与讨论

2.1 土壤湿度与植被特征

在水平方向上 ,荒漠绿洲过渡带各层土壤湿度介于 0.86% ~ 8.82% 之间 ,最大值出现在距绿洲 1200 m

处 ,最小值出现在绿洲边缘 (图 1a、b)。2m 土层水分贮量平均值为 79.0mm ,介于 45.6 ~ 115.4mm 之间 ,最大值出现在距绿洲 600 m 处 ,最小值出现在距绿洲 1700 m 处 (图 1c)。总体上看 0 ~ 60 cm 土壤湿度从绿洲向荒漠均有增加的趋势 ,并且在大多数样方内这 3 层土壤湿度均随土层加深而增加。其余 7 层土壤湿度从绿洲向荒漠均有减少的趋势。土壤深层水分状况导致在剖面上土壤湿度出现了较大的峰值 ,表现在高峰值呈较大的波动性 ,这可能与剖面土壤质地不均匀有关。2m 土层中水分贮量沿过渡带变化的总趋势是随着距绿洲距离的增加逐渐减小。在垂直方向上 ,土壤湿度平均值为 2.48% ,介于 1.45% ~ 3.85% 之间 ,随深度增加而增加 ;土壤湿度变异性 (即变异系数)的变动范围在 27.7% ~ 83.2% ,随土层深度增加变异系数有逐渐增大的趋势 (表 1) ,说明在荒漠绿洲过渡带上土壤剖面各层土壤湿度在不同的空间位置差异在增大。

过渡带植被主要有 :泡泡刺、沙拐枣、梭梭。在水平方向上 ,荒漠绿洲过渡带植被盖度平均值为 24% ,介于 9% ~ 80% 之间 ,最大值出现在绿洲边缘 ,最小值出现在距绿洲 1000m 处。植被冠幅平均值为 2.8m<sup>2</sup> ,介于 0.7 ~ 13.8 m<sup>2</sup> 之间 ,最大值出现在绿洲边缘 ,最小值出现在距绿洲 300m 处。植被高度平均值为 67cm ,介于 29 ~ 360 cm 之间 ,最大值出现在绿洲边缘 ,最小值出现在距绿洲 1600m 处。植被密度平均值为 0.11 株/m<sup>2</sup> ,介于 0.06 ~ 0.16 株/m<sup>2</sup> 之间 ,最大值出现在距绿洲 600m 处 ,最小值出现在距绿洲 1500m 处 (图 1d、e、f、g)。总体上看 ,从绿洲到荒漠植被盖度、冠幅、高度、密度值均有下降的趋势 ,最大值都出现在绿洲边缘或距离绿洲不远处 ,这可能与绿洲边缘土壤水分条件相对较好有关。另外 ,植物种类数沿绿洲荒漠过渡带变化不明显 ,各样方内植物种类最多为 4 种 ,最少为 1 种 (图 1h)。植被盖度、冠幅、高度的变异系数分别为 80%、118.1%、116.4% ,比植被密度 (37.7%) 大的多 ,说明沿荒漠绿洲过渡带植被盖度、冠幅与高度受到的影响相对较大 (表 1)。

表 1 荒漠绿洲过渡带剖面各层土壤湿度与植被的统计特征

| Table 1 Description statistics of soil moisture along vertical profile and vegetation in desert-oasis ecotone |                         |             |           |                |                |                |                  |                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|-----------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 项目<br>Item                                                                                                    | 土壤层<br>Soil layer (cm ) | 平均值<br>Mean | 标准差<br>SD | 变异系数<br>Cv (%) | 最大值<br>Maximum | 最小值<br>Minimum | 偏态系数<br>Skewness | 峰态系数<br>Kurtosis |
| 土壤湿度<br>Soil moisture<br>(%)                                                                                  | 0 ~ 20                  | 1.45        | 0.46      | 31.7           | 2.39           | 0.43           | -0.02            | -0.44            |
|                                                                                                               | 20 ~ 40                 | 1.51        | 0.42      | 27.7           | 2.30           | 0.48           | -0.15            | -0.32            |
|                                                                                                               | 40 ~ 60                 | 1.71        | 0.60      | 35.3           | 3.85           | 0.78           | 0.97             | 2.00             |
|                                                                                                               | 60 ~ 80                 | 1.93        | 0.86      | 44.5           | 6.02           | 0.74           | 0.65             | 1.17             |
|                                                                                                               | 80 ~ 100                | 2.50        | 1.44      | 57.7           | 6.65           | 0.91           | 1.57             | 1.65             |
|                                                                                                               | 100 ~ 120               | 2.41        | 1.34      | 55.5           | 6.57           | 0.88           | 1.55             | 2.02             |
|                                                                                                               | 120 ~ 140               | 2.73        | 2.23      | 81.8           | 11.01          | 0.91           | 2.32             | 5.14             |
|                                                                                                               | 140 ~ 160               | 3.25        | 2.70      | 83.2           | 11.02          | 0.76           | 1.60             | 1.55             |
|                                                                                                               | 160 ~ 180               | 3.46        | 2.75      | 79.5           | 11.36          | 0.79           | 1.52             | 1.39             |
|                                                                                                               | 180 ~ 200               | 3.85        | 3.17      | 82.4           | 13.86          | 0.79           | 1.40             | 1.24             |
| 2m 土层贮水量<br>Soil moisture storage (mm )                                                                       |                         | 79.0        | 33.77     | 42.8           | 167.3          | 29.5           | 0.83             | -0.18            |
| 植被盖度<br>Coverage (%)                                                                                          |                         | 24          | 18.93     | 80.0           | 81             | 4              | 1.82             | 3.09             |
| 植被冠幅<br>Crown diameter (m <sup>2</sup> )                                                                      |                         | 2.8         | 3.27      | 118.1          | 14.7           | 0.5            | 2.56             | 6.66             |
| 植被高度<br>Height (cm)                                                                                           |                         | 67          | 78.35     | 116.4          | 366            | 19             | 3.41             | 10.91            |
| 植被密度<br>Density (individual/ m <sup>2</sup> )                                                                 |                         | 0.11        | 0.04      | 37.7           | 0.21           | 0.04           | 0.42             | -0.36            |

2.2 土壤水分与植被的空间变异

在荒漠绿洲过渡带上以 20cm 为 1 层将 0 ~ 200cm 土层划分为 10 层 ,各层土壤湿度存在高度的异质性 ,且随着距绿洲距离的增加而增大 ,块金值 (C<sub>0</sub>)变化于 0.008 ~ 0.099 之间 ,基台值 (C<sub>0</sub> + C)在 0.095 ~ 0.607

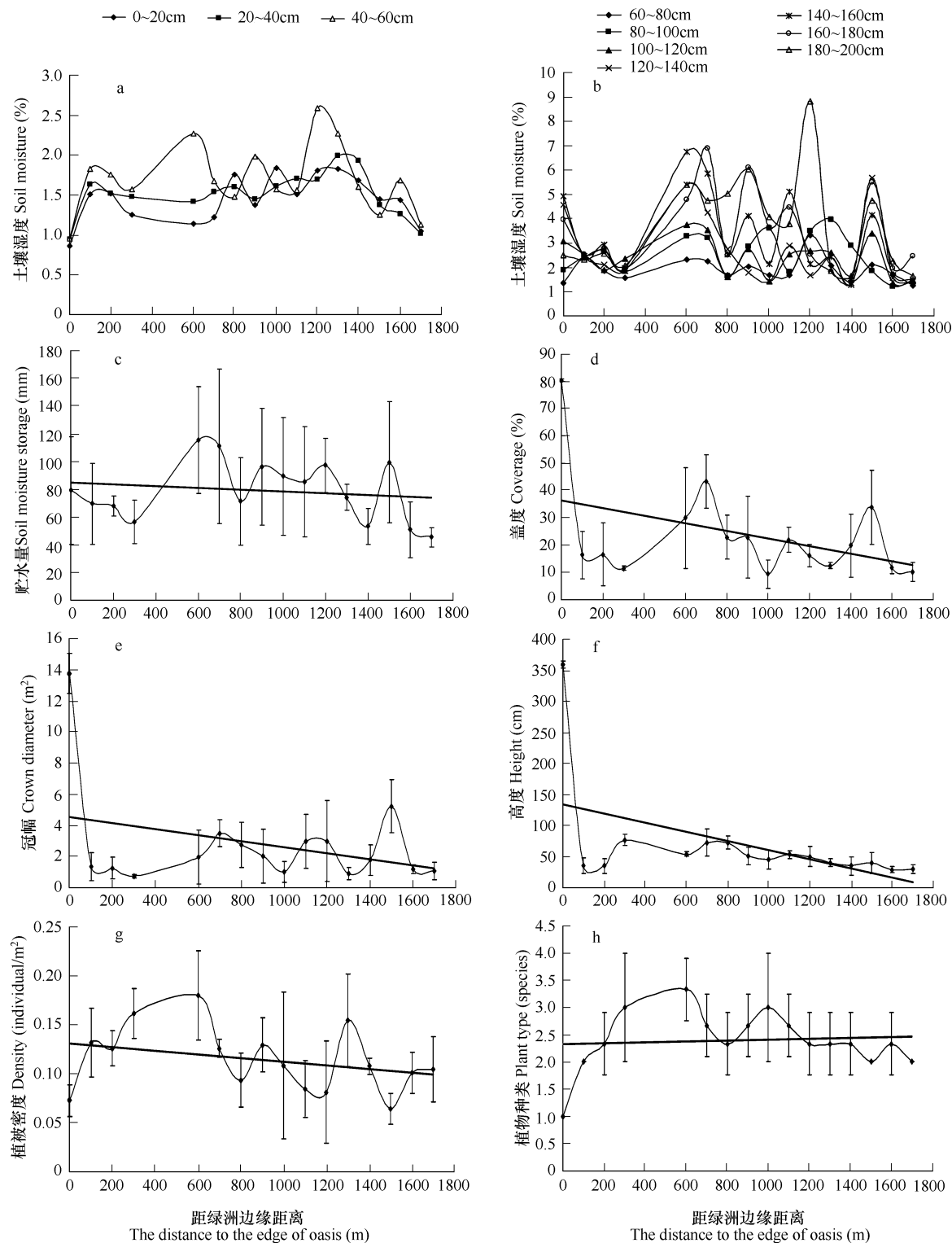


图 1 荒漠绿洲过渡带土壤湿度与植被变化

Fig. 1 Changes of soil moisture and vegetation in desert-oasis ecotone

之间。Cambardella 等<sup>[23]</sup>运用参数比值的大小判定系统内变量的空间相关性程度,指出当  $C / (C_0 + C)$  比值为  $< 25\%$ ,  $25\% \sim 75\%$ ,  $> 75\%$  时,分别表明变量的空间相关性为较弱、中等、较强。本研究表明,荒漠绿洲过渡带各层土壤湿度、2m 土层贮水量及植被冠幅、高度、密度的  $C / (C_0 + C)$  之比均大于  $75\%$  (表 2),说明过渡带土壤湿度、植被特征在研究的尺度上具有较强的空间自相关。

空间格局是环境、资源以及生物系统结构在空间上有规律的分布<sup>[24]</sup>。空间异质性导致空间分布格局的存在。空间异质性不同,其变量的空间分布格局也不同。0~20、20~40和40~60cm土层受降水等环境因子影响明显,土壤水分斑块格局较明显。60~80、80~100、100~120cm这3层土壤以及160~180、180~200cm这2层土壤具有较大的分形维数(1.987、1.986、1.999、1.988、1.970),格局显得较弱。120~140cm、140~160cm土壤水分分形维数又减小,格局相对明显。植被高度的分形维数(1.792)小于植被盖度、冠幅及密度,说明植被高度的格局较明显。

从空间异质性的组成分析,块金值( $C_0$ )表示随机部分的空间异质性,拱高( $C$ )则表示系统变异的空间异质性,拱高与基台值之比同时也反映自相关部分的空间异质性占总空间异质性的程度<sup>[21]</sup>。2m土层贮水量与各层土壤湿度空间自相关度 $C/(C_0+C)$ 比较,相对较小。2m土层贮水量的总空间异质性中约有22%由随机因素引起,主要存在于<100m的尺度内,而由空间自相关部分引起的空间异质性占78%,存在于100~430m范围内。植被盖度与其它植被特征的 $C/(C_0+C)$ 值比较,因其块金方差大,空间自相关度较小。说明对于植被冠幅、高度、密度由随机因素引起的空间异质性( $SH_R$ )占总空间异质性的比例比植被盖度(39.8%)小,且主要体现在100m以下的尺度上,而由空间自相关引起的空间异质性( $SH_A$ )占总空间异质性的比例比植被盖度(60.2%)大,主要体现在100~3110m的尺度范围内。植被盖度与高度的变程大于1700m,在研究样带上不能很好反映两者的空间变化情况,建议在今后的研究中,适当延伸样带长度,进一步提高结果的完整性。

变程是测定土壤水分与植被特征最大变异的空间距离,在变程之内,空间自相关存在,在变程之外,空间自相关消失。因此,变程的大小表示空间异质性的尺度。在研究样带上,不同土层土壤湿度异质性尺度不同,变程大约在130~300m范围内(表2)。尽管各土层存在一定差异,但可以推断绿洲边缘0~300m的取样范围基本反映土壤湿度的信息。从表2可以看出植被冠幅、密度的空间自相关尺度相差不大,但远小于植被盖度(1930m)和高度(3110m)。

| 表 2 土壤湿度与植被变异函数理论模型及参数                                                         |                        |                            |                         |                           |                           |                 |            |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|------------|
| Table 2 Parameters and model of semivariogram for soil moisture and vegetation |                        |                            |                         |                           |                           |                 |            |
| 项目<br>Item                                                                     | 土壤层<br>Soil layer (cm) | 理论模型 <sup>①</sup><br>Model | 块金值<br>Nugget ( $C_0$ ) | 基台值<br>Sill ( $C_0 + C$ ) | 空间自相关度<br>$C / (C_0 + C)$ | 变程<br>Range (a) | 分维数<br>$D$ |
| 土壤湿度<br>Soil moisture<br>(%)                                                   | 0~20                   | 指数模型                       | 0.018                   | 0.128                     | 0.858                     | 228             | 1.943      |
|                                                                                | 20~40                  | 指数模型                       | 0.011                   | 0.095                     | 0.883                     | 204             | 1.951      |
|                                                                                | 40~60                  | 指数模型                       | 0.019                   | 0.124                     | 0.846                     | 165             | 1.965      |
|                                                                                | 60~80                  | 球状模型                       | 0.008                   | 0.139                     | 0.942                     | 130             | 1.987      |
|                                                                                | 80~100                 | 球状模型                       | 0.021                   | 0.252                     | 0.916                     | 153             | 1.986      |
|                                                                                | 100~120                | 球状模型                       | 0.014                   | 0.231                     | 0.941                     | 134             | 1.999      |
|                                                                                | 120~140                | 球状模型                       | 0.024                   | 0.368                     | 0.935                     | 229             | 1.938      |
|                                                                                | 140~160                | 指数模型                       | 0.099                   | 0.530                     | 0.813                     | 297             | 1.938      |
|                                                                                | 160~180                | 球状模型                       | 0.032                   | 0.471                     | 0.932                     | 127             | 1.988      |
|                                                                                | 180~200                | 球状模型                       | 0.063                   | 0.607                     | 0.896                     | 170             | 1.970      |
| 2m 土层贮水量<br>Soil moisture storage                                              |                        | 指数模型                       | 0.042                   | 0.194                     | 0.781                     | 432             | 1.914      |
| 植被盖度<br>Coverage                                                               |                        | 指数模型                       | 0.339                   | 0.852                     | 0.602                     | 1930            | 1.917      |
| 植被冠幅<br>Crown diameter                                                         |                        | 球状模型                       | 0.029                   | 0.807                     | 0.930                     | 194             | 1.937      |
| 植被高度<br>Height                                                                 |                        | 球状模型                       | 0.120                   | 0.959                     | 0.875                     | 3110            | 1.792      |
| 植被密度<br>Density                                                                |                        | 球状模型                       | 0.016                   | 0.160                     | 0.902                     | 223             | 1.937      |

①指数模型 Exponential model, 球状模型 Spherical model

<http://www.ecologica.cn>

土壤水分与植被的变异函数分析能够表征它们从绿洲向荒漠过渡的程度和空间尺度。在研究的地域范围 ,各层土壤湿度、2m 土层贮水量及植被冠幅、高度、密度在空间分布上有明显的规律性 ,存在较强的空间自相关和格局 ,这种明显的变异规律几乎完全是由绿洲向荒漠过渡这种趋势所引起的。这种规律表现在在小尺度 (<100m)上土壤水分和植被特征没有明显的规律 ,而在中尺度 (100 ~ 3110m)上具有聚集分布的特点。

2.3 土壤湿度与植被相互关系

表 3 是研究区内植被盖度、冠幅、高度、密度与各层土壤湿度及 2m 土层贮水量之间的相关性。植被盖度、冠幅与 0 ~ 100cm 各层土壤湿度呈负相关 ,其中与 0 ~ 20、20 ~ 40cm 这两层在  $p < 0.05$  的水平上呈显著负相关 (图 2) ;与 100 ~ 200cm 各层土壤湿度呈正相关 ,其中与 120 ~ 140、140 ~ 160cm 两层呈显著和极显著正相关。植被高度与 0 ~ 20、20 ~ 40cm 两层土壤湿度呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ) ;植被高度与植被盖度、冠幅呈显著正相关。植被密度只与冠幅呈显著负相关。土壤 2m 贮水量和植被特征没有明显的相关性 ,而与各层土壤湿度存在正相关 ,与 60 ~ 200cm 各层土壤湿度呈极显著正相关。

如上所述 0 ~ 60cm 土层土壤湿度随着距离绿洲越远有增加的趋势 ,而植被盖度、冠幅值沿过渡带逐渐减小 ,图 2 又表明 ,植被盖度、冠幅与 0 ~ 20、20 ~ 40cm 土壤湿度呈显著负相关 ,说明盖度和冠幅值增加会导致 0 ~ 60cm 土壤湿度减少。在样带上植被主要是深根性植物 ,对表层土壤水分利用不多。植被盖度和冠幅的增加导致表层土壤湿度的减少的原因可能是大的冠幅和盖度增加了植被对降水的拦截作用 ,而减少了降水对土壤表层水分的补给。

表 3 土壤湿度和植被特征相关分析

Table 3 Correlation coefficient matrix among soil moisture and vegetation characteristics

| 项目<br>Item                        | 土壤层<br>Soil layer (cm ) | 2m 土层贮水量<br>Soil moisture storage | 植被盖度<br>Coverage | 植被冠幅<br>Crown diameter | 植被高度<br>Height | 植被密度<br>Density |
|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| 土壤湿度                              | 0 ~ 20                  | 0.142                             | -0.334 *         | -0.319 *               | -0.385 **      | 0.047           |
| Soil moisture (%)                 | 20 ~ 40                 | 0.159                             | -0.295 *         | -0.363 *               | -0.373 **      | 0.233           |
|                                   | 40 ~ 60                 | 0.325 *                           | -0.362 *         | -0.252                 | -0.350 *       | 0.098           |
|                                   | 60 ~ 80                 | 0.469 **                          | -0.068           | -0.132                 | -0.205         | 0.030           |
|                                   | 80 ~ 100                | 0.486 **                          | -0.144           | -0.198                 | -0.112         | 0.273           |
|                                   | 100 ~ 120               | 0.607 **                          | 0.272            | 0.175                  | 0.143          | 0.237           |
|                                   | 120 ~ 140               | 0.699 **                          | 0.494 **         | 0.387 **               | 0.247          | -0.044          |
|                                   | 140 ~ 160               | 0.805 **                          | 0.431 **         | 0.311 *                | 0.221          | 0.018           |
|                                   | 160 ~ 180               | 0.815 **                          | 0.390 **         | 0.259                  | 0.111          | -0.158          |
|                                   | 180 ~ 200               | 0.664 **                          | 0.082            | 0.312 *                | -0.070         | -0.128          |
| 2m 土层贮水量<br>Soil moisture storage |                         | 0.286 *                           | 0.166            | 0.050                  | 0.015          |                 |
| 植被盖度<br>Coverage                  |                         |                                   | 0.917 **         | 0.805 **               | -0.283         |                 |
| 植被冠幅<br>Crown diameter            |                         |                                   |                  | 0.884 **               | -0.491 **      |                 |
| 植被高度<br>Height                    |                         |                                   |                  |                        | -0.261         |                 |

\*  $p < 0.05$  , \* \*  $p < 0.01$

3 结论

(1) 在荒漠绿洲过渡带 ,沿水平方向各层土壤湿度介于 0.86% ~ 8.82% 之间 ,沿垂直方向土壤湿度平均值为 2.48% ,介于 1.45% ~ 3.85% 之间 ,变异系数在 27.7% ~ 83.2% ,植被盖度介于 9% ~ 80% ,变异系数为 80% ,植被冠幅平均值为 2.8m<sup>2</sup> ,介于 0.7 ~ 13.8 m<sup>2</sup>之间 ,植被高度平均值为 67cm ,介于 29 ~ 360 cm 之间 ,植被密度平均值为 0.11 株/m<sup>2</sup> ,介于 0.06 ~ 0.16 株/m<sup>2</sup>之间。

(2)在荒漠绿洲过渡带以 20cm 为 1 层将 0 ~ 200cm 划分为 10 层 ,各层土壤湿度、2m 土层贮水量及植被

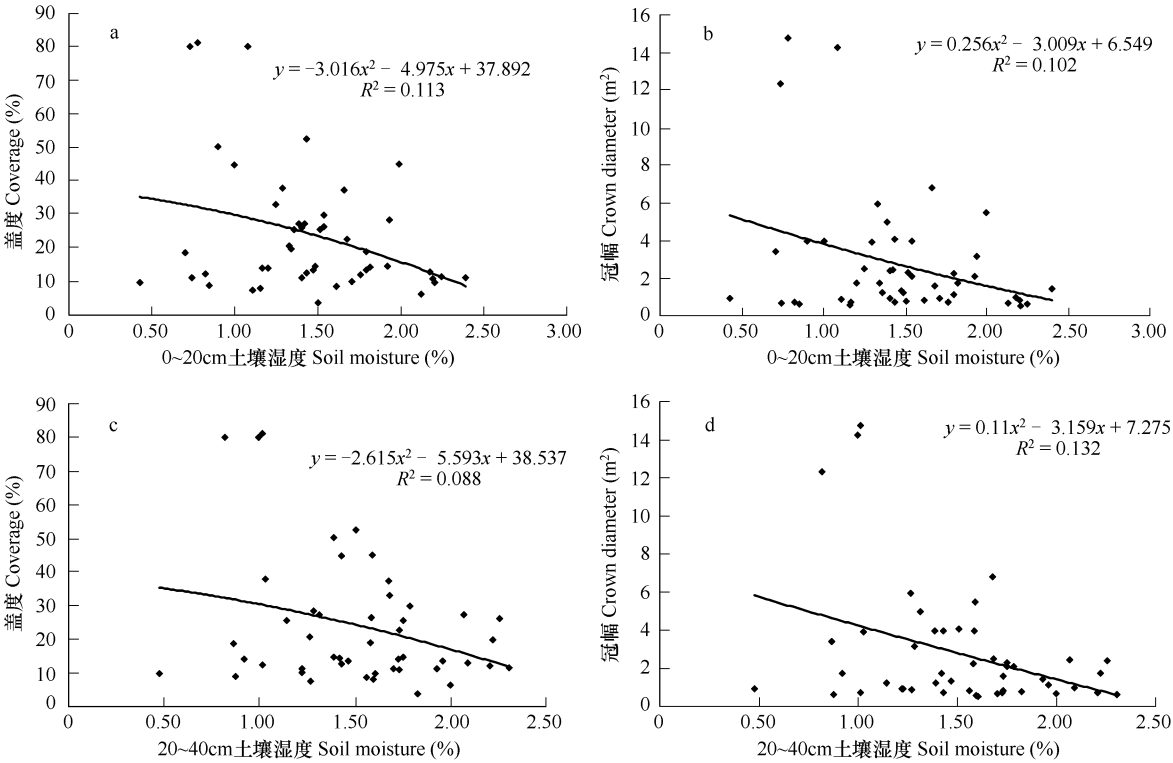


图2 土壤湿度与植被盖度、冠幅回归方程

Fig. 2 Regression equations between soil moisture and vegetation coverage , crown

冠幅、高度、密度的  $C / (C_0 + C)$  之比大于 75% 具有较强的空间自相关 ;土壤水分和植被空间分布在样带上存在明显的空间异质性 ,表现在小于 100m 的尺度上没有明显的规律 ,而在 100 ~ 3110m 的尺度上具有聚集分布的格局 绿洲边缘 0 ~ 300m 的取样范围基本可以反映土壤湿度的信息。

(3) 植被盖度、冠幅与 0 ~ 20、20 ~ 40cm 两层土壤湿度显著负相关 ( $p < 0.05$  ) ,与 120 ~ 140、140 ~ 160cm 两层土壤湿度显著正相关 ( $p < 0.01$  )。植被高度与植被盖度、冠幅呈显著正相关。植被密度只与冠幅呈显著负相关。土壤 2m 贮水量与各层土壤湿度存在正相关 ,与 60 ~ 200cm 各层土壤湿度呈极显著正相关。

References :

[1 ] Andrew J B ,Robert L W. Trans. Zhao W Z ,Wang G X. Eco-Hydrology—Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments. Beijing : Ocean Press ,2002.

[2 ] Jia B Q ,Ci L J. Oasis Landscape Ecological Study. Beijing :Science Press ,2003.

[3 ] Jia B Q ,Ci L J ,Cai T J ,et al. Preliminary research on changing soil water characters at ecotone between oasis and desert. Acta Phytoecol Sin. , 2002 26 (2 ) :203 — 208.

[4 ] Wang J ,Fu B J ,Qiu Y ,et al. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on Loess Plateau —— semivariograms. Acta Geographica Sin. ,2000 55 (4 ) :428 — 438.

[5 ] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. Advance in Soil Science ,1985 ,3 :1 — 70.

[6 ] Andrew W W ,Günter B ,Rodger B G. Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment . Journal of Hydrology , 1998 ,205 :20 — 37.

[7 ] Wang Z Q ,Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests. Acta Ecologica Sinica ,2000 ,20 (6 ) :945 — 950.

[8 ] Kleb H R ,Wilson S D. Scale of heterogeneity in prairie and forest. Can. J. Bot. ,1999 ,77 :370 — 376.

[9 ] Bai Y F ,Xu Z X ,Li D X. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture ,carbon and nitrogen in Stipa communities of the Inner Mongolia Plateau. Acta Ecologica Sinica ,2002 ,22 (8 ) :1215 — 1223.

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

[11 ] Zuo X AN ,Zhao X Y ,Zhao H L ,et al. Spatial variability of soil moisture responding to drought and rainfall in sandy grassland of Horqin. Journal of Soil and Water Conservation ,2005 ,19 (1 ) :140 — 144.

[12] Cain M L , Subler S , Evans J P , *et al.* Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability. *Oecologia* ,1999 ,118 :397 — 404.

[13] Gong Y S , Liao C Z , Li B G. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density. *Acta Pedologica Sinica* ,1998 ,35 ( 1 ) :10 — 15.

[14] Franois A , Mathieu R , Parent L , *et al.* Geostatistics of near-surface moisture in bare cultivated organic soils. *Journal of Hydrology* ,2002 ,260 :30 — 37.

[15] Qiu Y , Fu B J , Wang J , *et al.* Spatial heterogeneity of soil moisture content of the Loess Plateau , China and its relation to influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2001 ,12 ( 5 ) :715 — 720.

[16] He Z B , Zhao W Z. Spatial pattern of two dominant shrub populations at transitional zone between oasis and desert of Heihe River Basin. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2004 ,15 ( 6 ) 947 — 952.

[17] Li Q Y , He Z B , Zhao W Z , *et al.* Spatial pattern of *Nitraria sphaerocarpa* population and dynamics in different habitats. *Journal of Desert Research* ,2004 ,24 ( 4 ) 484 — 488.

[18] Li Q Y , Zhao W Z , Li Q S , *et al.* Responses of *Nitraria sphaerocarpa* maxim population to disturbance of blown sand in the edge of desert-oasis. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24 ( 11 ) 2484 — 2491.

[19] Chang X X , Zhao A F , Zhao W Z , *et al.* Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation region along middle reaches of Heihe River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2003 ,17 ( 2 ) 126 — 129.

[20] Yang Z H , Gao Z H. Impact of precipitation and underground water level in the edge of oasis on growth and decline of *Nitraria tangutorum* community. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2000 ,11 ( 6 ) 923 — 926.

[21] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing : Science Press ,1999.

[22] Zu Y G , Ma K M , Zhang X J. A fractal method for analyzing spatial heterogeneity of vegetation. *Acta Ecologica Sinica* ,1997 ,17 ( 3 ) :333 — 337.

[23] Cambardella C A , Moorman A T , Novak J M , *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* ,1994 ,58 :1501 — 1511.

[24] Li H B , Wang Z Q , Wang Q C. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification . *Chinese Journal of Applied Ecology* ,1998 ,9 ( 6 ) :651 — 657.

参考文献：

[1] 赵文智. 王根绪译. 生态水文学——陆生环境和水生环境植物与水分关系. 北京 : 海洋出版社 ,2002.

[2] 贾宝全 慈龙骏. 绿洲景观生态研究. 北京 : 科学出版社 ,2003.

[3] 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. *植物生态学报* ,2002 ,26 ( 2 ) 203 ~ 208.

[4] 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. *地理学报* ,2000 ,55 ( 4 ) 428 ~ 438.

[7] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. *生态学报* ,2000 ,20 ( 6 ) :945 ~ 950.

[9] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. *生态学报* ,2002 ,22 ( 8 ) :1215 ~ 1223.

[10] 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.

[11] 左小安 赵学勇 赵哈林, 等. 科尔沁沙地沙质草场土壤水分对干旱和降雨响应的空间变异性. *水土保持学报* ,2005 ,19 ( 1 ) 140 ~ 144.

[13] 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. *土壤学报* ,1998 ,35 ( 1 ) :10 ~ 15.

[15] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子. *应用生态学报* ,2001 ,12 ( 5 ) :715 ~ 720.

[16] 何志斌 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征. *应用生态学报* ,2004 ,15 ( 6 ) 947 ~ 952.

[17] 李秋艳 何志斌 赵文智, 等. 不同生境条件下泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*) 种群的空间格局及动态分析. *中国沙漠* ,2004 ,24 ( 4 ) 484 ~ 488.

[18] 李秋艳, 赵文智 李启森, 等. 荒漠绿洲边缘区泡泡刺种群对风沙干扰的响应. *生态学报* ,2004 ,24 ( 11 ) 2484 ~ 2491.

[19] 常学向 赵爱芬 赵文智, 等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况. *水土保持学报* ,2003 ,17 ( 2 ) 126 ~ 129.

[20] 杨自辉 高志海. 荒漠绿洲边缘降水 and 地下水对白刺群落消长的影响. *应用生态学报* ,2000 ,11 ( 6 ) 923 ~ 926.

[21] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京 : 科学出版社 ,1999.

[22] 祖元刚 马克明 张喜军. 植被空间异质性的分形分析方法. *生态学报* ,1997 ,17 ( 3 ) :333 ~ 337.

[24] 李哈滨 王政权 王庆成. 空间异质性的理论与模型. *应用生态学报* ,1998 ,9 ( 6 ) 651 ~ 657.