

# 灌溉前后沙质裸地表层土壤蒸发量的时空变异性

龙 桃<sup>1,3</sup>,熊黑钢<sup>2,3</sup>,李宝富<sup>1,3</sup>,张建兵<sup>1,3</sup>,瓦哈甫·哈力克<sup>1,3</sup>

(1.新疆大学资源与环境科学学院,新疆 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,新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘 要:**利用野外实测数据建立的表层土壤日蒸发量和含水率间的函数关系,估算了灌溉前后 3 个时段的土壤日蒸发量,并以多种数学方法对其空间特征进行了探讨。结果表明:(1)灌溉后前期(1 周)与后期(3 周)的土壤蒸发量呈显著的负相关关系,其余各时段蒸发量的相关性不显著;(2)灌溉前土壤蒸发量的总体差异较大,空间关联性很弱,呈随机的斑块状分布,灌溉后总体差异明显减小,空间关联性增强,分布类型转为区域化分布;(3)由随机因素引起的空间异质性在灌溉后则更多地受空间自相关控制;(4)由于林带、芦苇丛和微地形的影响,灌后 1 周时采样区西边的土壤蒸发量大于东面,其余两个时段东西向无明显差异;灌溉前南部区域土壤蒸发量较北部区域大,灌后 1 周时该种情形被逆转,灌后 3 周时又转为向灌溉前回归。

**关键词:**灌溉;沙质裸地;土壤蒸发量;时空变异性;地统计学

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0001-06

土壤蒸发是地气能量交换中的主要过程之一,是沙地水循环中的重要环节,对于沙地水热传输及水分利用和沙地植被的稳定具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。因此土壤蒸发的研究一直受到农学、气象、水文等相关学科及领域的重视<sup>[3]</sup>。

在西北干旱区,土壤蒸发通常伴随大量盐分的迁移变化,由蒸发活动引起的春季返盐问题相当严重。蒸发作用使土壤盐分上行,至地表时大量积聚。春季冰雪消融后地表常露出白色的盐斑、盐块和盐结皮。表层积盐多的地区,往往有成片、雪白的盐粒覆盖。返盐过程也会使地表 5 cm 左右的土壤变得疏松、孔隙度增大。这些不但不利于植物的生长,还会加重土壤沙漠化、春季沙尘暴。因此,加强对裸地土壤蒸发规律的研究有着多重、重要的现实意义。

由微型蒸发器(Micro-lysimeters,简称 MLS)测得的土壤蒸发量能与大型蒸渗仪、水量平衡法、红外温度计法测定的结果很好吻合<sup>[4]</sup>。Shawcroft 等提出了一种更好地利用 MLS 的方法,即建立由 MLS 测得的土壤日蒸发与表层土壤含水量的关系,再利用表层土壤含水量来推测土壤蒸发量<sup>[5]</sup>。本文通过田间试验,利用此方法探讨土壤蒸发量时空变异性,以期有效地认识土壤蒸发空间格局在田块尺度上的演变规律。

## 1 试验设计与方法

### 1.1 试验区概况

试验区地处古尔班通古特沙漠南缘,东经 89°

26'14",北纬 44°11'41",海拔 611 m,地下水埋深 2~4 m,年平均气温 5℃,多年平均降水量 150 mm,属温带大陆性干旱半干旱气候。土壤质地为沙土,表层 20 cm 土壤的平均容重为 1.34 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计

试验于 2008 年 8 月进行。选择一块 3 m×3 m 的裸地,利用两种 MLS 测量表层 15 cm 土壤蒸发量,计算时采用两者的算术平均值。每种 MLS 南北向排列,套筒和内筒制作材料均为 PVC 管材。套筒直径为 11.5 cm,壁厚 4 mm,长度 15 cm;内筒直径 10.5 cm,壁厚 3 mm,长度 16.5 cm,土壤装至 15 cm 处。一种 MLS 内筒打孔,数目为 18 个,3 行×6 列排布,孔的直径为 2 mm;另一种内筒不打孔。套筒均打孔,数目、孔的排列方式与内筒相同,但孔径为 3 mm。所有 MLS 内筒均用单层纱布封底。在 MLS 布设的小区内,同步测量表层 0~5、0~10、0~15、0~20 cm 土壤含水率,雨后加测一次。利用以上所得数据可以建立土壤蒸发量与土壤含水率之间的函数关系式。再选取一块东西宽为 6 m,南北长为 80 m,即 6 m×80 m 的裸地,以 2 m×10 m 为间距进行网格采样(图 1)。2008 年 8 月 10 日对试验地进行了灌溉,灌溉前 1 天、1 周后、3 周后分别采集各网格点土样,以测定灌溉前后土壤含水率。结合建立的函数式,利用该水分数据推算出各网点当日的土壤蒸发量。

收稿日期:2009-09-14

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资助项目(PHR200906125)

作者简介:龙 桃(1986—),男,重庆荣昌人,硕士,主要从事干旱区环境研究。E-mail:longtao312@163.com。

通讯作者:熊黑钢(1956—),男,湖南湘乡人,教授,博士,主要从事干旱区资源环境研究。E-mail:zhg1956@sohu.com。

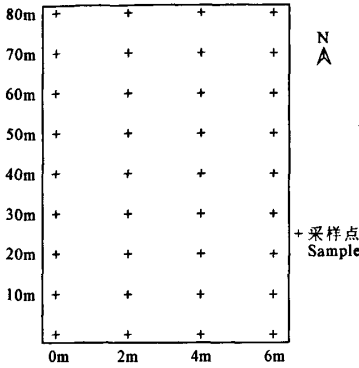


图 1 采样点布置

Fig.1 Map of sample distribution

1.3 测定项目及时间

(1) MLS 内土壤蒸发量,每天 8:00、20:00 用精度为 0.1 g 的电子天平称重,两次重量之差为当天的日蒸发量。(2) 3 m × 3 m 小区土壤样品采集分 3 类:表层 0~5 cm 土样用环刀采集,两个重复;0~15 cm 土样用土钻法采集,3 个重复;其余为剖面法采样,2 cm 一层采至 20 cm 处,共分 10 层,3 个重复,各层取其算术平均值。所有土样含水率均用烘干法测量。以上各项测量时间均为每天上午 10:00~11:00,共 15 d。(3) 网格采样地灌溉前后表层 20 cm 土壤含水率,分别用土钻法采样,烘干法测定,3 个重复。

1.4 推算蒸发量的方法

将 MLS 测得的土壤日蒸发量与表层 0~5、0~10、0~15、0~20 cm 土壤含水率进行相关分析,结果表明土壤蒸发量与表层 20 cm 土壤含水率的相关系

数最大( $R = 0.7052$ ),相关性最好(表 1)。因此本文利用表层 20 cm 的土壤含水率与 MLS 测得的日蒸发量建立函数关系(表 2),以推算网格采样地各格点的土壤日蒸发量。

表 1 土壤蒸发量与土壤含水率的相关性

Table 1 Correlation for soil evaporation and soil moisture

考察因素 Factor	0~5cm	0~10cm	0~15cm	0~20cm
相关程度 Correlation degree	0.6139*	0.6729**	0.6786**	0.7052**

注: \* 显著相关( $P = 0.05$ ), \*\* 极显著相关( $P = 0.01$ )。

Note: \* and \*\* mean respectively significant difference at 0.05 and 0.01 levels.

表 2 土壤蒸发量与表层 20 cm 土壤含水率的函数关系

Table 2 Function of soil evaporation and 20 cm surface soil moisture

回归主体 Factor	回归方程 Regressive equation	$R^2$	累计蒸发相对误差 Relative error of accumulative evaporation	单次拟合平均相对误差 Relative error of each simulated evaporation
ET 与 $W_{20}$ ET and $W_{20}$	$ET = 0.0345 W_{20}^2 - 1.660 W_{20} + 20.829$	0.82	4.14%	15.16%

注: ET 为蒸发量,  $W_{20}$  是表层 20 cm 土壤含水率,单位 %。

Note: ET means soil evaporation,  $W_{20}$  is 20 cm surface soil moisture with the unit of %.

估算采用的函数关系式,其图像是开口向上的抛物线,当土壤含水率过小或过大时,计算值均较大。虽然这种情况较少,但为减小此类估算误差,需对其进行校正。参照 3 m × 3 m 裸地 MLS 实测蒸发量和含水率,发现当含水率高于 30% 和低于 19% 时估算值都要进行校正,分析后得到 6 组不同含水率区间的基本校正系数(表 3)。

表 3 基本校正系数

Table 3 The basic emendation coefficients

含水率区间 Moisture range	14%~15%	15%~16%	16%~17%	17%~18%	18%~19%	30%~34%
校正系数 Revised coefficient	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8

由于 6 个基本校正系数不具有连续性,可将其与各土壤含水率区间的平均值进行回归分析,以建立动态、连续的校正系数方程(图 2)。从回归分析的结果可知,决定系数  $R^2 = 0.9978$ ,说明方程的拟合效果较好。利用校正系数方程对计算出的每一网格点的土壤蒸发量进行校正,这样在一定程度上提高了含水率过高或过低时估算值的精度。

1.5 数据处理及插值方法

经典统计部分在 SPSS15.0 中进行,地统计学(基本原理和方法参阅相关文献<sup>[6,7]</sup>)部分在 GS+7.0

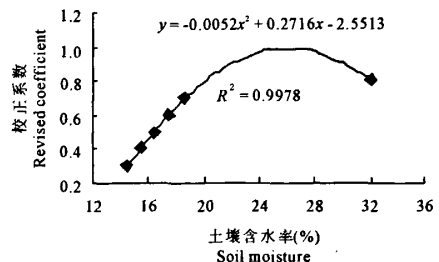


图 2 校正系数方程

Fig.2 Function of revised coefficient

中完成,其它数据则利用 EXCEL 2003 计算。正态分布的检验方法为单样本 Kolmogorov - Smirnov (KS) 法。半变异函数模型以残差平方和 (RSS) 最小为原则进行选取<sup>[8,9]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌溉前后土壤蒸发量的相关性

为揭示灌溉前 1 天、灌后 1 周和灌后 3 周 3 个时段土壤日蒸发量相互间的关系,进行了相关分析。结果显示,灌溉前的土壤蒸发量与灌溉后的两次之间没有很好的相关性,而灌溉后 1 周和灌溉后 3 周之间的土壤蒸发量在 0.05 水平下呈显著的负相关关系(表 4)。这种负相关性说明,蒸发不仅随含水量的减少而减弱,而且与蒸发强度随时间的变化密切相关。灌溉后 1 周时土壤蒸发越强,灌溉后 3 周时土壤蒸发就越弱。

### 2.2 灌溉前后土壤蒸发量的一般统计特征

从土壤蒸发量的统计情况来看,灌溉前 1 天和灌后 3 周时土壤日蒸发量较为接近,蒸发最强烈的时段为灌后 1 周时,此时的中位数明显高于其他两

个时段(表 5)。在分布区间上,灌后 1 周时土壤蒸发量总体较高,95% 置信区间的较小值均比另两个时段的较大值高(表 5)。土壤蒸发在很大程度上受土壤水分的影响。灌溉活动使土壤水分含量大幅提高,对灌溉后 1 周时土壤蒸发量的增大有直接贡献。灌前至灌后,采样区土壤蒸发量的变异系数迅速减小(表 5),说明灌溉后研究区各点的土壤蒸发量总体差异在缩小。

表 4 灌溉前后土壤蒸发量 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation of soil evaporation before and after irrigation

	灌溉前 Before irrigation	灌后 1 周 One week later	灌后 3 周 Three weeks later
灌溉前 Before irrigation	1		
灌后 1 周 One week later	0.0085	1	
灌后 3 周 Three weeks later	0.1073	-0.3581*	1

注: \* 表示显著相关( $P = 0.05$ )。

Note: \* means significant difference at 0.05 level.

表 5 土壤蒸发量描述性统计值

Table 5 Descriptive statistical values of soil evaporation

时间 Time	样本数 Number of samples	最小值 Minimum	最大值 Maximum	中位数 Median	标准差 Standard deviation	变异系数 Variability coefficient	分布类型 Distribution type	95% 置信区间 95% intervals
灌溉前 1 天 One day before	36	0.46	1.61	1.35	0.25	0.39	N	1.24 ~ 1.41
灌溉后 1 周 One week later	36	0.86	2.61	1.57	0.47	0.30	N	1.42 ~ 1.74
灌溉后 3 周 Three weeks later	36	0.86	1.72	1.33	0.27	0.21	N	1.17 ~ 1.34

注:统计时土壤蒸发量的单位为 mm。Note: mm is the unit of soil evaporation. N, normal distribution.

### 2.3 灌溉前后土壤蒸发量的空间结构性

土壤蒸发量的描述性统计值只能在一定程度上反映总体,不能定量描述土壤物理性质的随机性、不规则性、独立性和相关性<sup>[10]</sup>。要解决这些问题,需利用地统计学的方法进行空间变异结构分析。

2.3.1 空间相关性及其分布特点 Moran 的  $I$  指数 (Moran'  $I$ ) 与经典统计学上的相关系数相近,其值变化介于  $-1 \sim 1$  之间,当  $I = 0$  时代表空间无关, $I > 0$  时为空间正相关, $I < 0$  时为空间负相关<sup>[10,11]</sup>。根据空间相关性可进一步判断出研究对象的空间分布规律。

灌溉前, Moran 的  $I$  指数随滞后距离的增大出现正负交替的现象(图 3),说明灌溉前采样区土壤蒸发量正负相关并存,分布具有很大的随机性,在空

间上呈碎片化分布。灌溉后 1 周时,该值随滞后距离的增加先减小后变大(图 3),土壤蒸发量的空间相关性得到加强。这显示出在人类活动(灌溉)的影响下,土壤蒸发量分布的随机性有所下降,此时土壤蒸发量已呈区域化分布特征。灌后 3 周时, Moran 的  $I$  指数随滞后距离的加大不断减小(图 3),表明此时土壤蒸发量随空间距离的增加,由正相关性向负相关关系变化,土壤蒸发量仍然呈区域化分布,空间相关性较好。总体而言,灌溉前土壤蒸发量空间相关性较差,呈随机的斑块状分布;灌后 1 周和灌后 3 周时,土壤蒸发量的空间关联性加强,多为区域化分布。人类活动(灌溉)改变了土壤蒸发量的空间相关性和分布特征。

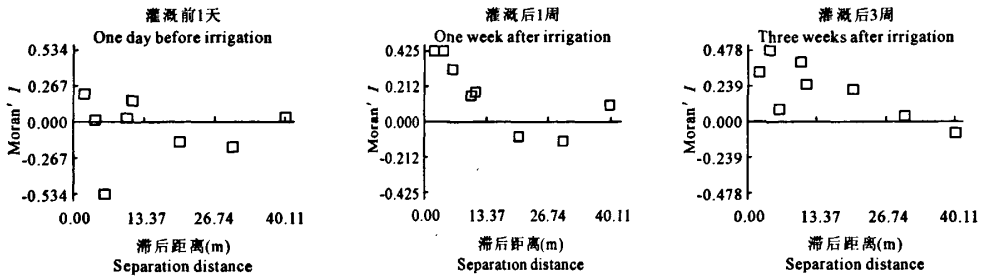


图 3 灌溉前后土壤蒸发量空间相关图

Fig.3 Spatial correlogram of soil evaporation before and after irrigation

2.3.2 空间变异性 地统计学是以区域化变量和随机函数为基础,以半方差函数为基本工具的一种统计方法<sup>[12]</sup>。在 GS + 软件中计算出采样区土壤蒸发量的空间结构并作出灌溉前后 3 个时段的半方差图表(图 4 和表 6)。决定系数  $R^2$  反映半方差模型拟合程度的灵敏度没有残差平方和 (RSS) 好。因此,本文使用 RSS 来判断模型的拟合效果。RSS 越

小,模型拟合效果越好。灌溉前后 3 个半方差模型的 RSS 都在千分位上,数值较小(表 6),指示 3 个模型拟合的程度均较高。从半方差函数的图像来看,3 个时段的半方差在到达最大相关距离后,都保持了较好的稳定性(图 4)。因此,两种检验方法均显示出半方差函数适宜描述土壤蒸发量的空间特性。

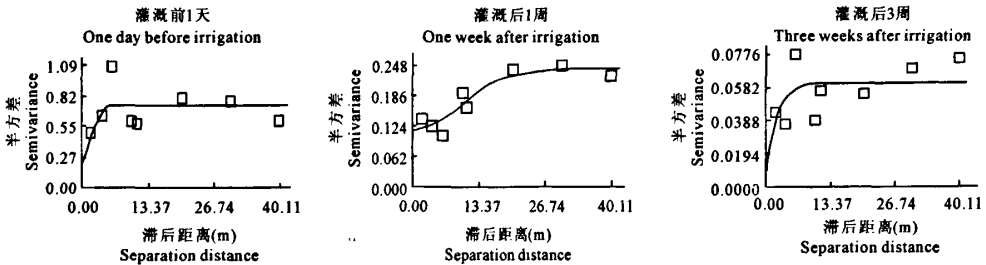


图 4 灌溉前后土壤蒸发量的半方差函数图

Fig.4 Semi-variance functions of the soil evaporations before and after irrigation

块金值  $C_0$  表示随机变异的大小,主要有 2 个来源:一是来源于最小取样间隔内的自然过程引起的变异;二是来源于试验误差<sup>[13,14]</sup>。灌溉前后土壤蒸发量的块金值均较小,但总体来看灌溉前高于灌溉

后,且灌后 3 周时出现最小值(表 6)。这说明灌溉前土壤蒸发量的随机变异程度较高,灌溉后随机变异性减小。土壤结皮、微地形、土壤紧实度等都可能增加灌溉前土壤蒸发量的随机变异性。

表 6 土壤蒸发量的半方差模型及其参数值

Table 6 Types of the semi-variance function model for soil evaporation and other parameters

时间 Time	理论模型 Model	$C_0$	$C_0 + C$	$C/C_0 + C$	$A(m)$	$D_0$	RSS	$R^2$
灌溉前 1 天 One day before irrigation	球状 Spherical	0.21	0.74	0.22	5.93	1.87	$1.390 \times 10^3$	0.22
灌溉后 1 周 One week after irrigation	高斯 Gaussian	0.11	0.24	0.53	13.41	1.90	$2.770 \times 10^3$	0.87
灌溉后 3 周 Three weeks after irrigation	指数 Exponential	0.04	0.10	0.57	61.64	1.92	$1.515 \times 10^3$	0.37

基台值  $C_0 + C$  表示系统内总的变异,包括结构性变异和随机性变异<sup>[10,15]</sup>。灌溉前的基台值明显高于灌溉后的两个时段(表 6)。可见,灌溉前土壤

蒸发量总体变异较高,灌溉后变异则大幅下降。

结构方差比  $C/C_0 + C$  可用来衡量空间自相关性程度<sup>[16]</sup>。当其大于 75% 时,系统具有强烈的空间

自相关性;比值在 25% ~ 75% 之间时,系统具有中等自相关性;小于 25% 时,自相关性很弱<sup>[17]</sup>。灌溉前的结构方差比小于 25%,灌溉后的两次结构方差比均在 25% ~ 75% 之间(表 6),说明灌溉后土壤蒸发量的空间自相关性增强,从弱相关性变为中等相关性。这与灌溉前土壤蒸发量呈随机分布,灌后转为区域化分布的特征相吻合。

变程 A 表示具有区域化变量影响范围的大小,变程以内的变量具有空间自相关性,变程以外的则不存在这种关系<sup>[13]</sup>。灌溉前后土壤蒸发量的变程逐渐增大(表 6),表明灌溉后其空间自相关范围不断扩大。空间自相关范围的变化趋势,正好对应着灌溉前后土壤蒸发量的两种空间分布规律:斑块状和区域化分布。灌溉前的变程较小,仅为 5.93 m,因此土壤蒸发量呈现出斑块状分布规律;灌溉后变程不断扩大,最大达 61.64 m,因此灌溉后出现区域化的分布状况。

不同变量分维数  $D_0$  之间的比较可以反映空间变异性的程度<sup>[17]</sup>。分维数值高,表示由空间自相关部分引起的空间异质性较高;数值低则主要由随机因素引起的空间异质性较强。灌溉前试验区土壤蒸发量的分维数值最低,灌溉后随着时间的延长,分维数值缓慢递增(表 6)。这反映出,灌溉前土壤蒸发量由随机因素引起的空间异质性所占的比重较大,而灌溉后向空间自相关部分引起的空间异质性转化。

2.4 灌溉前后土壤蒸发量的空间分布特征

图 5、图 6 分别为灌溉前后 3 个时段内,土壤蒸发量在东西、南北两个方向上平均值随空间距离的变化。灌溉前 1 天和后 3 周,东西方向上土壤蒸发量没有太大差异;而灌后 1 周,在 2 m 处出现明显的极大值,其余各点则较为接近。这与采样地东西方向上的林带分布不均有关。样地东、西边沿南北向的田埂上种有高约 3 m 的沙枣树林带,林带中分布有高 1.5 m 左右的芦苇丛,但西边林带有 20 m 左右的距离没有沙枣树,出现了空缺。因此,上午时东边(4 m、6 m 处)阳光受到沙枣树的遮挡,下午时西边(0 m 处)阳光受到芦苇丛的遮挡,而 2 m 处的采样点则一直受到阳光直射,导致蒸发量在灌后 1 周时偏大。灌溉前和灌后 3 周时各点蒸发量基本一致,是由于该处土壤经强烈的长时间蒸发后,水分含量减少,所以虽然各时段该点(2 m 处)太阳辐射都较强,但在较低的土壤水分条件下,另两个时段蒸发量并没有出现偏大的情况。

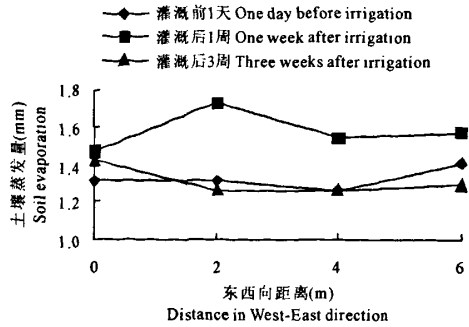


图 5 灌溉前后东西向土壤蒸发量  
Fig.5 Soil evaporation in West - East direction

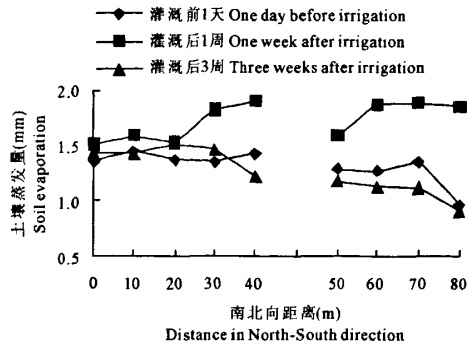


图 6 灌溉前后南北向土壤蒸发量  
Fig.6 Soil evaporation in North - South direction

在南北方向上,以 40 m 处的东西线为界将研究区划分成南、北两个小区域(图 6)。整体来看,灌溉前南部区域土壤蒸发量偏大,但灌后 1 周北部区域的蒸发量却相对较大,灌后 3 周时向灌前回归(图 6)。这是由于采样区南高北低,灌溉后北部区域土壤水分下渗量更大,使得北部区域土壤水分值较南部区域大,蒸发也就相应大于南部区域;而蒸发导致土壤水分减少,地下水又来不及完全补给蒸发损失的水分,结果又出现了灌后 3 周时北部区域蒸发量较南部区域小的情况。蒸发量的这种空间分布特征与前面灌溉前后土壤蒸发量的相关性推出的结论一致。

3 结 论

1) 灌溉前后,沙质裸地表层土壤日蒸发量的变异程度有所不同。灌溉前土壤蒸发量的变异性最强,灌溉后变异性减弱。从灌溉前至灌后 3 周时,变异系数减小了 46.15%。分维数值在灌溉前后表现出与变异系数相反的变化规律,从 1.87 增至 1.92。这反映出土壤蒸发量空间异质性主导因素在灌溉前后有所改变。灌溉前随机因素引起的空间异质性较

大,而灌溉后空间自相关部分引起的空间异质性得到增强。

2) 3 个时段的土壤日蒸发量空间分布特征表现出较好的规律性。在东西方向上,灌溉前土壤蒸发量没有太大差别,灌溉后 1 周时研究区西面 2 m 处的蒸发量最大,均值比其余三点高 0.20 mm,而灌后 3 周时东西向的蒸发量分布又回到了灌前状态;在南北方向上,以 40 m 处的东西线为界,灌溉后一周时北面区域土壤蒸发量较南面区域大,平均高出 0.13 mm;但灌前和灌后 3 周时南面区域蒸发量更大,分别比北面高出 0.18 mm,0.33 mm。植被和微地形是驱动表层土壤蒸发量产生空间变异的主要因素之一。

3) 在人类活动(灌溉)影响下,土壤日蒸发量强度的变化具有明显的时间序列特征。灌溉前土壤蒸发量很弱,灌溉后 1 周时最强,而灌溉后 3 周时又转为向灌前回归。灌后 1 周时,土壤蒸发量比灌溉前、灌溉后 3 周时分别高出 0.25 mm 和 0.31 mm。

4) 从灌溉前至灌溉后,土壤日蒸发量的空间自相关性和空间分布类型发生了较大改变。灌溉前,土壤蒸发量的空间自相关性较弱,结构方差比仅为 0.22,空间分布具有很大的随机性;灌溉后空间自相关性已达中等水平,结构方差比均值达 0.55,空间分布的随机性减弱。空间自相关性的这种变化,使得灌溉前后土壤蒸发量的空间分布类型也发生相应转换,由斑块状分布转变为和区域化分布。

#### 参考文献:

- [1] 孟春雷.土壤蒸发及水热传输研究综述[J].土壤通报,2007,38(2):374—378.
- [2] 刘新平,张铜会,赵哈林.流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J].干旱区地理,2006,29(4):523—526.
- [3] 孟春雷,石建辉.土壤蒸发研究及对旱灾防治的意义[J].防灾科技学院学报,2007,9(1):83—85.
- [4] 孙宏勇,刘昌明,张永强,等.微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J].水利学报,2004,8:114—118.
- [5] Shawcroft R W, Gardner H R. Direct evaporation from soil under a row crop canopy[J]. *Agricultural Meteorology*, 1983, 28(3): 229—238.
- [6] Buttafuoco G, Castrignano A. Study of the spatio-temporal variation of soil moisture under forest using intrinsic random functions of order k [J]. *Geoderma*, 2005, 128: 208—220.
- [7] Larocque G, Dutilleul P. Conditional Gaussian co-simulation of regionalized components of soil variation[J]. *Geoderma*, 2006, 134: 1—16.
- [8] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963, 58: 1246—1266.
- [9] Buttafuoco G, Castrignano A. Study of the spatio-temporal variation of soil moisture under forest using intrinsic random functions of order k [J]. *Geoderma*, 2005, 128: 208—220.
- [10] 罗勇,陈家宙,林丽蓉,等.基于土地利用和微地形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.
- [11] 谢花林,李波,刘黎明,等.基于空间统计学和 GIS 的农牧交错带土壤养分空间特征——以内蒙古翁牛特旗为例[J].水土保持学报,2006,20(2):73—76.
- [12] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱丘陵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.
- [13] 王政权.地质统计学及其在生态学上的应用[M].北京:科学出版社,1999:162—192.
- [14] Western A W, Blscl G, Grayson R B, et al. Geo-statistical characterization of soil moisture patterns in the tarrawarra catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 20—37.
- [15] 王军,傅伯杰,邱扬.黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征[J].地理学报,2000,55(4):428—438.
- [16] 潘颜霞,王新平,苏廷桂,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—108.
- [17] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, et al. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. *Soil Sci Soc Am*, 1994, 58(5): 1501—1511.

(英文摘要下转第 13 页)

## Effects of winter irrigation on soil moisture and thermal condition of artificial grassland during the winter in agro – pastoral ecotone of China

LI Zi-zhong, WANG Hao

(College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Field experiments were carried out in Bashang plateau in the agro-pastoral transition zone of North China during two winter periods of 2005 ~ 2007. The objective of the study was to investigate the effects of winter irrigation on soil moisture and thermal condition in winter based on data of total water content by the oven-dried method, unfrozen water content by time domain reflectometry (TDR), soil thermal condition by thermistors, and meteorological data. The results showed that, winter irrigation delayed the freezing process at the beginning of winter and thawing process at the beginning of spring. And winter irrigation also delayed the change of soil temperature because it resulted in soil temperature decreasing slowly in freezing soil and increasing slowly in thawing soil, so winter irrigation kept high soil temperature in winter and decreased the risk of frozen injury. The total water storage before and after winter changed little, as winter irrigation improved soil water condition largely and this effect was kept until next spring.

**Keywords:** winter irrigation; winter season; soil moisture and thermal condition; Bashang plateau

(上接第6页)

## The spatial-temporal variability of sandy bared soil evaporation before and after irrigation

LONG Tao<sup>1,3</sup>, XIONG Hei-gang<sup>2,3</sup>, LI Bao-fu<sup>1,3</sup>,

ZHANG Jian-bing<sup>1,3</sup>, WAHAP·Halik<sup>1,3</sup>

(1. College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Urban Department, College of Art & Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** The method of obtaining sandy soil daily evaporation from a function is very useful when needing a mass of data. The aim of this study is to find such a function, and to discuss the spatial-temporal variability of sandy bared soil evaporation before and after irrigation by using the accounting data. An experiment is carried out to study the problems. The results indicate that the soil evaporation one week before and three weeks after irrigation has distinct correlativity, but that in other stages does not. Whereas, the evaporation before irrigation differs much, and its spatial relationship is weak, but it reverses after irrigation. Moreover, the spatial conjunction is controlled more by spatial self-correlation but spatial heterogeneity in this stage. Also the spatial distribution of soil evaporation changes over time and space. Because of vegetation and landform of the study area, the evaporation of west zone was larger than that of east one a week after irrigation, while that in other two stages has no marked differences in the west and east. In time sequence, the evaporation of north region was stronger than that of south zone before irrigation. But a week after irrigation, the evaporation of south part was stronger, and it changed over again three weeks after irrigation.

**Keywords:** irrigation; sandy bared land; soil evaporation; spatial-temporal variability; geostatistics