

# 黄土丘陵小流域土壤水分时空分异与环境关系的数量分析

邱 扬, 傅伯杰\*, 王 军, 陈利顶

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要:**采用 DCCA 排序, 研究了流域尺度上土壤水分的时空分异类型及与环境因子的关系。研究结果表明, 丰水年土壤水分垂直的分布呈降低型、波动型和增长型 3 种类型, 主要影响因子为土地利用与地形(地貌类型、坡度、坡位与海拔高度); 土壤水分的季节变化表现为三峰型、四峰同步型与四峰滞后型 3 种类型, 主要影响因子为降雨与地形(坡度、海拔高度、坡向与坡位)。分析得出, 降低型与波动型的土壤水分利用率较高; 从丰水年到欠水年, 降低型向波动型转化, 波动型向增长型转化; 丰水年土壤水分的空间稳定层(0~5cm)与空间稳定期(夏季), 对估计整个流域土壤含水量具有重要意义。

**关键词:**黄土丘陵小流域; 土壤水分; 时空分异; 土地利用; 地形因子; DCCA 排序

## Quantitative analysis of relationships between spatial and temporal variation of soil moisture content and environmental factors at a gully catchment of the Loess Plateau

QIU Yang, FU Bo-Jie, WANG Jun, CHEN Li-Ding (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** With the method of Detrended Canonical Correspondence Analysis (DCCA), we studied the relationship between the types of spatial and temporal variation of soil moisture content and the environmental factors at the scale of catchment. Results indicated that in a wetter-year (1998), the profile distribution of soil moisture content shows three types: decreasing-type, waving-type and increasing-type contributed to the influencing of land use and topography. Under the influencing of precipitation and topography, soil moisture content changes seasonally in forms of three-peak type, synchro-four-peak type and lagged-four-peak type. It is concluded that soil water is utilized effectively on sites of both the decreasing-type and waving-type; from a wetter-year to drier-year, the profile type of soil moisture content changes from decreasing-type to waving-type and from waving-type to increasing-type. The soil layer (0~5cm) and the season (summer), which soil moisture content being spatially stable across overall landscape in the wetter-year, are important for predicting the average soil moisture content in the whole catchment.

**Key words:** gully catchment on the Loess Plateau; soil moisture content; spatial and temporal variation; topography; land use; Detrended Canonical Correspondence Analysis (DCCA)

文章编号: 1000-0933(2000)02-0741-07 中图分类号: Q142.3, S152.7 文献标识码: A

土地利用与地形是影响土壤水分时空分异的重要因子<sup>[1]</sup>, 基于土地利用图和 DEM 图, 研究中尺度上

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(49725101)和欧洲联盟资助项目(ERBIC18CT970158)。

\* 通讯联系人

EuroChina 项目组成员参加了野外土壤水分测定, 谨表谢意。

收稿日期: 1999-07-28, 修订日期: 2000-04-20

作者简介: 邱 扬(1969~), 男, 四川人, 博士, 副研究员。主要从事景观生态学与土地持续利用研究。

环境因子与土壤水分的关系<sup>[2,3]</sup>,是土壤水分与水文模型及其尺度外推的突破口<sup>[4~6]</sup>,从而成为国际上的研究热点之一。黄土丘陵沟壑区地形分异明显,研究土壤水分与环境因子的关系尤为重要<sup>[7]</sup>,但这方面的研究还较为缺乏<sup>[8~12]</sup>。在研究方法方面,国际上多采用定性比较、单因素回归与地统计等方法研究环境因子对土壤水分的平均值与变异性的影响<sup>[1~5,13~15]</sup>。然而,针对土壤水分时空分异类型及与环境因子的关系,这些方法还不够理想。而植被数量生态学的新方法——除趋势典范对应分析(Detrended canonical correspondence analysis, DCCA),在分析植物群落时空分异类型与环境因子的关系方面独树一帜,是目前国际上最新的一种排序方法<sup>[16,17]</sup>。本项研究,采用 DCCA 排序法,研究黄土高原丘陵沟壑区小流域尺度上土壤水分的时空分异类型及与环境因子的关系。

## 1 研究区域特征

试验区位于陕西安塞县大南沟流域(东经 109°17',北纬 36°53'),面积 3.5km<sup>2</sup>。年平均降水量 549mm,其中 60%集中在 7~9 月份。地貌类型为典型的黄土丘陵沟壑地貌,地形破碎,沟壑纵横。土壤类型为黄土母质上发育而成的黄绵土,土质疏松,抗蚀抗冲性差,土壤侵蚀剧烈,水土流失严重。流域内自然植被破坏殆尽,垦殖指数较高,土地利用以坡耕地、梯田、果园、荒草地、撂荒地、灌木地和林地为主。

## 2 研究方法

### 2.1 取样观测与数据预处理

1998 年,根据不同的地形状况与土地利用类型,在流域内共选取了 26 个典型样点。调查并记载每个样点的坡向、坡位、坡形、地貌类型、坡度、海拔高度 6 个地形因子以及土地利用类型(见表 1)。土壤含水量用时域反射仪(Time domain reflectometry 简称 TDR)分土层(5cm、15cm、25cm、40cm 和 70cm)从 1998 年 5 月 15 日到 10 月 15 日,在每月的 1 日与 15 日前后分别测定 1 次,每次约 2~3d,每层测定 5 个样点,取其平均数作为该层的土壤含水量。用传统的烘箱法测定从饱和持水量到植物凋萎时的土壤含水量,校正 TDR 所测的土壤含水量,得出二者的回归方程  $Y=0.8243X-0.0454$ ,  $R^2=0.9585$ ,式中  $Y$  为烘箱法测定的土壤含水量乘以土壤容重,  $X$  为时域反射仪测定的土壤含水量。降雨量用雨量计自动记录测定,1998 年整个生长季降雨量 465.42mm,为丰水年。

1999 年,对样地进行了部分调整,从 1998 年的样地中选取了 11 个,新设 5 个,共计 16 个。土壤水分与环境因子的测定方法与 1998 年相同。测定期从 4 月 28 日至 9 月 25 日,每半月 1 次,共 11 次。1999 年整个生长季降雨量 184.85mm,为欠水年。

本文主要研究 1998(丰水年)的土壤水分,分析与讨论以 1998 年数据为主,1999 年数据用于辅助分析。

DCCA 排序要求对定性数据进行编码处理。土地利用以 1 表示灌木地,2 表示林地,3 表示果园,4 表示间作地,5 表示荒地,6 表示休闲地,7 表示农地。坡向原始记录以朝北为起点(即 0°或 360°),顺时针旋转的角度表示。数据处理时采取每 45°为一个区间划分等级制的方法,以数字表示各等级,1 表示南偏西(180~225°),2 表示南偏东(135~180°),3 表示西偏南(225~270°),4 表示东偏南(90~135°),5 表示西偏北(270~315°),6 表示东偏北(45~90°),7 表示北偏西(315~360°),8 表示北偏东(0~45°)。坡位编码以 1 表示下坡,2 表示中坡,3 表示上坡。坡形分 3 类,1 表示凸形坡,2 表示直线坡,3 表示凹形坡。地貌类型分 3 类,1 表示坡地,2 表示山顶,3 表示梯田。坡度与海拔高度以实际观测值表示。

### 2.2 DCCA 排序

DCCA 需要两个数据矩阵<sup>[16]</sup>,一个是土壤水分数据矩阵,另一个是环境因子数据矩阵。环境因子数据矩阵为  $P \times N$  维,其中  $P$  为环境因子的数量,这里有土地利用、坡向、坡位、坡形、地貌类型、坡度、海拔高度 7 个环境因子, $N$  为样点数(本文为 26 个)。本研究分析丰水年土壤水分的垂直结构与动态结构两个方面,因而土壤水分数据矩阵有两个,即剖面数据矩阵与动态数据矩阵。这两个土壤水分数据矩阵也都是  $P \times N$  维。其中  $N$  为样点数(26 个),剖面数据矩阵的  $P$  为 5,分别代表 1998 年调查的 5 个剖面层次(0~5cm、10~15cm、20~25cm、40~45cm、70~75cm)的土壤水分的观测期平均值,动态数据矩阵的  $P$  为 10,分别代表从 1998 年 5 月 15 日每半月一次共计 10 次的土壤水分的整个剖面的平均值。

本研究采用国际通用软件 CANOCO,结合环境因子矩阵,分别针对土壤水分剖面数据矩阵与动态数

据矩阵,进行了两次 DCCA 排序过程,获得了样点与环境因子的前四个排序轴的坐标值,作为分析的基础。

表 1 样点的地形因子与土地利用类型

Table 1 Topography and land use type of plots selected

样地 Plot	坡向 Aspect	坡位 Position	坡形 Curvature	地貌类型 Landform	坡度(°) Slope	海拔高度 Altitude(m)	土地利用 Land use
1	南偏西	上坡	线形	山顶	15	1216	农地
2	南偏西	上坡	线形	坡地	15	1217	休闲地
3	东偏北	下坡	线形	坡地	40	1162	荒草地
4	北偏东	下坡	线形	坡地	30	1146	农地
5	南偏西	中坡	凸形	梯田	8	1187	果园地
6	西偏南	中坡	线形	坡地	30	1202	林地
7	南偏西	上坡	线形	坡地	30	1227	农地
8	西偏北	中坡	凸形	坡地	15	1234	农地
9	东偏北	中坡	凸形	坡地	30	1249	农地
10	西偏北	上坡	凸形	坡地	18	1307	荒草地
11/12	北偏东	上坡	线形	坡地	15	1334	灌木地
13	北偏东	中坡	线形	梯田	5	1223	间作地
14	北偏东	中坡	线形	坡地	8	1224	林地
15	北偏东	上坡	凹形	坡地	5	1268	农地
16	北偏东	中坡	线形	梯田	1	1216	农地
17	北偏东	下坡	凸形	坡地	18	1196	果园地
18	北偏东	下坡	线形	坡地	15	1179	农地
1-1	南偏西	上坡	线形	山顶	5	1287	休闲地
1-2	西偏南	下坡	线形	坡地	40	1167	休闲地
2-1	西偏北	上坡	凸形	山顶	5	1373	休闲地
3-1	北偏东	上坡	凹形	山顶	1	1359	休闲地
3-2	北偏东	中坡	凸形	坡地	12	1243	农地
3-3	北偏东	下坡	线形	坡地	10	1166	果园地
4-1	东偏南	上坡	凸形	坡地	25	1283	农地
4-2	东偏南	中坡	凸形	坡地	8	1258	农地
4-3	东偏南	中坡	凹形	坡地	19	1233	农地

### 3 结果与讨论

#### 3.1 土壤水分的垂直分布与环境因子的关系

从排序图(图 1)可以看出,各个样点在排序图上有规律地排列。图中箭头代表各个环境因子。箭头所处象限,代表环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头连线的长度代表环境因子与排序轴相关性的大小。

结合表 2 可见,从排序图的左下部朝向右上部,土壤水分(整个观测期间每层土壤水分量的平均值)的 3 种垂直结构类型依次排列。降低型位于排序图的左下部,土壤水分的垂直分布表现为随土层深度的增加而减少。整个土壤剖面都较干,土壤含水量平均为 8.37%,层次变异性中等,标准差为 1.45。这种剖面结构在研究区域比较少。在 1999 年(偏旱年)的 16 个样地中,不存在这种剖面结构(表 3)。波动型位于排序图中部偏左下的位置,土壤水分随土层深度的增加呈现或低或高的波动。土壤湿度中等,土壤含水量平均为 12.92%,层次变异性很小,标准差为 0.63。这种类型在研究区域也较少。增长型位于排序图的右上部,土壤水分随土层深度的增加而增加。土壤较湿,土壤含水量平均为 13.03%,层次变异性较大,标准差为 2.3。这种剖面结构在研究区域最为普遍,是该区土壤水分垂直分布的代表类型。

表 2 丰水年不同类型各层次的土壤含水量(%)

Table 2 Soil moisture conten(%) in different soil layers in wetter-year

类型 Profile type	样点 Plot	0~5cm	10~15cm	20~25cm	40~45cm	70~75cm	平均 Mean	标准差 Stand deviation
降低型 Decreasing-type	6	9.67	7.24	6.69	6.06	5.67	7.07	1.58
	11/12	11.26	10.49	9.92	8.66	8.01	9.67	1.33
	平均 Mean	10.47	8.87	8.31	7.36	6.84	8.37	1.45
波动型 Waving-type	3	12.41	12.18	11.80	12.95	12.20	12.31	0.42
	5	10.21	9.88	10.53	11.00	11.25	10.57	0.56
	17	15.71	15.02	16.65	15.39	17.86	16.13	1.14
	3-3	12.31	12.58	12.79	13.28	12.39	12.67	0.39
	平均 Mean	12.66	12.42	12.94	13.16	13.42	12.92	0.63
增长型 Increasing-type	1	7.79	9.23	10.63	11.72	11.96	10.27	1.75
	2	7.85	10.01	11.22	13.50	14.53	11.42	2.68
	4	11.05	13.54	15.07	15.23	17.38	14.45	2.34
	7	8.38	10.28	11.47	12.42	13.35	11.18	1.94
	8	8.54	9.61	11.11	12.33	13.78	11.07	2.09
	9	8.69	9.95	10.75	12.23	14.06	11.14	2.08
	10	8.49	9.39	10.51	11.84	13.90	10.82	2.13
	13	10.23	11.08	13.90	15.75	17.61	13.71	3.10
	14	14.73	15.00	16.72	17.99	20.46	16.98	2.35
	15	10.66	11.83	13.32	13.95	15.94	13.14	2.03
	16	14.15	17.11	19.26	21.19	24.16	19.17	3.82
	18	12.94	14.71	15.87	17.21	19.38	16.02	2.45
	1-1	9.74	11.59	12.55	14.13	16.44	12.89	2.54
	1-2	11.98	13.91	15.29	15.97	16.59	14.75	1.84
	2-1	7.89	9.43	10.96	12.76	14.43	11.09	2.60
	3-1	10.07	11.02	12.50	13.30	14.15	12.21	1.66
	3-2	12.04	12.55	14.02	15.13	16.19	13.98	1.74
	4-1	9.00	10.92	11.46	13.60	14.62	11.92	2.23
	4-2	8.93	10.69	11.64	13.04	14.23	11.71	2.05
	4-3	8.89	11.86	12.44	14.52	15.26	12.59	2.51
	平均 Mean	10.10	11.68	13.03	14.40	15.91	13.03	2.30
总体 Total	平均 Mean	10.52	11.58	12.66	13.67	14.83	12.65	1.69
	标准差 Stand deviation	2.21	2.24	2.65	2.90	3.71	2.74	

DCCA 排序不仅能清楚地表达土壤水分的垂直分布特点,而且能反映出环境因子对土壤水分空间分布的影响。由图 1 可见,土地利用对土壤水分的垂直分布的影响最为显著,地貌类型、坡度、坡位与海拔高度的影响次之,而坡向和坡形的影响较小。结合图 1 和表 1 可见,降低型为林地和灌木地,植物根系相对较深,较强的蒸腾造成底层土壤相对较干,植物盖度较大,表层物理蒸发相对较弱,造成表层土壤水分相对较高。另外,降低型分布于低海拔的中下部陡坡地,其风力较小,太阳辐射较少<sup>[18]</sup>,所以表层土壤不仅物理蒸发少,而且除降水补充外还能获得上坡的径流补充,造成表层土壤相对较湿。增长型多为农地和休闲地,一般生长浅根性荒草或种植农作物,表层水分的蒸腾消耗较大,造成土壤表层相对较干。另外,增长型分布在高海拔的中上部较平缓的坡地与山顶,其风力较大,太阳辐射较多<sup>[18]</sup>,因而表层不仅物理蒸发大,而且主要以降水补充为主,径流补充相对较少,造成表层土壤相对较干。坡度较小,水分下渗性强,造成底层土壤相对较湿。波动型多为果园,植物根系介于林地(含灌木地)与农地(含休闲地)之间,地形状态也介于前两类之间,土壤水分的垂直分布与地形因子都与降低型更接近。波动型的土壤水分在表层(0~10cm)一般都呈

降低趋势,10~20cm 以下开始波动。降低型和波动型这两种类型,尽管在研究区较为少见,但土壤水分利用率较高。

欠水年(1999 年),表层不仅物理蒸发很强而且降水补充也很少。因而,从丰水年(1998 年)到欠水年(1999 年),降低型向波动型转化,波动型向增长型转化。

表 3 丰水年与欠水年的土壤水分垂直结构类型

Table 3 Profile type of soil moisture content in wetter-and drier-year

样地 Plot	1	3	5	6	7	1-1	11/12	15	16	17	3-2
1998 年	增长	波动	波动	降低	增长	增长	降低	增长	增长	波动	增长
1999 年	增长	波动	增长	波动	增长	增长	波动	增长	增长	波动	波动

由表 2 可见,1998 年各样点之间土壤含水量的标准差,以表层土壤(0~5cm)最小,随土层深度的增加而增大。表明,丰水年土壤水分以 0~5cm 这个层次的空间(样点之间)差异最小,具有一定的空间稳定性<sup>[19]</sup>。

3.2 土壤水分的季节动态与地形因子的关系

结合图 3、图 4 与图 5,从图 2 的排序图可见,1998 年土壤水分(5 个层次的平均值)的季节动态可分为两个类型。三峰型位于排序图的右上部,较为湿润,土壤平均含水量为 13.05%,季节变异性较大,标准差为 3.96;四峰型位于排序图左下部,较为干旱,土壤平均含水量为 12.28%,季节变异性较小,标准差为 3.22。6 月份到 8 月份,两种类型的土壤含水量都随降雨量的多少而升降,前两次峰(春季与夏季)与降雨峰基本一致。这两种类型的主要差别在于 9 月中旬土壤水分的差异(三峰型为峰,而四峰型出现谷),这是因为地形对小气候与物候的影响所造成的<sup>[18]</sup>。三峰型分布在海拔较高、偏阴、坡度平缓的中上部位,在 9 月中旬,不仅其植物与农作物的叶面积指数降低,而且太阳辐射减少、地温与气温降低,造成其物理蒸发相对较低,因而土壤水分达到第 3 次高峰。以后由于植被的大量凋落,地面裸露,物理蒸发增强,尽管降雨量有少量回升,土壤含水量也呈回落趋势。四峰型分布在海拔较低、偏阳、坡度较陡的中下部,叶面积指数降低速率以及小气候变凉的速率都滞后于三峰型。到 9 月中旬,叶面积降低速率未达到高峰,因为降雨量的持续降低与物理蒸发还较强,形成土壤含水量的低谷,一直至 10 月初,叶面积指数降低到达高潮,物理蒸发也较弱了,土壤含水量达到高峰。

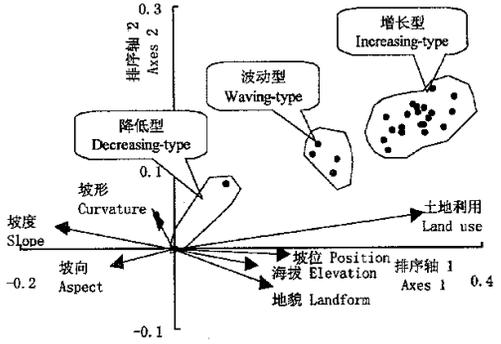


图 1 丰水年土壤水分垂直分布的 DCCA 二维排序图

Fig. 1 Ordination diagram of the first two axes of a Detrended Canonical Correspondence Analysis of profile distribution of time-averaged soil moisture content in wetter-year and environmental factors

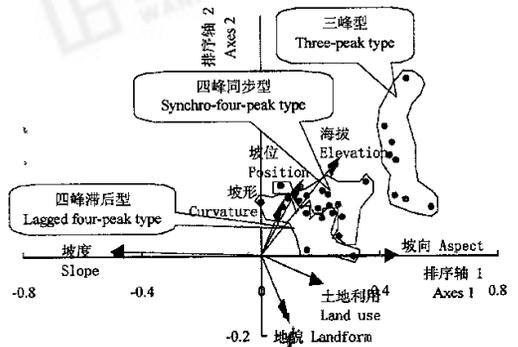


图 2 丰水年土壤水分季节分布的 DCCA 二维排序图

Fig. 2 Ordination diagram of the first two axes of a Detrended Canonical Correspondence Analysis of seasonal distribution of time-averaged soil moisture content in wetter-year and environmental factors

四峰型还可以再区分为两个类型(见图 2), 四峰滞后型位于排序图的左下部, 土壤较干, 土壤含水量平均为 11.4%, 季节变异性较低, 标准差为 2.98。四峰同步型相对于靠右上部, 土壤较湿, 土壤含水量平均为 13.16%, 季节变异性较高, 标准差为 3.46。这两个类型的区别主要在于土壤含水量在春季第 1 次峰出现的早晚。这也是因为地形因子所影响的。四峰滞后型的海拔相对较低、坡度较大、坡位偏下, 在春季降雨高峰期(5月中旬), 降雨入渗相对较少, 后来从上坡高海拔处来的径流与壤中流补充较多, 造成土壤含水量的第 1 次高峰滞后(6月初)。

总体来说, 丰水年土壤水分的季节变化主要受控于降雨量, 表现为与降雨量同步变化。可是, 地形对小气候与物候的影响, 使得土壤水分季节变化或多或少地偏离与降雨量的同步变化。

地形对丰水年土壤水分季节分布的影响以秋季最强烈, 夏季最弱, 春季介于两者之间。由表 4、图 3、4 和图 5 可见, 1998 年夏季, 土壤水分主要受控于降雨量, 地形的影响相对较小, 因而土壤水分各个样点的标准差较小, 表明土壤水分在夏季的空间稳定性较强<sup>[19]</sup>。秋季, 因为地形对小气候与物候的影响较为显著, 造成土壤水分季节动态与降雨量不同步, 因而土壤水分各个样点的标准差较大, 说明土壤水分在秋季的空间变异性较大。春季则介于两者之间。

表 4 丰水年不同周期全部样点的平均土壤含水量(%)与标准差

Table 4 Average soil moisture content(%) and standard deviation of different measurement occasions in wetter-yaer

日期 Date	5. 15	6. 1	6. 15	7. 1	8. 1	8. 15	9. 1	9. 15	10. 1	10. 15
平均 Mean	16.69	14.74	10.41	10.69	14.43	10.34	12.15	12.09	13.67	11.31
标准差 Standard deviation	4.17	3.11	2.88	3.31	2.63	3.01	2.66	6.79	4.60	3.15

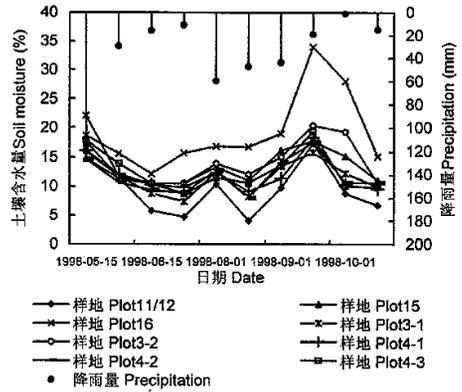


图 3 丰水年土壤水分的季节变化图(三峰型)

Fig. 3 Seasonal dynamics of layer-averaged soil moisture in wetter-year(Three-peak type)

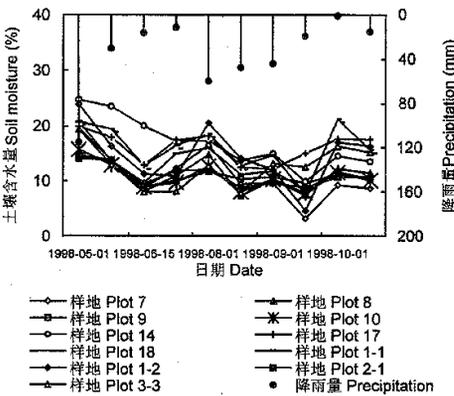


图 4 丰水年土壤水分的季节变化图(四峰同步型)

Fig. 4 Seasonal dynamics of layer-averaged soil moisture in wetter-year(Four-peak synchronous type)

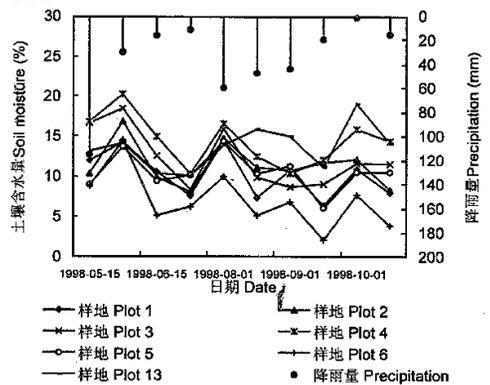


图 5 丰水年土壤水分的季节变化图(四峰滞后型)

Fig. 5 Seasonal dynamics of layer-averaged soil moisture in wetter-year(Lagged-peak type)

#### 4 结论

(1)因为 DCCA 排序轴同时结合了土壤水分因子与环境因子,所以排序图不仅能清楚地表达土壤水分的时空分异特点,而且能表现出环境因子对土壤水分时空分异的影响。

根据 DCCA 排序分析,丰水年(1998)土壤水分的垂直分布可分为降低型、波动型和增长型 3 种类型。土地利用对土壤水分垂直分布的影响最为显著,地貌类型、坡度、坡位与海拔高度的影响次之,而坡向和坡形的影响则较小。其中,降低型和波动型的土壤水分利用率较高。从丰水年(1998 年)到欠水年(1999 年),降低型向波动型转化,波动型向增长型转化。

(2)土壤水分的季节变化在丰水年表现为三峰型、四峰同步型和四峰滞后型 3 种类型。坡度、海拔高度、坡向与坡位对土壤水分季节变化的影响显著,而地貌类型、坡形与土地利用的影响则相对较弱。

(2)DCCA 排序还能清楚地表现土壤水分的空间稳定性。丰水年各层次的土壤含水量在流域内的空间变异,以表层(0~5cm)最小,随土层深度的增加而增大。丰水年各季节的土壤含水量在流域内的空间变异,以秋季最大,春季次之,夏季最小。丰水年土壤水分的空间稳定层(0~5cm)与空间稳定期(夏季),对估计整个流域的土壤含水量有重要意义<sup>[19]</sup>。

#### 参考文献

- [1] Crave A and Gascuel-odux C. The influence of topography on the time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological Processes*, 1997, **11**: 203~210.
- [2] Myberg L. Spatial variability of soil water content in the covered catchment of Gardsjos Sweden. *Hydrology Processes*, 1996, **10**: 89~103.
- [3] Anderson M G and Kneale P E. Topography and hillslope soil water relationships in a catchment of low relief. *Journal of Hydrology*, 1980, **47**: 115~128.
- [4] Cerda A. The influence of geomorphological position and vegetation cover on the erosional and hydrological processes on a Mediterranean hillslope. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 661~671.
- [5] Reid I. The influence of slope orientation upon the soil moisture regime, and its hydrogeomorphological significance. *Journal of Hydrology*, 1973, **19**: 309~321.
- [6] Kalma J D. Predicting catchment scale moisture status with limited field measurements. *Hydrology Processes*, 1995, **9**: 445~468.
- [7] 傅伯杰. 陕北黄土高原土地评价研究. *水土保持学报*. 1991, **5**(1): 1~7.
- [8] 穆兴民, 陈国良, Hidenori, 等. 黄土区基本环境要素变人对丘陵地形的响应水土保持研究, 1998, **5**(11): 7~17.
- [9] 庄季屏. 四十年来的中国土壤水分研究. *土壤学报*. 1989, **26**(3): 341~248.
- [10] 李玉山. 黄土区土壤水资源循环特征及其对陆地水分循环的影响. *生态学报*. 1983, **3**(2): 91~101.
- [11] 韩仕峰, 李玉山, 张孝中. 黄土高原地区土壤水分区域动态特征. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*. 1989, (10): 161~167.
- [12] 杨文治, 邵明安, 彭新德, 等. 黄土高原环境的旱化与黄土中水分关系. *中国科学 D*. 1998, **28**(4): 357~365.
- [13] Kitterod N. Geostatistic interpolation of soil moisture. *Nordic Hydrology*, 1997, **28**(4/5): 307~328.
- [14] Bá rdossy A and Lehmann W. Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part I: geostatistical analysis. *Journal of Hydrology*, 1998, **206**: 1~5.
- [15] Western A W, Bl eschl G, Brayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Trrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, **205**: 20~37.
- [16] 张金屯. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [17] 邱 扬, 张金屯. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用. *生态学报*, 2000, **20**(2): 199~206.
- [18] 罗曼诺娃 E H. 基本气候要素的小气候变化. 北京: 科学出版社. 1981.
- [19] Grayson R B and Western A W. Towards area estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. *Journal of Hydrology*, 1998, **207**: 68~82.