

# 小流域土壤水分空间分异特征及时稳性分析

王玉宽, 朱 波, 高美容

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 利用常规统计方法对川中丘陵区盐亭县截流小流域土壤水分空间监测资料进行了分析。结果表明, 小流域土壤水分空间分异明显, 且主要受地形和微地貌控制, 台地水分含量明显高于坡地; 土壤剖面垂直变化复杂, 水分分层不明显; 流域多级台地中, 中、高台位土壤水含量大于低台位, 中台位大于高台位; 土壤水分随坡向的分异规律有: 北向坡> 南向坡> 西向坡; 同台林地水分含量大于农地; 土壤水分空间分异随时间变化小, 具有时稳性。研究还表明, 流域内存在可反映流域表层土壤平均水分状况的均值点, 可作为流域平均土壤含水量的监测点。

**关键词:** 土壤水分; 空间分异; 时稳性

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

土壤水分是影响地表水文过程(包括洪水、土壤侵蚀、溶质迁移和地表-大气系统相互作用)以及地貌和土壤发生等过程的重要因素, 其随时空变化。俄国土壤学家 Romanova(1977)<sup>[1]</sup>说过, 一个坡面上不同点土壤水分含量的差异, 有时甚至远大于两个气候带之间的土壤水分差异。了解和掌握土壤水分这种时空变化特征与规律, 对于理解和预测上述过程, 解决一系列涉及土壤资源、水资源, 以及其他自然资源保护和利用问题, 具有重要的意义。

本文以川中丘陵区盐亭截流小流域为例, 通过分析流域土壤水分空间监测资料, 揭示紫色丘陵区小流域土壤水分空间分异特征及土壤水分空间分布的时间稳定性。

## 1 研究区及研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川盐亭县林山乡截流村截流小流域, 105°27'E, 31°16'N。集水面积 0.38 km<sup>2</sup>。

截流小流域所在区域为川中丘陵区的中深丘区, 海拔 400~ 600 m。区内出露的地层主要为侏罗

纪上统蓬莱镇组和白垩纪下统城墙岩群组的紫色砂岩、泥岩, 砂岩、泥岩呈互层结构, 岩层倾角 3°~ 6°。由于岩层组合的变异, 给地形和土壤的发育带来特殊影响。水平砂泥岩互层在谷坡形成多级梯地, 山顶呈园丘、长岗状, 谷底宽 50~ 150 m, 比降 1/150, 两侧山坡较陡, 平均坡降在 10%~ 30%。

研究区气候具有典型亚热带湿润季风气候特征, 年均气温 17.3℃, 多年平均降雨量 826 mm。土壤主要为水稻土和石灰性紫色土。土层厚度一般 20~ 70 cm, 质地为中壤。植被以散生柏树、稀疏灌丛(黄荆、马桑等)和农作物为主, 土地利用以农地为主。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 样点布设与土壤水分测定

土壤水分主要受两方面因素控制, 一是自然因素, 另一个是人为因素。Furley (1971), Gerrard (1981), A. A. Svetlitchnyi(2003)等<sup>[1]</sup>研究认为自然因素中除降雨外, 土壤水分空间变化最主要受地貌控制。人为因素主要是人类活动对地表性状的改变, 以及灌溉等, 直接或间接的改变或影响土壤水分。考虑到这两方面的因素, 本次研究在布置水分

收稿日期(Received date): 2003- 11- 12; 改回日期(Accepted): 2003- 12- 12。

基金项目(Foundation item): 中科院知识创新项目(KZCX2- SW- 330, KZCX2- SW- 319)。[Knowledge Innovation project of CAS (KZCX2- SW- 330, KZCX2- SW- 319).]

作者简介(Biography): 王玉宽, 主要从事山地侵蚀与环境修复方面研究。E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn。[Corresponding author: Wang Yukuan, interested in soil erosion and conservation. E-mail: wangyukuan@imde.ac.cn.]

样点时,主要考虑了流域地形地貌和土地利用,同时根据小流域微地貌特征,考虑了坡坎和台地。水分样点按线状分别沿北山、南山和西山三山顶至沟谷布设,共布设样点 24 个,见图 1。其中农地样点 12 个(编号为 121、122、123、124、221、222、321、322、41、71、51、511),林地 12 个(编号为 111、112、113、114、211、212、213、311、312、313、314、61)。农地均为台地,种植作物主要为小麦、红苕、玉米轮作或油菜、花生轮作;林地为坡地或坡坎,树种为柏树,覆盖率在 40- 70% 左右。样点均不受灌溉影响。取样时间从 1998- 05- 19 起至 2001- 03- 22,每隔 7 天取一次样,用土钻在每个样点分层取,取样深度 50 cm,分 3 个层次: 0~ 15 cm、15~ 30 cm、30~ 50 cm。烘干法测定土壤水分含量。

1. 2. 2 分析方法

利用 Vachauh 等人<sup>[2]</sup>提出的流域相对干湿点分布统计分析方法。首先计算一次取样过程各取样点土壤含水量相对离差  $\delta_i$

$$\delta_i = \frac{S_i - \bar{S}}{\bar{S}} \tag{1}$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \tag{2}$$

式中  $S_i$  为土壤重量含水量,  $n$  为一次采样土样点数量。然后计算每一个取样点平均相对离差  $\bar{\delta}$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_i \tag{3}$$

式中  $m$  为采样总次数,  $j$  为采样次数。同时计算各点平均相对离差的标准差  $\sigma(\delta_i)$

$$\sigma(\delta_i) = \left( \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\delta_i - \bar{\delta})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

$\bar{\delta}_i$  的统计物理意义代表  $i$  点处土壤平均相对干旱或湿润程度。 $\bar{\delta}_i$  为负,表示  $i$  点土壤水分含量总体上小于流域平均土壤含水量,为相对干旱点,负值越大,表示相对干旱程度越高,反之亦然; $\bar{\delta}_i$  为正,表示  $i$  点为相对湿润点,正值越大,表示越湿润。 $\sigma(\delta_i)$  表示  $i$  点的相对干湿时稳性特征,  $\sigma(\delta_i)$  值越小,表示在监测时段内  $i$  点的相对干湿程度变化越小,即相对干旱点始终为相对干旱点,相对湿润点始终为相对湿润点,称这些点为时稳性点。 $\bar{\delta}_i$  值趋于零,且  $\sigma(\delta_i)$  最小的点,其水分含量接近流域平均值。

2 结果与讨论

2. 1 土壤水分垂直分异动态变化特征

取 1999- 07~ 12 小流域北山上、中、下 3 个土壤水分监测点 112(林地) 122(台坡农地)、123(台坡农地) 号土壤水分资料,分别绘制 0~ 15cm、15~ 35cm、35~ 50cm 土层土壤水分含量随时间变化曲线,如图 2A、B、C。从图中可以看出,三个监测点土壤水分垂直分布随时间变化复杂,在较小的时间尺

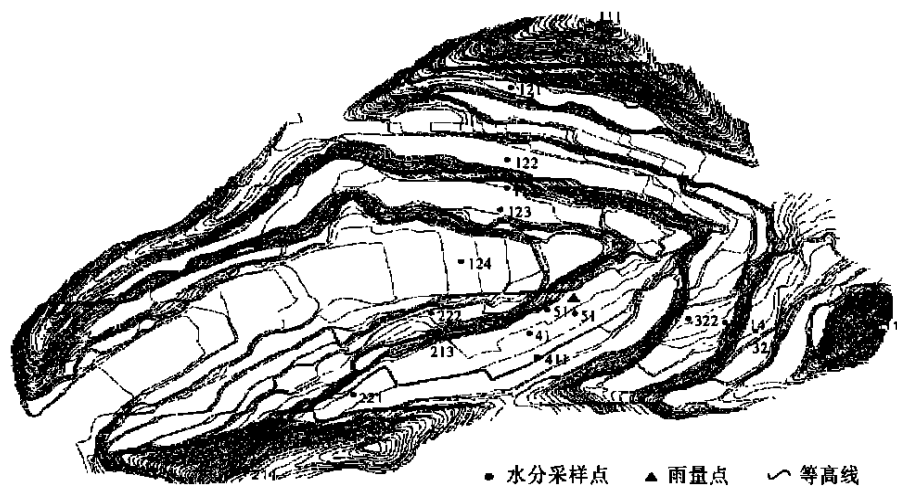


图 1 盐亭截流小流域水分样点分布示意图

Fig. 1 The distribution of the sampling sites in the Jielu catchment, Yanting

度内,很难看出土壤水分的垂直分布规律。同时从1999 至季节土壤剖面平均含水量看(如图 3a、b、c),土壤水分分层规律亦不明显,各点表现不一。统计3 点土壤水分剖面层间含水量差异,平均相差在13.9%~ 25.4% 之间,土壤水分垂直变化小。总体来说,流域土壤分层不明显,与资料<sup>[3]</sup> 所得结论一致。

2.2 土壤水分水平分异特征

利用公式(1)、(2)、(3) 计算流域24 个测点0~35cm 土层平均土壤含水量相对离差值 $\bar{\delta}_i$  及其标准差 $\sigma(\bar{\delta}_i)$ ,并在平面直角坐标系内依照 $\bar{\delta}_i$  值的大小排序,结果见图4。图中显示24 个测点中,土壤含水量平均相对离差为负的有9 个点,去除 $\bar{\delta}_i$  值接近零的点51,有8 个为相对干旱点。其他15 个点为正值,同样去除4 个 $\bar{\delta}_i$  值接近与零得点,剩余的点为相对湿润点。 $\bar{\delta}_i$  值接近零的点51、41、123、114、222 为流域土壤水分似均值点,其土壤水分状况接近流域平均水平。从各点分布情况,可以看出流域土壤水分空间分异特征。

1. 干湿点分布与流域地形和地貌相关,不同地形和微地貌,土壤水分状况不同,且分异明显。流域相对干旱点均分布于山顶斜坡或中下部台坎上,地面坡度较陡,在15° 以上;相对湿润点除211 点分布于坡度较大的山顶斜坡外,其余均分布于高中低各级台地;接近流域平均水平的水分近似均值点均分布于流域低台地;土壤水分含量高值点位于谷地。

2. 不同坡形土壤干湿差异较大。点111、112、311、312、313、211 和212 均位于山顶斜坡部位,但处于发散形坡点111、311、312、和212 为相对干旱点,而处于汇聚形坡的112 和211 点均为相对湿润点。

3. 不同土地利用类型,土壤水分差异显著。图1 所示的61 号测点为果园地(台地),与同台位的41、511、123 农地相比,其排序靠后,虽均为相对湿润点,但61 号代表的果园地土壤相对湿润程度更

大。说明园林地保水效果较好。

4. 中、高台位土壤水分大于低台位,中台位大于高台位。点114、123、511、41 处于低台位,其土壤含水量接近流域平均水平,处于中高台位水分监测点122、322、321、221 属于相对湿润点,其土壤含水量均大于流域平均值。处于高台位的点121 和321 其土壤相对湿润程度均小于相应坡面中台位的点122 和322。一般的认识认为低台位土壤含水量高于中高台位,但此结果却正好相反。分析其原因,可能与中高台位蓄积上部斜坡来水,同时阻断地表径流和壤中流有关。

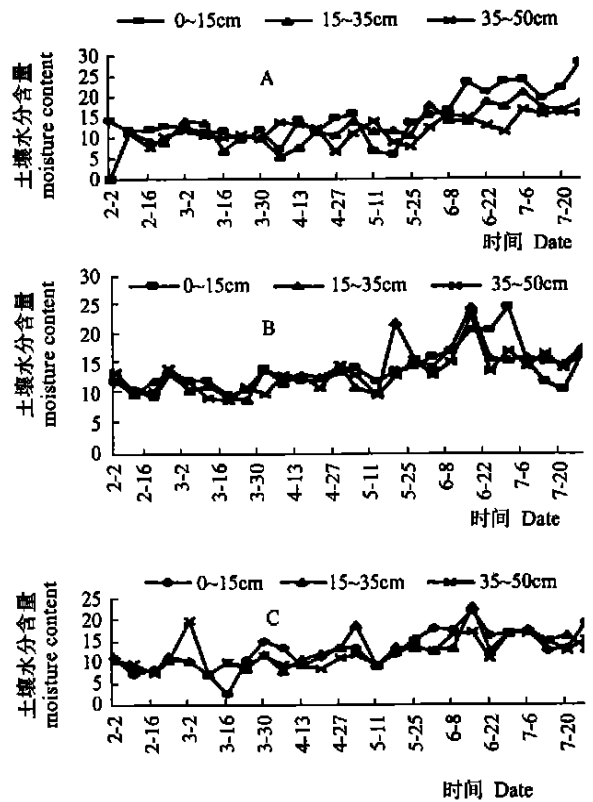


图2 不同深度土壤水分随时间的变化

Fig. 2 Temporal changes in soil moisture content at three soil depth

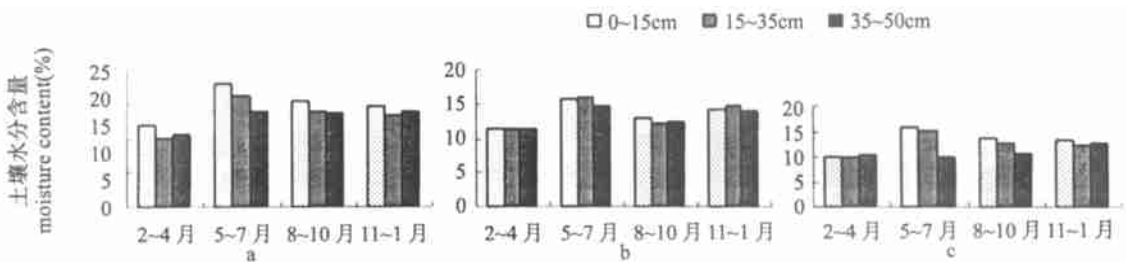


图3 不同深度土壤水分季节变化

Fig. 3 Seasonal changes in soil moisture content at three soil depth

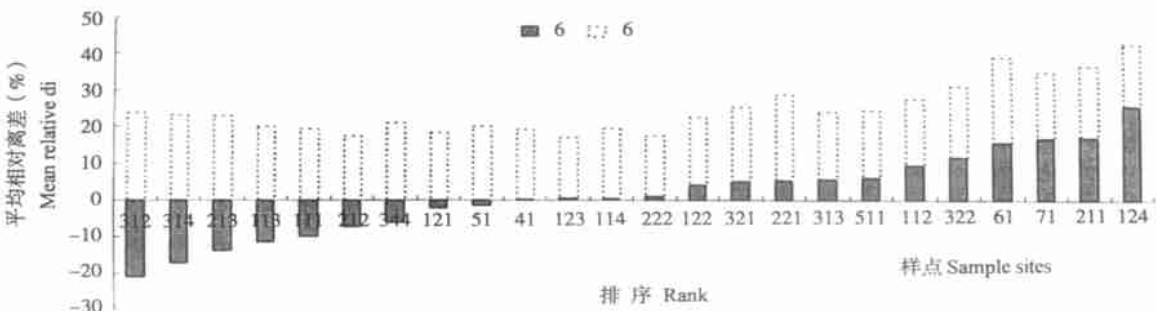


图 4 平均相对离差排序  
Fig. 4 Ranked mean relative differences

5. 土壤水分随坡向分异不十分明显,但总体上有:北向坡>南向坡>西向坡。研究布设的 3 条土壤水分监测线,可分别代表三个方向,即北向、南向和西向,但三条线上具有三个方向连续可比的点少,只有低台位南向坡点 123、114,北向坡 221 和东向坡 41、51 属于同台位点( 511 为土壤改良监测点,不计)。从排序图上看,土壤含水量具有北向坡>南向坡>西向坡。分别统计 3 条监测线上山顶斜坡连续两个测点和斜坡下部第一级台地水分监测点 1999-02~2000-01 土壤水分季节均值(表 1),也具有上述特征,但南向坡和北向坡差异不显著。

表 1 不同坡向土壤水分分异

Table 1 Soil moisture content at different slope direction					
点号	夏	秋	冬	春	年平均
北山(南向坡)	14.7	13.5	13.7	10.1	13.0
南山(北向坡)	14.7	13.4	14.7	10.9	13.4
东山(西向坡)	12.4	13.3	13.4	8.9	12.0

从上述流域土壤水分分异特征可以看出,地形、地貌是小流域土壤水分分异的主导因素,这与多数研究结论相吻合<sup>[4-6]</sup>。需要指出的是,在川中丘陵区小流域中,地形和地貌(包括微地貌)不仅直接影响与土壤水分相关的降雨径流、入渗、蒸发以及土壤结构等因素,同时在很大程度上控制着流域土地利用格局,如阶坡和台坎主要为林地和草地,台坡主要为农地和园地等,从而使流域土壤水分随地形地貌分异更显著。坡向对流域土壤水分分异影响相对较弱,其原因主要与本区湿润的气候条件有关。多云、雾,空气湿度大,相对减弱了太阳的直接辐射,从而减小了辐射引起的蒸发和植物蒸腾在坡向上的差异。

2.3 土壤水分空间分布的时稳性分析

平均相对离差标准差是衡量土壤水分空间分异

时稳性的一个指标,标准差越小,时稳性越好。从上述得到流域相对干湿点平均相对离差标准差看,标准差总体上处于较小的范围,16.5%~23.8%,说明流域土壤水分空间分异具有时稳性,即在整个观测期内各测点土壤相对干湿变化小。利用数据分割的办法做进一步验证。将监测期内取得的全部数据(148 次)按时间等分为两部分。分别利用公式(1)、(2)计算每一部分各点的平均相对离差,然后点绘成曲线图(图 5),观测两条曲线整体拟合程度和各点的叠合度。从图 5 可以看出,前后两部分数据得到的平均相对离差曲线总体拟合较好。其中 14 个点前后平均相对离差相差小于 5%,其余点相差 5.5%~10.8%。仅有个别点如 222 前后出现干湿交叉,时稳性相对较差。总体检验结果反映出流域土壤水分空间分布的时稳性特征。

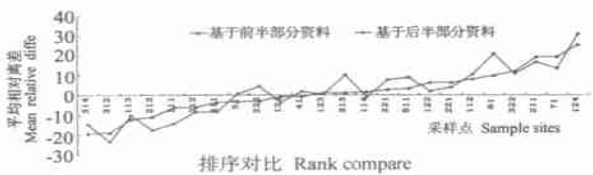


图 5 分割资料排序对比  
Fig. 5 Ranked mean relative differences using the first half of the data and second half of the data respectively

2.4 土壤水分均值点代表性

在前面计算分析土壤相对干湿程度时,将土壤水分平均相对离差  $\bar{\delta}$  值接近零的点 51、41、123、114、222 近似认为流域土壤水分均值点。流域中是否存在这样一些点,其土壤水分状况能够代表流域平均水平。如果确实存在这样的点,在某些情况下,可以大大减少土壤水分监测工作量,因此有必要作

进一步分析。

计算每一次 24 个水分监测点 0~ 35cm 土层土壤水分含量平均值, 并分别与点 51、41、123、114、222 的监测值进行相关分析, 结果见表 2。表中所示, 上述各点与流域均值相关性都比较好, 相关系数均在 0. 7 以上, 其中点 123 的相关系数达到 0. 8, 可见流域中确实存在水分均值点, 在一定程度上可以表达流域平均水分状况。

表 2 均值点代表性分析

Table 4 Analgsis on representative of average soil moisture monitoring sites

点位	回归模型	样本数	R	R <sup>2</sup>	显著水平(α = 0. 01)
51	Y= 5. 129+ 0. 595x	140	0. 77	0. 59	显著
41	Y= 4. 647+ 0. 624x	145	0. 74	0. 54	显著
123	Y= 4. 056+ 0. 671x	154	0. 80	0. 64	显著
114	Y= 4. 978+ 0. 597x	168	0. 75	0. 57	显著
222	Y= 3. 801+ 0. 702x	155	0. 76	0. 58	显著

3 结论

1. 川中丘陵区小流域土壤水分空间分异主要受地形和微地貌控制, 土壤剖面含水量变化复杂, 水

分分层不明显。2. 土壤水分空间分异随时间变化小, 具有时稳性。3. 流域内存在可反映流域表层土壤平均水分状况的均值点, 可作为流域土壤平均含水量的监测点。

参考文献(References):

[ 1] A. A. Svetlitchnyi, S. V. Plotnitskiy, 2003. Spatail distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis of topographic data[ J]. *Journal of Hydrology*, 2003, ( 277): 50~ 60.

[ 2] Vachaud, G. R. . De Silans Passerat. Temporal stability of spatiaily measured soil water probability density function[ J]. *Journal of Soil Science, Am.*, 1985, **49**, 822~ 827.

[ 3] Li Zhongming. Purple Soil in China ( 1) [ M]. Chinese Science publishing company, 1991, 190~ 191. [ 李仲明. 中国紫色土( 上篇) [ M]. 科学出版社, 1991, 190~ 191. ]

[ 4] Qiu Yang, Fu Bojie. Spatail heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors [ J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2001, **12**( 5): 715~ 720. [ 邱杨, 傅伯杰等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[ J]. 应用生态学报, 2001, **12**( 5): 715~ 720. ]

[ 5] Loague, K. , 1992. Soil water content at R- 5, Part 1. Spatail and temporal variability[ J]. *Hydrol.* **139**, 233~ 251

[ 6] Western, A. W. . Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrarra catchment[ J]. *Hydrol.* 1998, **205**( 1~ 2), 20~ 37.

The Characteristics of Spatial Heterogeneity of Soil Moisture within Catchments and Temporal Stability

WANG Yukuan, ZHU Bo, GAO Meirong

( Institute of Mountain Hazards and Environment, the Chinese Academy of Science, Chengdu 610041)

**Abstract:** Detailed spatially measurements of soil moisture were conducted weekly within Jieliu catchment of hilly area of the Central Sichuan Basim from May 1998 to March 2001. Results indicated that soil moisture has no significant profile patterns and spatial heterogeneity of soil moisture depends on relief mainly. Effects of lands us on the spatial heterogeneity of soil moisture are considerable. Study also shows the spatial distribution of soil moisture is time- stable and there are some time- stable monitoring sites which can represent mean areal soil moisture content in the catchment.

**Keywords:** Soil moisture; Spatial heterogeneity; Time stability