

# 祁连山排露沟流域土壤水分时空分布

闫文德<sup>1</sup>, 王金叶<sup>1,2,3</sup>, 王彦辉<sup>4</sup>, 田大伦<sup>1</sup>, 王顺利<sup>3</sup>

(1. 中南林学院 生命科学与技术学院, 湖南 长沙 412006; 2. 桂林工学院 旅游学院, 广西 桂林 541004;

3. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000; 4. 中国林科院 生态环境研究所, 北京 100091)

**摘 要:**对国家重点野外科学观测试验站——祁连山森林生态站排露沟流域土壤水文时空分布特征进行了研究, 结果表明: (1) 排露沟流域土壤水分年动态具有明显的季节变化, 一个水文年分为前蓄墒、失墒、后蓄墒和稳定 4 个阶段; 降水影响生长季节土壤表层水分变化, 森林植物影响根系层土壤水分变化, 森林植物影响大于降水影响; (2) 土壤水分垂直分布随深度而变化, 土壤类型间有差异; (3) 土壤水分空间分布高海拔多, 阴坡次之, 阳坡最少。

**关键词:** 土壤水分; 时空分布; 祁连山

**中图分类号:** S714.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7461(2006)03-0021-05

Space-time Distribution of Soil Water in Pailugou Watershed in Qilian Mountains

YAN Wen-de<sup>1</sup>, WANG Jin-ye<sup>1,2,3</sup>, WANG Yan-hui<sup>4</sup>, TIAN Da-lun<sup>1</sup>, WANG Shun-li<sup>3</sup>

(1. College of Life Science and Technology, Center-South Forestry University, Zhuzhou, Hunan 412006, China;

2. Tourism College, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilianshan Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China;

4. Research Institute of Forest Ecology and Environment, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The paper studied the space-time distribution characteristics of soil water in Pailugou Guilin watershed in Qilian Mountains forest ecology monitoring station, a state key field scientific experimental station. The results showed that soil water changed obviously with season and a hydrological year was divided into four phases: early stage of water storing, water losing, late stage of water storing and stable stage of water storing. The precipitation affected the water change in the surface soil layer in growing season while forest vegetation growth affected the water change of root layer. The forest vegetation growing are more than that of precipitation's. The soil water changed along with soil depth. The differences of spatial distribution regularity in soil water significant, the soil water of high altitude was more than shade slope and sunny slope.

**Key words:** soil water; space-time distribution; Qilian Mountains

土壤是重要的水文作用层, 它不仅支配降水如何被分配为径流和下渗, 还决定入射辐射如何分配给显热和潜热。土壤水分时空分布可用于揭示流域产流过程和机理。由于实测土壤水分耗资耗力, 研究大多用微波探知某个点土层总的水分状况, 或在研究过程中淡化土壤水分时空分布, 在水分动力学、有效性及水文功能等方面进行深入研究和理论分析<sup>[1~6]</sup>。研究土壤水分随深度变化需要选择一个典

型的土壤水分垂直结构, 然后用特征指数进行面上的标定; 空间分布需要一个梯度变化明显的典型流域, 进行长期的定位观测。祁连山排露沟流域是典型的林草复合流域, 植被、土壤具有明显的梯度变化规律, 是国家重点野外科学观测试验站。祁连山森林生态站固定试验流域进行了 10 a 的水文观测, 积累了丰富的数据资料, 在森林对水分的调节作用、径流特征、枯落物及土壤的水分效应研究方面取得了进

收稿日期: 2005-09-05 修回日期: 2005-11-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30230290)

作者简介: 闫文德(1969-), 男, 甘肃武威人, 副教授, 博士, 主要从事森林生态学教学与研究工作。

展<sup>[7~10]</sup>。对排露沟流域进行土壤水分时空分布研究,对于揭示干旱半干旱地区土壤对水资源的分配和径流形成具有重要意义。

1 试验区概况

排露沟流域位于国家重点野外科学观测试验站——祁连山森林生态站西水试验区(100°17'E、38°24'N),海拔 2 600~3 800 m,属高寒山地森林草原气候。流域出口附近气象站年均气温 0.5℃,年降水量 368.0 mm,年均蒸发量 1 051.7 mm,平均相对湿度 60%。主要林型为青海云杉林,呈片状分布于阴坡、半阴坡;阳坡、半阳坡主要为山地草原,伴生有小灌木;高海拔为湿性灌木林。流域内建有林内小气候梯度自动观测塔、草地小气候自动观测塔、林内外气象观测哨、测流堰、水量平衡场、地表径流场、林冠截留和土壤水分动态及土壤蒸发观测等设施。

2 研究方法

2.1 标准地布设

在试验流域选择有代表性的 3 种植被类型:青海云杉林(*Picea crassifolia*)、灌丛林和草地,设固定、临时标准地 38 块,调查其基本信息(表 1)。

2.2 土壤水分及水文常数测定

用大小环刀在标准地外侧取样,带回室内采用浸水—烘干称重法等常规方法<sup>[11,12]</sup>测定土壤容重、土壤总孔隙度、土壤最大持水量、土壤最小持水量(田间持水量)等指标。每年从 5 月开始,每月定时(1 日、11 日、21 日)在各标准地内用土钻分层取样,带回室内用烘干称重法测土壤含水量,结合土壤体积测定计算土壤容积含水量(%),测定工作在 10 月 1 日结束;雨后为测定土壤水分消退过程加密取样;为测定冻土含水量,在土壤冻结层取样;2003 年开始用 TDR 土壤水分测定仪和烘干称重法同时测定。

表 1 部分标准地概况

Table 1 General situation of some experiment fields

地理地形特征							植被 <sup>①</sup> 类型	土壤 类型	植物特征(乔木、灌木、牧草)					
编号	海拔 /m	坡向	坡位	坡度 /°	土层厚 度/cm	样地大小 /m×m			优势种	郁闭度	盖度/%	平均高 /m	平均胸 径/cm	年龄 /a
G1	2 715	N	中	32	135	20×20	PCF	UFTS	PC	0.67		9.5	12.6	76.7
G2	2 800	N	中	28	82	20×36	PCF	UFTS	PC	0.58		9.7	13.5	60.5
G3	2 840	NE	中	16	80	20×20	PCF	UFTS	PC	0.87		8.8	11.5	59.3
G4	2 952	N	中	33	60	20×20	PCF	UFTS	PC	0.83		7.6	12.6	73.8
G5	3 015	N	中	22	70	20×20	PCF	UFTS	PC	0.78		7.0	12.9	75.4
G6	3 100	N	中	20	90	20×20	SPCF	UFTS	PC	0.40		6.9	13.1	69.8
G7	3 300	NE	上	34	57	23.5×20	SPCF	UFTS	PC	0.35		5.6	12.7	84.0
GM6	3 600	N	中上	31	25	5×5	C+S	SSMS	吉拉柳		75	0.5	—	—
GM8	3 500	NE	中上	33	40	5×5	C+S	SSMS	吉拉柳		65	0.6	—	—
GM11	3 400	NE	中上	30	40	5×5	C+P	SSMS	金露梅		90	1.0	—	—
GM13	3 300	N	中上	28	35	5×5	S	SSMS	吉拉柳		60	0.9	—	—
GM14	3 300	N	中上	28	40	5×5	C+S	SSMS	吉拉柳		30	0.6	—	—
GM15	3 300	NE	中上	28	40	5×5	C+S	SSMS	杜鹃		76	0.9	—	—
YC3	2 700	SW	中下	35	90	1×1	针茅	UMCS	针茅		65	0.1	—	—
YC5	2 800	SW	中下	28	60	1×1	针茅	UMCS	针茅		75	0.1	—	—
YC7	2 900	SE	中	28	55	1×1	紫菀+针茅	UMCS	狼毒		43	0.1	—	—
YC9	2 980	S	上	10	60	1×1	针茅	UMCS	针茅		85	0.3	—	—

①PCF-青海云杉林;SPCF-灌丛青海云杉林;C+S-锦鸡儿+吉拉柳灌丛;C+P-锦鸡儿+金露梅灌丛;S-吉拉柳灌丛;PC-青海云杉;UFTS-山地森林灰褐土;UMCS-山地栗钙土;SSMS 亚高山灌丛草甸土。

2.3 资料整理与分析

收集祁连山森林生态站 10 a 的土壤水分物理性质及动态测定,2003—2004 年补充测定资料,分类建立数据库,用 Spss,Excel 和常规的数学方法进行统计分析。同时,结合试验区植被生长情况、天气状况研究土壤水分时空特征。

3 结果与分析

3.1 土壤水分特性

研究表明,祁连山排露沟流域 3 类土壤水分特性有较大差距(表 2)。其中,亚高山灌丛草甸土最好,其次为山地森林灰褐土,山地栗钙土最差。土壤水分特性与土壤的空间分布和垂直变化有关,随土

壤深度增加,各水分参数呈下降趋势(图 1),土壤最大持水量、最小持水量、毛管持水量均随土壤深度增加而减小,但下降幅度因土壤类型而有差异,表层土壤具有较好的水文效应。因此,在进行流域水分运动过程模拟时,既要充分考虑土壤类型差异造成的水分状况及运动规律的不同,还要考虑土壤不同层次及土层厚度的影响。

3.2 土壤水分季节动态

3.2.1 水文年划分 径流区土壤水分的季节变化直接影响径流形成,排露沟流域 3 类土壤水分均随时间推移发生规律性变化(表 3),土壤水分动态在一个水文年分为 4 个阶段。

- (1)前蓄墒阶段(5 月)。这一阶段处在生长季初期,由于积雪融化补充、降水增加和土壤解冻以冰晶形式存贮的水分,活动层土壤水分含量相对较高。
- (2)失墒阶段(6~9 月)。这一时期气温升高,植物进入生长盛期,蒸发散大。降雨量虽大,但仅使表

层土壤水分表现为增加趋势,根系层土壤水分入不敷出,呈下降趋势,植物根系分布层土壤水分在这一阶段达到最低值。

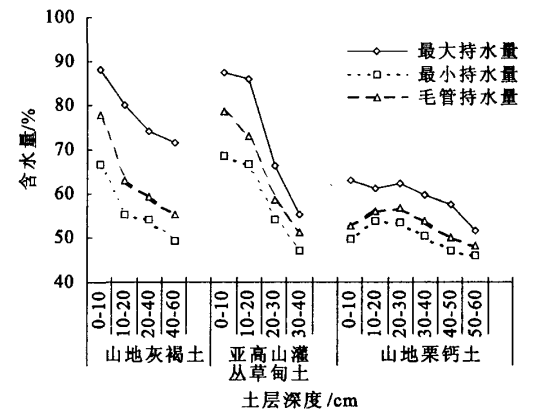


图 1 排露沟流域土壤水分参数随深度变化  
Fig. 1 The water constant changing with depth in Pailugou

表 2 祁连山排露沟流域土壤水分特性(2000—2003 年)

万方数据 土壤类型	土层深度	土壤容重	最大持水量	最小持水量	毛管持水量	总孔隙度
	/cm	/g·cm <sup>-3</sup>	/%	/%	/%	/%
亚高山灌丛草甸土	0~40	0.530 9	81.24	63.13	69.65	76.71
山地森林灰褐土	0~60	0.497 7	78.22	52.82	59.78	77.46
山地栗钙土	0~60	1.037 9	59.09	50.01	52.86	59.86

- (3)后蓄墒阶段(10 月)。这一阶段处在末期,土壤开始冻结,降水滞留在表层,加之植物开始由生长期转入休眠期,蒸腾减少,根系层受表层和深层土壤水分补充影响和本身消耗减少,土壤水分有一个大幅度增加过程,含水量相对较高。
- (4)稳定阶段(11 月至次年 4 月)。这一阶段气温低,植物进入休眠,土壤冻结,虽然降水少,但蒸发

散也很小,土壤水分稳定保持在后蓄墒阶段的水平。

分析引起土壤水分季节变化的原因,表明在祁连山区土壤水分主要受降水和植物生长的影响,但在生长季节,森林植物生长对土壤水分的作用往往大于降水的作用,表现为在植物生长最旺盛、降水处于高峰的 7、8 月份,土壤水分含量达到全年的最低点。因此,在水文过程模拟中要更多关注植物生长的影响。

表 3 祁连山排露沟流域生长季节的土壤水分(2000—2004 年)<sup>①</sup>

土壤类型	海拔 /m	土壤含水量/%				
		5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
山地栗钙土	2 700	14.31	11.81	10.26	14.42	13.58
	2 700	18.56	17.12	14.54	17.67	18.17
山地森林灰褐土	2 900	70.62	46.29	31.06	31.02	34.83
	3 100	—	56.63	44.66	47.07	44.81
	3 300	—	77.94	51.85	43.28	46.17
亚高山灌丛草甸土	3 300	—	88.28	60.95	57.83	60.35

① 5 月份流域海拔 3 100 m 以上土壤处于冻结状态,3 300 m 以上存在多年冻土。

3.2.2 季节动态的垂直差异 土壤水分季节动态总体呈开口向上抛物线变化,但不同深度季节动态

表现不同(图 2)。排露沟流域山地森林灰褐土 0~20 cm 土壤水分在生长季节(5~9 月)总体呈逐月增加

趋势,与降水逐月增加趋势相一致,表明浅层(0~20 cm)土壤水分季节动态主要受降水影响。20~60 cm 是植物(青海云杉)根系的主要分布区,土壤水分随着植物生长旺季到来而下降,随着生长减缓而恢复,土壤水分季节变化与植物生长节律相一致,表明深层(20 cm 以下)土壤水分季节动态主要受植物生长影响。

3.2.3 季节动态变化 为了反映土壤水分在年内的变化幅度,用变异系数( $C$ )来表示, $C=S^2/X$ ,式中: $S^2$ 为土壤含水量测定样本均方差, $X$ 为土壤含水量测定样本平均值。 $C$ 值越大,土壤水分变化越剧烈; $C$ 值越小,土壤水分越稳定。分析结果表明(表4),祁连山排露沟流域3类土壤水分变化幅度有一定差异,山地栗钙土变化幅度最大,亚高山灌丛草甸土最小。土壤水分的季节变化幅度从上到下递减,表

层变幅大,深层相对稳定。说明表层受外部干扰和影响大,土壤深层受外部干扰和影响小。

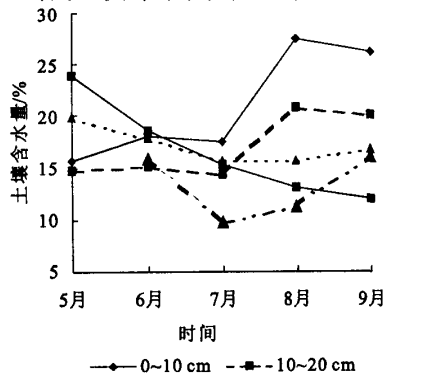


图2 祁连山青海云杉林地土壤水分季节变化

Fig. 2 Soil water season changing in *Picea crassifolia* forest stand

表4 祁连山排露沟流域土壤含水量变异系数(2000—2004 年)

Table 4 Vertical changing coefficient of soil water content in Pailugou watershed in Qilian Mountains

土壤层次 万方数据	山地栗钙土		山地森林灰褐土				亚高山灌丛草甸土
	2 700 m	2 700 m	2 900 m	3 100 m	3 300 m	平均	3 300 m
苔藓(枯落物)层	—	0.511 1	0.371 6	0.274 7	0.335 4	0.373 2	0.246 7
0~10	0.744 0	0.385 5	0.392 6	0.249 9	0.408 3	0.359 1	0.332 3
10~20	0.383 5	0.306 5	0.278 3	0.109 1	0.329 4	0.255 8	0.149 9
20~40	0.162 3	0.260 9	0.249 0	0.128 1	0.308 9	0.236 7	0.225 8
40~60	0.171 4	0.285 6	0.194 2	0.368 4	0.079 9	0.232 0	0.133 5
60~80	0.183 3	0.400 3	0.222 0	0.078 4	—	0.233 6	—
平均	0.328 9	0.327 8	0.267 2	0.186 8	0.281 6	0.265 9	0.210 4

### 3.3 土壤水分垂直变化

祁连山区3类土壤水分垂直变化规律具有明显的差异(图3)。亚高山灌丛草甸土、山地森林灰褐土融化层含水量年内平均值具有随土壤深度增加略呈

上升趋势,山地栗钙土融化层含水量年内平均值具有随土壤深度增加而下降趋势。亚高山灌丛草甸土、山地森林灰褐土水分渗透性能比山地栗钙土好,有利于水分的入渗传输。

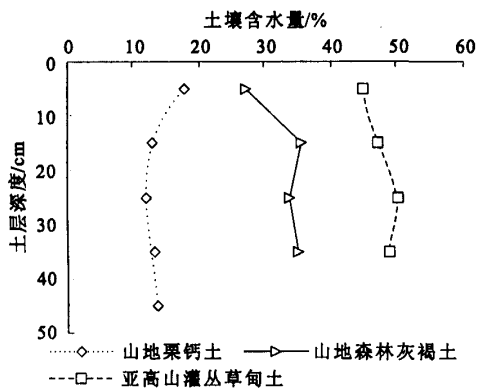


图3 祁连山西水试验区土壤水分垂直变化

Fig. 3 Soil water vertical changing in Xishui test area

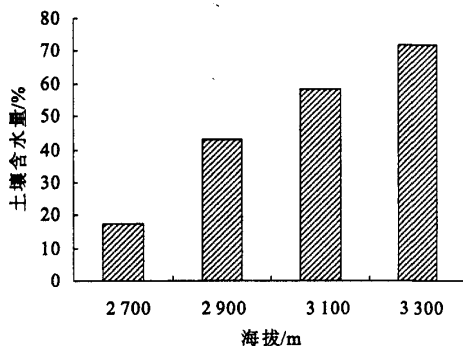


图4 祁连山排露沟流域土壤水分随海拔的变化

Fig. 4 Soil water changing with altitude in Pailugou watershed in Qilian Mountains

### 3.4 土壤水分空间变化

祁连山区土壤含水量随海拔升高递增(图4),山地森林灰褐土3300 m处含水量是2700 m处的4.2倍,而且土壤水分空间分布的差异与土壤类型的空间分布有紧密联系。亚高山灌丛草甸土分布在高海拔地带,生长季节土壤含水量为47.92%,山地森林灰褐土分布在流域阴坡,生长季节土壤含水量为32.9%,山地栗钙土分布在流域阳坡,生长季节土壤含水量为14.6%。因此,祁连山区土壤水分的空间分布具有高海拔多、阴坡次之、阳坡最少的变化规律,流域径流源及水文过程研究必须考虑土壤水分空间分布差异。

## 4 结论与讨论

祁连山林草复合流域土壤水分受土壤水文物理性质、空间分布、层次结构和季节变化等因素的影响,具有明显的时空变化规律。土壤水分季节变化受降水等天气状况和植物生长影响,分为前蓄墒(5月)、失墒(6~9月)、后蓄墒(10月)和稳定(11月至次年4月)4个阶段。降水主要影响生长季节土壤表层的水分变化,森林植物影响根系层土壤的水分变化,森林植物对土壤水分的影响大于降水的影响,使森林土壤水分在降水高峰阶段处于最低点。土壤水分垂直分布具有随深度而变化的规律,各土壤类型之间差异大。土壤水分空间分布具有高海拔多、阴坡次之、阳坡较少的变化规律。因此,在分析土壤水分运动规律、评价径流形成、建立生态水文模型时,必须综合考虑土壤本身的水文特性、时间动态和空

间分布等因子的差异性,同时要考虑植物生长的影响。

致谢:国家重点野外科学观测试验站——祁连山森林生态站的金铭、张学龙、王艺林、葛双兰、陈彩霞、罗龙发、苗毓鑫、车宗玺等同志参加了野外调查和测定工作,在此致谢!

### 参考文献:

- [1] 余新晓. 土壤动力水文学及其应用[M]. 北京:中国林业出版社,1995. 148-166.
- [2] 邵明安,杨文治,李玉山. 黄土区土壤水分有效性研究[J]. 水利学报,1987,32(8):38-44.
- [3] 赵文智,陈国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报,2001,44(22):1851-1857.
- [4] 朱金兆,刘建军,朱清科. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5):30-34.
- [5] 党坤良. 秦岭火地塘林区不同林区土壤水分动态特征研究[J]. 西北林学院学报,1995,10(1):1-8.
- [6] 王孟本,李洪建. 晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J]. 生态学报,1995,15(2):178-185.
- [7] 王金叶,车克钧,王艺林. 干旱半干旱区山地森林的水分调节功能[J]. 林业科学,2001,35(5):120-126.
- [8] 张学龙,车克钧,王金叶,等. 祁连山寺大隆林区土壤水分动态研究[J]. 西北林学院学报,1998,13(1):1-9.
- [9] 蓝永超. 河西内陆干旱区主要河流出山径流特征及变化趋势分析[J]. 冰川冻土,2000,22(6):78-82.
- [10] 车克钧,傅辉恩. 祁连山北坡水文效应的多层次 Fuzzy 综合评判[J]. 生态学杂志,1993,12(3):31-35.
- [11] 闫文德,张学龙,王金叶,等. 祁连山森林枯落物水文作用的研究[J]. 西北林学院学报,1997,12(2):7-15.
- [12] 马雪华. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京:中国科学技术出版社,1994. 84-166.
- [13] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京:中国林业出版社,1986. 30-36.