# 不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征

侯贵荣,余新晓,刘自强,贾国栋,李瀚之,刘文娜,李勇

(北京林业大学,水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,北京 100083)

**摘要:**通过 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分监测系统和 EM50 数据采集器对北京山区 2 种典型人工林地(栓皮栎林和油 松林)土壤水分含量进行定位、长期观测、数据处理,分析不同降雨强度对不同林分类型土壤水分时空变化 特征及差异性的影响。结果表明:(1)栓皮栎林地和油松林地日平均土壤储水量随降雨量显著变化,月平 均土壤储水量随降雨量的增加呈上升趋势。(2)在垂直方向上,栓皮栎和油松林地 0—40 cm 土层土壤储 水量的增加率随雨强增加而降低,栓皮栎林地土壤储水量平均增加率(94.17%)大于油松(84.19%),而 40—100 cm 土层土壤储水量的增加率随雨强增加均呈现增加趋势,且油松林地土壤储水量平均增加率 (15.81%)大于栓皮栎林地(5.83%)。(3)栓皮栎与油松林地相同土层土壤储水量差异性显著(*p*<0.05),同一林地不同土层土壤储水量也到达差异性显著(*p*<0.05)。从栓皮栎和油松林地的土壤水分时空变化 特征来看,2种林地土壤储水量分布不同。在造林树种选择时,可以考虑将油松和栓皮栎 2 个树种进行混 交。研究结果将为北京山区植被建设和管理提供参考和理论依据。 **关键词**:北京山区;降雨强度;土壤储水量;时空变化

中图分类号:S714.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2017)03-0209-07

DOI:10.13870/j. cnki. stbcxb. 2017.03.036

## Spatial and Temporal Variation Characteristics of Soil Moisture in Typical Forest Land in Beijing Mountain Region Under Different Rainfall Intensity

HOU Guirong, YU Xinxiao, LIU Ziqiang, JIA Guodong, LI Hanzhi, LIU Wenna, LI Yong

(Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: The effects of different rainfall intensity on spatial and temporal variation characteristics of soil moisture of different forest types were studied based on positioning and long term observation and data processing. Soil moisture of the Quercus variabilis forest land and the Pinus tabulae formis forest land in Beijing region was monitored by the ECH<sub>2</sub>O monitoring system and the EM50 data acquisition system. The results showed that: (1) The daily soil water storage amount changed significantly with the precipitation, howeve, the average monthly soil water storage increased with the increasing amount of rainfall. (2) Vertically, the increase rate of soil water storage in the 0-40 cm soil layer of the Q. variabilis and P. tabulae form is forest land decreased with the increase of the rainfall intensity, and the average increase rate of soil water storage of the Q. variabilis forest land (94.17%) was higher than that of the P. tabulae form is forest land (84.19%), while the soil water storage rate in the 40 - 100 cm soil layer showed an increasing trend, and the average increase rate of soil water storage of the P. tabulae form is forest land (15.81%) was greater than that of the Q. variabilis forest land (5, 83%). (3) Soil water storage in the same layer was significantly different between the Q. variabilis and P. tabulae form is forest land (p < 0.05), and it was also significantly different between different soil layers in the same forest land (p < 0.05). In terms of the spatial and temporal characteristics of soil moisture change in the Q. variabilis and P. tabulae formi forest land, soil water storage distributions of the two forest types were different. Therefore, it worths considering mixing the two species together in afforestation. The results of this study could provide a reference and theoretical basis for

**收稿日期:**2016-12-06

**资助项目:**国家重点研发计划项目(2016YFC0500802);林果业生态环境功能提升协同创新中心(PXM2017\_014207\_000038);北京市科技计 划项目(Z151100001415002)

通信作者:余新晓(1961-),男,博士,教授,主要从事森林水文、水土保持研究。E-mail:yuxinxiao1111@126.com

第一作者:侯贵荣(1991—),男,硕士研究生,主要从事森林水文、植被恢复研究。E-mail:815674572@qq.com

the construction and management of vegetation in the mountainous areas of Beijing.

**Keywords:** Beijing mountain region; rainfall intensity; soil water storage; spatial and temporal variation characteristics

土壤水分在半干旱地区的蒸散、入渗、地表径流 和土壤侵蚀等生态水文过程中起着重要作用<sup>[1-2]</sup>,土 壤水分的变化受植被一土壤间相互作用影响较大<sup>[3]</sup>。 北京山区处于易干旱生态脆弱地带,水资源的短缺是 制约易干旱地区植被分布和丰富度的关键因子<sup>[4]</sup>,研 究土壤水分时间变化和空间分布规律,掌握土壤水分 动态变化特征,提高土壤水分利用效率,对于改善干 旱地区的生态环境有着重要的意义。

土壤水主要来自降雨输入和地下水的补充,因此 土壤储水量受降雨直接影响很大[5-6],高红贝等[7]通过 降雨过程中裸地、苜蓿地土壤水分与温度的变化影响 研究中发现土壤含水量的变化首先受降雨过程的影 响,表层土壤含水量迅速增加,在蒸散和下渗作用下表 层土壤含水量逐渐减小。周景春等[8] 在濉溪县气象局 观测场对裸地研究发现降雨量每增加10 mm,可使耕 层土壤含水量增加 0.4%;鲍彪等<sup>[9]</sup>通过对晋西黄土区 不同密度的刺槐林和裸地的土壤水分研究发现,坡面 上表层土壤含水率对降雨的响应受到降雨强度影响, 当降雨强度较小时,土壤含水率变化会出现上升期和 退水期;当降雨强度较大时,土壤含水率变化则分为上 升期、平台期和退水期,各期到达时间会出现相应的滞 后现象。赵荣玮等[10]对不同刺槐、侧柏、刺槐一侧柏 混交林地土壤水分研究发现,在小雨、中雨、暴雨3种 降雨条件下,对于同一林地而言,降雨的响应深度随 降雨量的增加而增加;土壤含水量对单场降雨的响应 程度随土层深度的增加而减弱。

由此可见,不同的降雨强度会引起不同深度土层 水分含量发生变化,并且不同降雨强度对不同土壤深 度的土壤储水量有不同的贡献<sup>[11]</sup>。目前,很多学者 对土壤含水量的研究多停留于变化特征的描述,近年 来对土壤水分与温度<sup>[12]</sup>、风速<sup>[13]</sup>、降雨<sup>[14]</sup>等气象因 子间关系的研究逐渐受到学者关注,但将气象因子和 土壤含水量定量化的研究较少。

本文以北京山区典型树种栓皮栎和油松 2 种林 地为研究对象,利用 ECH<sub>2</sub>O 土壤水分观测系统和 EM50 数据采集器,连续观测不同降雨强度降雨前后 土壤含水量,量化降雨前后土壤储水量的时空变化特 征,以期为进一步研究该区生态系统的水分运动规 律、树种配置提供科学参考,以及为易干旱生态脆弱 地带的生态环境建设提供依据。

## 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于北京市海淀区西北部苏家坨镇的北 京林业大学教学试验林场一鹫峰国家森林公园(40° 03'N,116°05'E),平均海拔430 m。研究区地处太行 山北部,燕山东端,属于华北暖温带半湿润半干旱大 陆性季风气候区,多年平均气温12.5℃,最低气温为 -21.7 ℃,最高气温为 41.6 ℃,年平均日照时数 2 662 h, 无霜期 211 d 左右, 多年平均降雨量 628.9 mm,年内降雨分布不均,其中雨季7-9月的降雨量 占全年降雨的 75% 左右<sup>[15]</sup>, 年蒸发量高达 1 200 mm。研究区土壤类型为淋溶褐土,土层瘠薄,深层 土壤以石砾为主[16]。试验林为1958年营造的油松、 栓皮栎人工林,全园森林覆盖率 85%左右。林下灌 木主要有孩儿拳头(Grewia biloba)、鼠李(Rhamnus davurica Pall)、山杏 (Armeniaca sibirica)、荆条 (Vitex negundo L. var. heterophylla), 草本主要有 求米草(Oplismentls undulatifolius folius)、披针叶 苔草(Carex lanceolata Boott)及各铁杆蒿(Artemisia gmelinii)、蚂蚱腿子(Myripnois dioica Bunge)。 林分基本概况见表1。

表1 不同林分基本概况

林分类型(人工纯林)	样地大小/m	坡度/(°)	立地条件	平均林龄/a	密度(株・hm <sup>-2</sup> )	平均胸径/cm	平均高度/m
油松	$40 \times 30$	20	阳坡薄褐土	58	450	23.5	14.7
栓皮栎	40  imes 30	22	阳坡薄褐土	58	900	24.3	15.1

### 1.2 研究方法

1.2.1 降雨量观测 降雨量数据来源定位站架设的 HOBO 气象站,对仪器进行检修完毕后,2014 年 6 月 25 日—10 月 31 日进行降雨观测,数据采集频率为 15 min/次。

1.2.2 土壤水分观测 研究区表层土壤为黏土,含石 量较少,其下土壤为中壤质,偏重,50 cm 以下土层为沙 壤土。观测区土壤深度为 100 cm,因此在栓皮栎林和油 松林内按照 0-20,20-40,40-60,60-80,80-100 cm 梯度布设 ECH<sub>2</sub>O 传感器。ECH<sub>2</sub>O 探头布设如图 1 所 示,为了避免传感器受到根系生长程度的影响,每层探 头布设位置沿标准树根系水平方向(X)每后退 10 cm 和 垂直方向(Y)每下降 20 cm 布设探头一个,栓皮栎林地 和油松林地内布设 ECH<sub>2</sub>O 传感器各 3 套,水分观测样 地大小均为 20 m×20 m。对 ECH<sub>2</sub>O 传感器和 EM50 数 据采集器进行检修后,与气象站同期观测土壤水分含 量,数据采集频率为 5 min/次。





土壤水分监测点示意 图 1

土壤储水量计算公式为[17]: 1.2.3 数据处理与计算

$$S_i = \theta_i h_i$$
 (1)

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

式中:S;为每层土壤储水量(mm);θ;为土壤体积含水 量(%); $h_i$ 为分层厚度(20 cm);n为土壤层序号;S为 土壤总储水量(mm)。

采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件对数据处理 及作图,采用单因素方差分析(One-Way ANOVO) 和多重比较(LSD)对栓皮栎、油松林地各层土壤储水 量进行差异性比较(p<0.05)。

#### 结果与分析 2

## 2.1 不同降雨条件下土壤储水量的时间变化特征

7-9月为北京山区降雨最多的时期,也是植被 生长需水量较大的时期。观测期的降雨量和栓皮栎 林地、油松林地土壤储水量的分布如图 2 所示,降雨 是以"波浪"的形势补给地下水。7—9月累积降雨量

为180.2 mm,7 月降雨量为59.6 mm,占雨季降雨量 的 33.07%,8 月降雨量为 54 mm,占雨季降雨量的 29.97%,9月降雨量为66.6 mm,占雨季降雨量的 36.96%,在雨季,降雨量大小为9月(66.6 mm)>7 月(59.6 mm)>8月(54 mm)。栓皮栎林地7月土壤 储水量变化范围在 57.19~75.28 mm 之间波动,油松林 地变化范围在 51.46~69.93 mm 之间波动;8 月土壤储 水量变化范围在 61.66~74.81 mm 之间波动,油松林地 变化范围在 52~59.82 mm 之间波动;9 月土壤储水量 变化范围在 65.48~88.19 mm 之间波动;油松林地变 化范围在 48.9~87.45 mm 之间波动。栓皮栎林地月平 均土壤储水量为9月(73.2 mm)>8月(66.41 mm)>7 月(63.64 mm)。油松林地月平均土壤储水量为9月 (62.4 mm)>8月(57.47 mm)>7月(56.16 mm)。 栓皮栎林、油松林地日平均土壤储水量随着降雨量的 增加而增加,而月平均土壤储水量并没有随降雨量变 化而变化,在整个雨季表现为累加现象,呈上升趋势。



2.2 不同降雨条件下土壤储水量的空间变化特征

2.2.1 不同降雨条件下土壤储水量的垂直变化特征 依据中国气象局资料,24 h降雨量在 10 mm 以下称为小雨,24 h降雨量在 10~24.9 mm 称为中雨, 24 h降雨量在 25~49.9 mm 为大雨<sup>[11]</sup>。根据鹫峰 气象站的观测数据,选择典型小雨、中雨、大雨 3 种降 雨强度进行降雨前后土壤储水量特征分析。

由图 3 可知,在 3 种降雨条件下,栓皮栎和油松 林地均表现为 0-40 cm 土层土壤储水量的增加 率明显大于 40-100 cm 层。并且随着降雨强度的 增加,栓皮栎和油松林地 0-40 cm 土层土壤储 水量的增加率呈现降低趋势,栓皮栎林地 0-40 cm 土层土壤储水量增加率变化情况为小雨(95.21%)> 中雨(94.89%)>大雨(92.41%);油松林地具体表 现为小雨(87.01%)>中雨(86.66%)>大雨 (78.91%)。40—100 cm 土层土壤储水量的增加率呈现 增加趋势,栓皮栎林地具体为40—100 cm 土层土壤储水 量的增加量:小雨(4.79%)<中雨(5.11%)<大雨 (7.59%);油松林地具体表现为小雨(12.99%)<中 雨(13.34%)<大雨(21.09%),并且在0—40 cm 土 层深度范围内表现为栓皮栎林地土壤储水量平均 增加率(94.17%)大于油松林地(84.19%)。而在40— 100 cm深度范围内土壤储水量增加量表现为油松林 地大于栓皮栎林地。



图 3 典型降雨前后土壤储水量变化

2.2.2 不同林分类型垂直剖面各层土壤储水量对降 雨的响应 由图 4 可知,栓皮栎林地对降雨的响应大 致可以分为平台期、上升期、峰值期、消退期等4个阶 段。上升期,油松林地土壤水分对降雨的响应早于栓 皮栎林地,栓皮栎林和油松林地 0-40 cm 土壤储水 量随降雨量的变化均较 40-100 cm 明显,40-100 cm 土层土壤储水量随降雨过程均无明显变化。栓皮 栎林和油松林地各层土壤储水量对降雨的响应时间 也存在不同,20-40 cm 土层土壤储水量的上升和下 降过程均滞后于 0-20 cm 层,且涨落时间均没有随 降雨时间的开始而开始,结束而结束,这体现了土壤 水分入渗的先后过程。峰值期,0-40 cm 土层,油松 林地土壤储水量峰值大于栓皮栎林地,说明栓皮栎林 地土壤表现为均匀入渗。消退期,油松林地也早于栓 皮栎林地,栓皮栎林和油松林地表层、次表层土壤储 水量在降雨停止后数小时才开始下降,说明在这过程 中仍然受到土壤水的补给作用。

2.2.3 不同林地土壤水分特征值分析 雨季每月降 雨量不同、土壤蒸发不同,林地受到降雨补给量也必然 不同。由图5可知,栓皮栎林地和油松林地的土壤储 水量在0-20 cm 土层内,除了8月油松林地与9月 栓皮栎林地土壤储水量差异性不显著,其余时间段内 栓皮栎林地与油松林地土壤储水量均达到显著性差异 (p<0.05)。而在20-100 cm 各土层,栓皮栎林地与 油松林地土壤储水量均达到显著性差异(p<0.05)。

由图 6 可知,7 月栓皮栎林地各层土壤储水量均 达到显著性差异,7 月油松林地 0—80 cm 土层土壤 储水量存在差异性显著(p < 0.05),而 60—100 cm 土层土壤储水量差异性不显著,这与 9 月油松林地土 壤储水量规律刚好相反。8 月栓皮栎林地 20—40 cm 土层与 80—100 cm 土层土壤储水量差异性不显著, 其余各层土壤储水量均达到显著性差异(p < 0.05), 8 月油松林地 0—20 cm 土层和 40—60 cm 土层土壤 储水量差异性不显著,其余各层土壤储水量均达到显 著性差异(p < 0.05)。9 月栓皮栎林地各层土壤储水 量均达到差异性显著(p < 0.05),9 月油松林地 0— 40 cm 层土壤储水量差异性不显著;而其 60—100 cm 层土壤储水量差异性显著(p < 0.05)。

由此可见,不同林地相同土壤层土壤储水量差异 性显著,总体表现为在 0—40 cm 土层油松林地土壤 储水量均大于栓皮栎林地,40—100 cm 土层栓皮栎 相同林地土壤储水量均大于油松林地。相同林地不 同土层深度土壤储水量也存在差异性显著,0—100 cm 土层范围内,栓皮栎林地土壤储水量表现为 40— 60 cm 层土壤储水量最大,平均为 16.25 mm,占到平 均总储水量(65.47 mm)的 24.81%,而油松林地表 现为土壤储水量最大值(16.24 mm)出现在 20—40 cm 层,占到平均总储水量的 30.38%。







注:相同土层不同小写字母表示不同林地间储水量差异显著(p<0.05)。



#### 图 6 相同林地不同土层土壤储水量差异

## 3 讨论

## 3.1 不同林分类型土壤储水量时间变化特征

土壤的储水量是植物可用水量的来源,它的多少 直接影响植物的生长发育<sup>[20]</sup>。降雨是坡地土壤水分 的主要补给来源,土壤储水量随着降雨量的变化而呈 明显的锯齿状变化波动,主要是降雨、土壤蒸发和植 物蒸腾共同作用的结果。栓皮栎林地和油松林地日 平均土壤储水量随着降雨量的增加而增加,这与张建 兵等<sup>[21]</sup>、席海洋等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。而月平均土 壤储水量并没有随降雨量变化而变化,在整个雨季表 现为累加现象,呈上升趋势。出现这种现象的原因可 能与土壤水分的再分布有关<sup>[9]</sup>,还可能与枯落物存 量、组分和结构有关,栓皮栎为落叶阔叶林,枯落物易 分解但现存量大,油松为常绿针叶林,枯落物现存量 少但不易分解,可以有效减缓土壤蒸发,延长水分在 土壤中存储时间。

土壤水分主要来自降雨,降雨量的不同使土壤 水分处于不断变化的状态<sup>[23]</sup>。变异程度随降雨量和 土壤深度的增加而减弱。在雨季,栓皮栎林地和油松 林地土壤储水量在不同土层存在显著性差异(p< 0.05),不同林地相同土壤层土壤储水量也存在差异 性显著(p<0.05),这与朱海等<sup>[24]</sup>的研究结果相似。 导致栓皮栎林地、油松林地不同土层土壤储水量显著

差异和栓皮栎林地、油松林地相同土层土壤储水量差 异性显著的原因可能是土壤特性以及植物根系发育所 造成的差异性。栓皮栎林地、油松林地变异系数随土 壤层深度不断变小,稳定性逐渐增强,这与朱海等<sup>[25]</sup>、 蔡进军等[26]的研究结果相似。变异系数的变化主要 受降雨量、降雨历时,以及土壤吸水性等影响。北京山 区降雨分布不均匀,旱季受降水和土壤蒸发和植被蒸 腾多重因素影响,导致土壤表层至土壤深层土壤水分 含量梯度降低,降雨后,表层土壤体积含水量迅速增 加,受到表层土壤的渗透,深层土壤水分含量缓慢增 加。当降雨强度大,降雨历时足够长,降水以存储、植 物吸收利用和物理蒸发的形式被分散,而当雨量小时, 不足够存储条件,可能全部用于植被吸收利用和物理 蒸发,使表层土壤储水量迅速增加后又降低,降雨前后 土壤表层体积含水量的波动大于土壤深层,因而表层 土壤储水量的变异系数较大,而深层土壤的较小。

## 3.2 不同林分类型土壤储水量空间变化特征

土壤水分入渗除了与土壤质地、厚度、前期含水 量有关外,还与降雨强度、历时有关,降雨强度越大, 降雨入渗速率随降雨时间的衰减速度越快<sup>[26]</sup>。降雨 量的多少和强度影响水分的入渗深度,进而影响植物 对降雨补充的土壤水分的利用<sup>[16]</sup>。通过对北京鹫峰 国家森林公园栓皮栎林地与油松林地土壤储水量的 在雨季空间内的变化分析表明,土壤剖面各层土壤储 水量变化整体随降雨量增加而增加。这与马菁 等<sup>[27]</sup>、白天路等<sup>[28]</sup>的研究结果一致。

小雨、中雨、大雨降雨前后,相同林分土壤储水量 增加量不同,这主要与前期土壤储水量有关。随着降 雨强度的增加,油松林地具体表现为小雨(87.01%) >中雨(86.66%)>大雨(78.91%)。40-100 cm 土 层土壤储水量的增加率呈现增加趋势,并且在 0-40 cm 深度范围内表现为栓皮栎林地土壤储水量平均增 加率(94.17%)大于油松林地(84.19%)。而在40-100 cm 深度范围内土壤储水量增加量表现为油松林 地大于栓皮栎林地。出现这种现象的原因可能与栓 皮栎和油松树种植被类型、根系分布、蒸腾速率和土 壤蒸发等因素的影响有关<sup>[28]</sup>。油松的粗根系在深层 较为发达,细根在 20-40 cm 分布较为集中<sup>[29]</sup>,栓皮 栎根系主要分布在 30-60 cm<sup>[30]</sup>,使得在 20-40 cm 深度范围内,油松林地土壤孔隙度大于栓皮栎林地, 而在 30-60 cm 深度范围内,栓皮栎林地土壤孔隙度 大于油松林地。此外还可能与树种本身的蒸腾速率 不同有关,贾剑波<sup>[28]</sup>研究表明,栓皮栎的月平均蒸腾 量大于油松,栓皮栎月平均蒸腾量为(47.27 mm)>

油松月平均蒸腾量为(33.22 mm),还可能与2种林 地土壤蒸发有关,有枯落物:油松土壤蒸发量(83.15 mm)>栓皮栎土壤蒸发量(78.51 mm)。无枯落物:油 松土壤蒸发量(115.64 mm)>栓皮栎土壤蒸发量 (112.09 mm)<sup>[28]</sup>。在上述植被类型、根系分布和降雨、蒸 腾速率和土壤蒸发等多重影响下,导致油松 0—40 cm 层土壤储水量大于栓皮栎土壤水量,而在 40—100 cm 范 围内,栓皮栎林地土壤储水量较油松林地大。

在上升期、峰值期和消退期,油松林地土壤水分对 降雨的响应均早于栓皮栎林地,这体现了土壤水分入 渗的先后过程。栓皮栎林和油松林地表层、次表层土 壤储水量在降雨停止后数小时才开始下降,说明在这 过程中仍然受到土壤水的补给作用,这与鲍彪等<sup>[9]</sup>的 研究结果一致。2 块样地除了林分类型和林分密度不 同,树冠形态各异外,叶片的形状、数量和分布以及叶 片倾角的不同均会影响林内降雨再分配,其次,林地土 壤表层覆盖枯落物厚度不同,土壤孔隙度、田间持水 量、土壤持水性、土壤容重、土壤温度等物理性质各异 也会导致土壤储水量达到各时期的时间有先后之分。

## 4 结论

(1)栓皮栎林地和油松林地日平均土壤储水量随 降雨量显著变化,月平均土壤储水量随降雨量增加为 累加现象,呈上升趋势,具体表现为栓皮栎林地月平 均土壤储水量9月(73.2 mm)>8月(66.41 mm)>7 月(63.64 mm),油松林地月平均土壤储水量9月 (62.4 mm)>8月(57.47 mm)>(56.16 mm),相同 林地不同土层土壤储水量差异性显著(p<0.05)。

(2)不同降雨前后,栓皮栎和油松林地 0—40 cm 层土壤储水量的增加率随雨强增加而降低,40—100 cm 层土壤储水量的增加率呈现增加趋势,并且在 0— 40 cm 深度范围内表现为栓皮栎林地土壤储水量平均 增加率(94.17%)大于油松林地(84.19%)。而在 40— 100 cm 深度范围内土壤储水量增加量表现为油松林 地大于栓皮栎林地。且不同林地相同土层土壤储水量 差异性显著。

(3)在垂直方向上,栓皮栎林和油松林地 0—40 cm 土层土壤储水量对降雨的响应均较 40—100 cm 明显。在 0—40 cm 土层,上升期,峰值期,消退期,油 松林地土壤水分对降雨的响应均早于栓皮栎林地。

## 参考文献:

 Tyagi J V, Kumar R, Srivastava S L, et al. Effect of micro-environmental factors on natural regeneration of Sal (Shorea robusta)[J]. Journal of Forestry Research, 2011, 22(4): 543-550.

- [2] Daly E, Porporato A. A Review of Soil Moisture Dynamics: From Rainfall Infiltration to Ecosystem Response[J]. Environmental Engineering Science, 2005, 22(1): 9-24.
- [3] Garcia E P, Latron J, Llorens P, et al. Spatial and temporal dynamics of soil moisture in a Mediterranean mountain area (Vallcebre, NE Spain)[J]. Ecohydrology, 2013, 6(5): 741-753.
- [4] 贾国栋,余新晓,邓文平,等.北京山区典型树种土壤水 分利用特征[J].应用基础与工程科学学报,2013,21 (3):403-411.
- [5] 彭记永,方文松.郑州地区草地土壤水分时空变化特征
  及对气候的响应分析[J].湖南农业科学,2013,7(19):
  85-87.
- [6] Saito H, Simunek J, Mohanty B P. Numerical analyses of coupled water, Vapor and heat transport in the Vadosezone[J]. Vadose Zone Journal, 2006, 5(2): 784-800.
- [7] 高红贝,邵明安.干旱区降雨过程对土壤水分与温度变 化影响研究[J].灌溉排水学报,2011,30(1):40-45.
- [8] 周景春,苏玉杰,张怀念,等.0-50 cm 土壤含水量与降 雨和蒸发的关系分析[J].中国土壤与肥料,2007(6): 23-27.
- [9] 鲍彪,毕华兴,云雷,等.晋西黄土区刺槐林地土壤水分 对降雨的响应[J].北京林业大学学报,2012,34(2):84-89.
- [10] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等.晋西黄土区人工林地土壤 水分特征及其对降雨的响应[J].水土保持学报,2016, 30(1):178-183.
- [11] 白盛元.黄土土柱降雨特征与土壤水分入渗过程研究 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [12] 余雷,张一平,沙丽清,等.哀牢山亚热带常绿阔叶林土 壤含水土壤含水量变化规律及其影响因子[J].生态学 杂志,2013,32(2):332-336.
- [13] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河,等.黄土丘陵沟壑区坡面尺度 土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32 (16):4961-4968.
- [14] 李海防,史梅容,王金叶,等.广西猫儿山毛竹林不同层 次土壤含水量的降雨响应[J].水土保持研究,2016,23 (5):120-123.
- [15] 刘自强,余新晓,贾国栋,等.北京山区侧柏和栓皮栎的 水分利用特征[J].林业科学,2016,52(9):22-30.

- [16] 邓文平,余新晓,贾国栋,等.雨季北京山区 3 种典型植物的水分来源[J].干旱区研究,2014,31(4):649-657.
- [17] 张瑜,黄明斌.黄土高原不同降雨年型乔、灌木蒸散特征与 影响因素[J].水土保持通报,2013,33(6):207-212.
- [18] 贾志峰,朱红艳,易秀,等. 半湿润易旱区土壤水分时空变 化特征研究[J]. 中国农村水利水电,2016,23(8):67-72.
- [19] 杨聪,于静洁,刘昌明,等.华北山区坡地产流规律试验 研究[J].地理学报,2005,60(6):1021-1028.
- [20] 舒维花,蒋齐,王占军,等.宁夏盐池沙地不同密度人工 柠条林土壤水分时空变化分析[J].干旱区资源与环 境,2012,26(12):172-176.
- [21] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等.绿洲-荒漠过渡带不同植 被覆盖度下土壤水分的变化规律研究[J].干旱区资源 与环境,2009,23(12):161-166.
- [22] 席海洋,冯起,司建华,等. 额济纳绿洲不同植被覆盖下土 壤特性的时空变化[J]. 中国沙漠,2011,31(1):68-75.
- [23] 马海艳,龚家栋,王根绪,等.干旱区不同荒漠植被土壤 水分的时空变化特征分析[J].水土保持研究,2005,12 (6):231-234.
- [24] 朱海,胡顺军,陈永宝.古尔班通古特沙漠南缘固定沙 丘土壤水分时空变化特征[J].土壤学报,2016,53(1): 117-126.
- [25] 朱海,胡顺军,刘翔,等.不同龄阶梭梭根区土壤水分时 空变化特征[J].生态学报,2017,37(3):1-8.
- [26] 蔡进军,张源润,潘占兵,等. 宁夏黄土丘陵区苜蓿土壤 水分的时空变异特征[J]. 水土保持研究,2016,23(1): 75-79.
- [27] 马菁,宋维峰.元阳梯田水源区土壤水分动态变化规律 研究[J].生态科学,2016,13(2):33-43.
- [28] 白天路,杨勤科,申佳,等.黄土高原丘陵沟壑小流域土 壤水分垂直分布变异特征及影响因子[J].生态学杂 志,2009,28(12):2508-2514.
- [29] 贾剑波.北京山区典型森林生态系统水分运动过程与 机制研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [30] 刘自强,余新晓,娄源海,等.北京山区栓皮栎林水分来 源及生长季动态规律[J].北京林业大学学报,2016,38 (7):40-47.
- [31] Ward D, Wiegand K, Getzin S. Walter's two-layer hypothesis revisited: back to the roots[J]. Oecologia, 2013, 86(3): 617-630.