华北平原中部典型区包气带水分时空动态变化特征

汪丽芳[1]，张 冰[1]，王建中[1]，刘 敏[1]，梁继运[1]，马小雷[2]

(1. 中国地质科学院 水文地质环境地质研究所，河北 石家庄 050061；2. 河北省环境地质勘查院，河北 石家庄 050021)

摘 要：[目的] 研究包气带水分时空动态变化特征，为“四水转化”系统动态循环研究提供依据。[方法] 利用土壤水分运动学中势能的观点，研究包气带水分、包气带水势随时间和深度的变化特征。[结果] 季节不同，土壤水势整体分布差异明显。6—8 月土壤水势最高，局部地段甚至达到饱和，12 月至翌年 3 月土壤水势最低。地面 0—50 cm 深度土壤含水量受季节影响非常大，土壤水势激烈变化；50 cm 深度以下土壤含水量基本不受季节交替影响，50—140 cm 土壤水势相对稳定；140 cm 以下只受重力势作用。[结论] 降雨、灌溉、蒸发、地下水埋深等因素均能引起土壤剖面土壤水势分布发生变化，从而实现入渗型、蒸发型、蒸发—入渗型、下渗—上渗型、下渗—上渗—入渗型等土壤水分运动状态的相互转化。

关键词：包气带；含水量；土壤水势；时空变化

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)03-0105-04 **中图分类号**：P641.131

文献参数：汪丽芳，张冰，王建中，等. 华北平原中部典型区包气带水分时空动态变化特征[J]. 水土保持通报，2016，36(3)：105-108. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.019

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Soil Moisture Variation in Vadose Zone at Typical Area of Central North China Plain

WANG Lifang[1], ZHANG Bing[1], WANG Jianzhong[1], LIU Min[1], LIANG Jiyun[1], MA Xiaolei[2]

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei* 050061, *China*; 2. *Hebei Institute of Environmental Geology Exploration, Shijiazhuang, Hebei* 050021, *China*)

Abstract: [Objective] To analyze the spatial and temporal characteristics of the soil moisture variation in vadose zone in order to provide basis for the study on the “four waters transformation” dynamic cycle. [Methods] Using the concept of the potential energy of soil water dynamics, the characteristics of the moisture in vadose zone and changes in water potential with time and depth was studied. [Results] The significant difference was observed in soil water potential distribution in each season. Soil water potential reached the highest in June and August, even got saturation in some blocks. On the contrary, it dropped to a minimum in period from December to next March. Soil moisture of 50 cm depth was affected greatly by seasons and water potential changed dramatically. Yet soil moisture below 50 cm depth was substantially independent of the season changes. And between 50—140 cm depth water potential was relatively stable; Beneath 140 cm, it was only influenced by gravity potential. [Conclusion] The factors such as rainfall, irrigation, evaporation, groundwater depth and others could cause the changes in the profile distribution of soil water potential, thus causing changes among a variety of soil water movement states.

Keywords: **vadose zone; soil moisture; water potential; temporal and spatial variation**

包气带是连接大气水、植物水、地表水、地下水构成的水系统动态循环的纽带[1]，同时包气带水对水资源开发利用、生态环境保护和预测渗流带污染物迁移有着十分重要的作用[2]。从水文地质角度研究包气带，对研究地下水形成理论和补给机理[3]、解决浅层地下水资源评价问题[4]等都具有重要意义。

研究包气带水分的赋存及运移，实质上是研究土层中土—水能力的状态及转换，所以应充分引进土壤学方面研究成果，用势能的观点去研究水分问题[3,5]。包气带土壤水分运动表现形式主要为基质势和重力势，二者构成了土水势。降雨使得水分进入土壤，由于土壤基质的吸附力、毛管力、重力作用，水

收稿日期：2014-05-30 **修回日期**：2014-06-26

资助项目：水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目“利用大型蒸渗仪开展华北平原典型区潜水蒸发规律研究”(SK201107)，“极端气候条件下土壤水—地下水补给关系研究：以石家庄地区为例”(SK201306)

第一作者：汪丽芳(1983—)，女(汉族)，湖北省荆州市人，硕士，助理研究员，主要从事地下水资源评价研究。E-mail：290675934@qq.com。

通讯作者：梁继运(1981—)，女(汉族)，河北省沧州市人，硕士，助理研究员，主要从事水文地质、地热地质研究。E-mail：290675934@qq.com。

分向下运动补给地下水或者暂时储存于土壤中;蒸发使得土壤水分经土表蒸发和植物吸收蒸腾,水分向上运动进入大气[6]。

华北平原属半湿润半干旱气候区,降水较少,蒸发强烈,是中国经济发展中受水资源制约最严重的地区之一。在该区利用土壤水分势能开展包气带水分时空动态变化特征研究显得尤为重要。本文拟利用土壤水分运动学中势能的观点,研究包气带水分、包气带水势随时间和深度的变化特征,以期为"四水转化"系统动态循环提供科学依据。

1 试验数据与方法

统明化镇组,由灰、灰绿色砂岩、泥质粉砂岩和灰黄、棕红色泥岩组成。

衡水试验基地浅层地下水位埋深约8.0 m左右,承压含水层地下水位埋深已达50 m多。包气带厚度变大,对地下水的蒸发和地表水的入渗都产生了一定的影响,包气带水份运移时空变化特点也发生了较大改变。本次依托衡水试验基地大型称重式蒸渗仪,开展包气带水分时空动态变化特征研究。蒸渗仪钢筒表面积1.5 m×2 m,深5.5 m,试验土柱取自衡水试验基地大田的原状土体(表1),钢筒底部反滤层厚0.3 m,顶部高出土柱表面约10 cm。根据试验设计要求,可调节蒸渗仪中控制水位,调节范围2.0~5.2 m。

表1 土壤岩性垂向分布

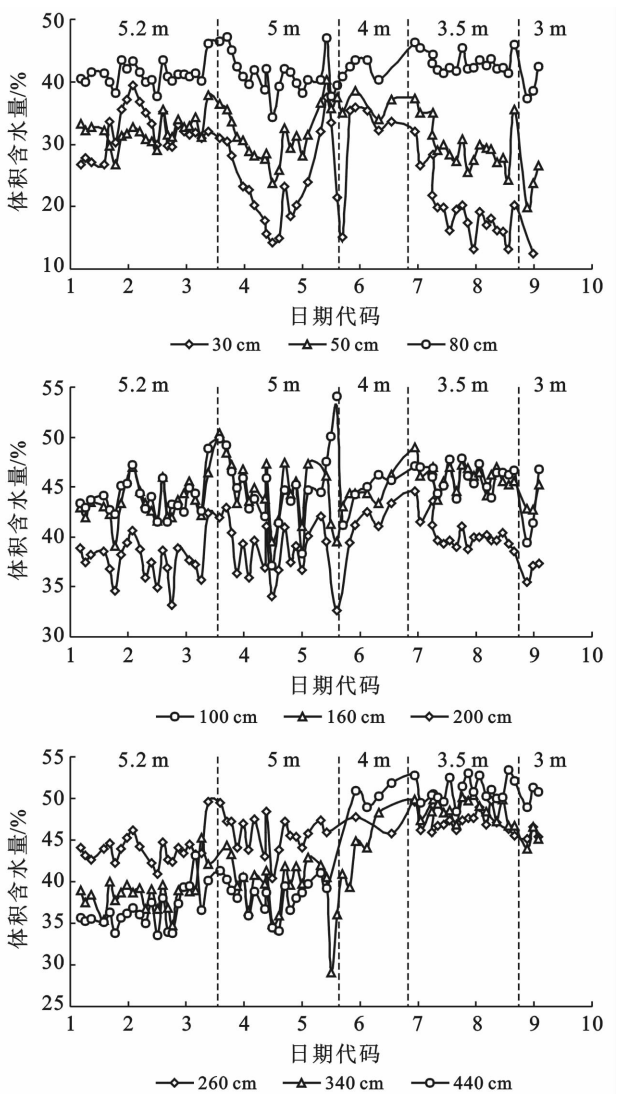
层数	岩 性	深度范围/cm	厚度/cm
1	素填土	0—80	80
2	黏 土	80—220	140
3	亚黏土	220—300	80
4	亚砂土	300—340	40
5	亚黏土	340—380	40
6	黏 土	380—480	100
7	淤泥亚砂土	480—540	60

土壤含水量使用南京驰顺科技发展有限公司开发设计的CS630中子水分仪(探头中密封的环状镅—铍中子源),对安装在大型称重式蒸渗仪中心的中子水分仪观测管进行观测;土壤水势利用北京基因有限公司提供的MPS-2测量土壤水势。

2 结果与分析

2.1 土壤水分动态变化特征

土壤含水量变化特点如图1所示。① 2013年1—3月降水量18.7 mm,仅占全年降水量的8%,属于非常干旱期。土壤含水量偏小,但基本保持稳定。② 2013年4—9月降水量199 mm,占全年降水量的85.6%,是相对丰水季节,80 cm以上土壤含水量变化非常大,其中30 cm深度含水量的变化范围为14.2%~37.5%,变幅达23.3%;50 cm深度变化范围为23.7%~40.3%,变幅16.6%。③ 10月以后降水减少,蒸发作用持续,50 cm以上土壤含水量逐渐减小,直至冬期土壤形成冻土层,含水量降到最低。④ 80—200 cm深度范围内,蒸发作用较小,到地下控制水位的距离较大,土壤岩性、毛细上升作用的影响还不足以影响200 cm以上土壤体积含水量,补给作用微弱,土壤含水量基本稳定,无明显变化。⑤ 200 cm以下土壤受潜水的毛细上升作用影响,含水量随深度增加而增大。同时,在蒸渗仪控制水位埋深由5 m逐步抬升至3 m过程中,增幅随之增大,直到达到饱和。



注:1为20121207,2为20130126,3为20130317,4为20130506,5为20130625,6为20130814,7为20131003,8为20131122,9为20140111,10为20140302;5.2,5,4,3.5,3 m分别表示水位埋深。下同。

图1 土壤含水量随时间变化曲线

2.2　土壤水势动态变化特征

2.2.1　随时间变化特点　一次有效降水(所谓有效降水,是指该次降水足以造成对地下水的补给),从发生降水到该次降水对地下水入渗补给过程的结束,需要经历一个时程。时程的长短,与包气带岩性和厚度密切相关。本次分析认为,降水量大于 1.5 mm 时,可对包气带土壤水势产生影响(见图 2)。

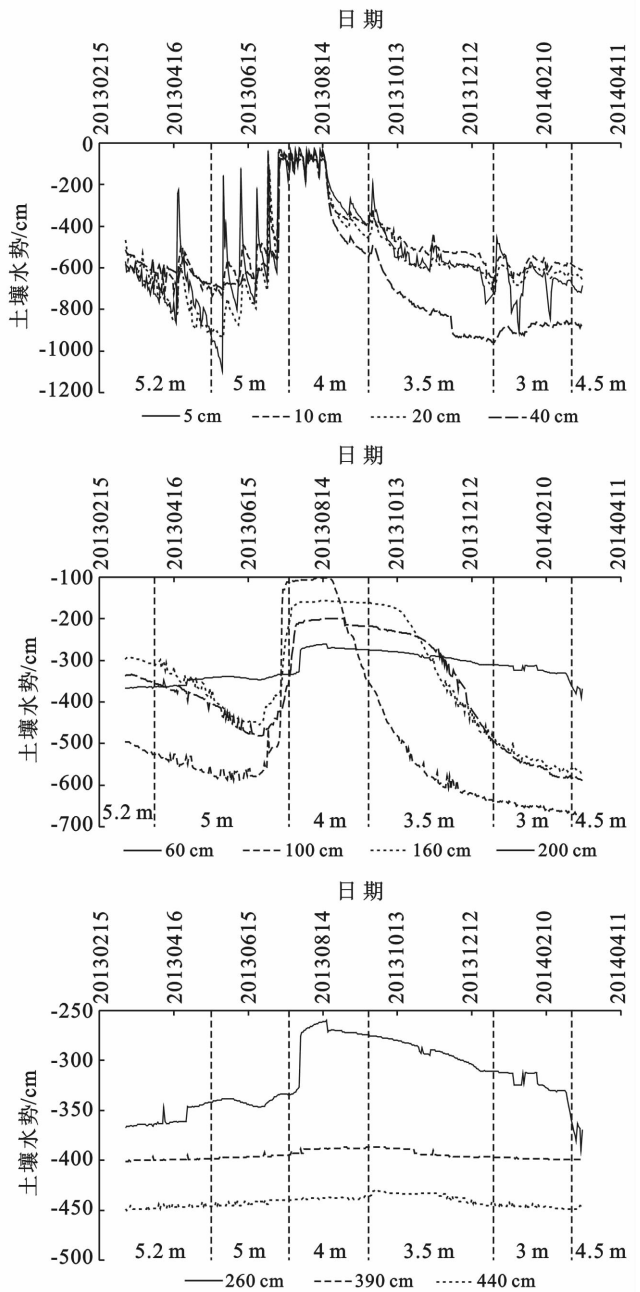


图 2　土壤水势随时间变化趋势

如图 2 所示,2013 年 4—9 月降水量 199 mm,占全年降水量的 85.6%,属于一年中降水最充沛的月份,其中 7 月 1 日降水量 40 mm,7 月 26 日降水量 53 mm。降水通过包气带入渗补给作用比较明显,同时受蒸发作用影响,致使土壤水分势能变化较大,尤其是地层表面更为明显。

降水前后土壤水势变化特点表现为:① 降水对 200 cm 深度以上地层作用明显,200 cm 以下作用减弱。各深度总体变化趋势基本一致。② 表层土壤水势变化幅度最大,接受大气降水时,离地表越近,补给速度快且补给量大;离地表越远,补给速度慢且补给量小。③ 5 cm 深度土壤水势变化剧烈。7—8 月补给作用达到最大时,其土壤水势达 −23 cm(以 H_2O 柱高表示);5 月蒸发作用强烈时,土壤水势降低至 −1 095 cm。40 cm 深度土壤水势最大值为 −76 cm;最小值为 −959 cm。④ 随着深度加大,降水入渗补给的滞后效果越明显,且持续作用更长。受 7 月连续强降水影响,200 cm 深度土水势增大,且持续到 12 月上旬才开始缓慢减小。

不同季节土壤水势随深度变化特点如图 3 所示。① 季节不同,土壤水势整体分布也存在明显差异;② 3 月处于未产生降雨但冻土已完全解冻的时期,相对于全年而言,土壤水势较高;③ 6 月土壤受蒸发作用影响较大,大的降雨尚未形成,土壤水势较低;④ 9 月,土壤已持续受降水长时间影响,包气带水分增大,持续向下补给,局部地段甚至达到饱和;⑤ 12 月,蒸发作用后气温下降,冻土土壤水势达到年度最小。

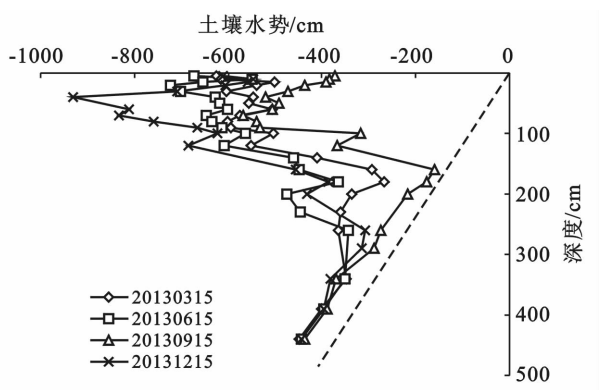


图 3　不同季节土壤水势对比曲线

2.2.2　随深度变化特点　常见的土壤水分动态包括入渗型、蒸发型、蒸发—入渗型、下渗—上渗型、下渗—上渗—入渗型。这 5 种土壤水分运动状态在一定条件下相对稳定,随着降雨、灌溉、蒸发、地下水埋深等各种因素的改变,土壤剖面土壤水势分布也将发生变化,引起土壤水分运动状态相互转化。

以 7 月 26 日为例,分析该区降水前后土壤水势随深度变化特点如图 4 所示。① 7 月 22 日前,较少的雨水降落至地表,表层土壤含水量增大,土壤水势比下部大,土壤水分向下运动,40 cm 处土水势继续

向上迁移，最后在20 cm处汇集，形成收敛性零通量面。② 受26日强降雨作用，源源不断有降水补给下渗，收敛型界面消失，土壤水势为入渗型。③ 降雨结束后，表层蒸发作用继续，土壤水分向上运移，最终出现上渗—下渗—上渗—下渗交替出现的复合型曲线。

根据该区土壤水势垂向变化特点，可将土壤水势划分为3个分带：50 cm以上土壤水势激烈变化；50—140 cm土壤水势相对稳定，含水量最大；140 cm以下土壤水势呈平稳下降趋势，最后达到饱和，只受重力势作用。

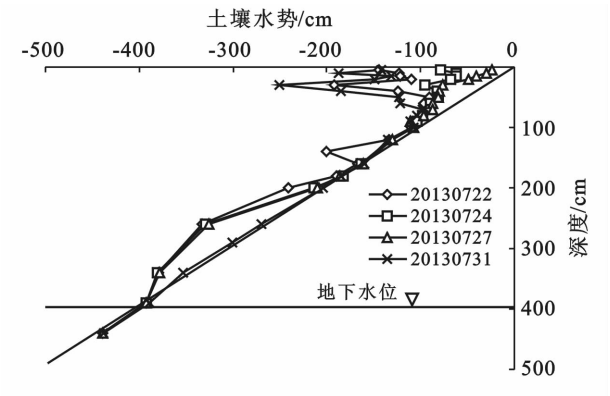


图4 降水前后土壤水势随深度变化曲线

结合土壤岩性特点，分析土壤水势垂向变化特点：① 蒸渗仪土柱中80—220 cm深度为黏土，厚140 cm，其下为80 cm厚度的亚黏土。该地区80—140 cm深度处已形成比较稳定的收敛性界面。受黏土自身颗粒细小、吸附水、持水能力大的特点影响，在80—140 cm深度处土壤水势非常高，基本达到饱和。220 cm深度以下亚黏土的土壤颗粒增大，吸附水和持水能对相对黏土减弱，土壤水分下移受阻，最终在80—140 cm深度形成包气带的湿润层，在220 cm深度处形成相对的包气带干层。由前人研究成果可知，细粒土壤层基质势会阻止土壤水分入渗到大孔隙的粗粒土壤层。只有当细粒土层达到饱和以后，土壤水分才有可能渗入到深部粗粒土壤层[7]，在此得到了印证。② 340—380 cm深度亚黏土：下部为颗粒更小、含水饱和的黏土；同时该深度已接近潜水位，在毛细管上升力作用下，该段地层含水量非常丰富，形成一段接近饱水地层，土壤水势主要受重力势影响。

3 结论

(1) 土壤水分动态包括入渗型、蒸发型、蒸发—入渗型、下渗—上渗型、下渗—上渗—入渗型。这5种土壤水分运动状态随着降雨、灌溉、蒸发、地下水埋深等因素影响，土壤剖面水势、土壤水分运动状态随之发生改变。

(2) 研究区土壤含水量50 cm以上受季节影响非常大，30 cm深度变幅达23.3%；80 cm深度以下基本不受季节交替影响；200 cm深度以下土壤受试验控制水位的补给作用显著。

(3) 该地区土壤水势50 cm以上激烈变化；50—140 cm相对稳定带；140 cm以下呈平稳下降趋势，最后达到饱和，只受重力势作用。降水作用下，土壤水势易形成上渗—下渗—上渗—下渗交替出现的复合型曲线。

[参 考 文 献]

[1] 周向阳.干旱半干旱地区包气带水分分布规律与影响因素研究[D].兰州：兰州大学，2010.

[2] 王金生，杨志峰，陈家军，等.包气带土壤水分滞留特征研究[J].水利学报，2000，31(2)：1-6.

[3] 施德鸿.谈包气带水分的研究[J].中国地质，1983(9)：29-31.

[4] 张蔚榛.包气带水分运移问题讲座(1)：包气带水分运移基本方程[J].水文地质工程地质，1981，7(1)：45-49.

[5] 雷志栋，杨诗秀，谢森传.土壤水动力学[M].北京：清华大学出版社，1988：21-22.

[6] 陈建锋.浅析包气带土壤水分势能[J].地下水，1998，20(1)：33-34.

[7] 刘新平，张铜会，赵哈林.干旱半干旱区沙漠化土地水分动态研究进展[J]水土保持研究，2005，12(1)：63-68.