

陕北风沙滩区包气带含水率、地下水埋深与降雨量的关系研究

许登科^{1,2,3}, 杨泽元^{1,2,3}, 郑志伟^{1,2,3}, 石玉红^{1,2,3}, 张艳娜^{1,2,3}, 史晓琼⁴

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 陕西省地下水与生态环境工程研究中心, 西安 710054; 4. 核工业二〇三研究所, 陕西 咸阳 712000)

摘要:以陕北风沙滩地区为研究区域,研究了次降雨及累计降雨对包气带和地下水的补给作用。结果表明,包气带浅表层的无效降雨量约为2.0 mm;对地下水补给的无效降雨量约为16.0 mm;降雨入渗过程中包气带各埋深处的滞后时间自上而下从1 h逐渐增加到15 h。

关键词:降雨量;含水率;地下水埋深;陕北风沙滩区

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggpps.2017.01.004

许登科,杨泽元,郑志伟,等. 陕北风沙滩区包气带含水率、地下水埋深与降雨量的关系研究[J]. 灌溉排水学报, 2017,36(1):22-28.

0 引言

土壤水是连接大气降水和地下水的枢纽,同时也是影响植物群落、长势的关键因素。在中国北方的干旱半干旱地区,土壤水的作用尤为明显^[1-2]。降雨是土壤水和地下水的主要补给来源,同时也是沙漠生态系统中植被覆盖和防风固沙的限制因素^[3]。大气降水可转化为地表径流、蒸发返回大气圈、下渗补给含水层。雨季来临之前,长期的地表蒸发,使得包气带浅层的含水率低于残余含水率,造成水分亏缺^[4]。雨季时,前期较小的降雨首先要补足地表水分亏缺,然后多余的降水才能继续下渗,补给包气带及地下水。当降水强度超过了土壤的入渗能力时,超出的那部分降雨便转化为地表径流^[5]。广义上认为,雨后沙质包气带表层和深层的含水率几乎同步升高^[6]。但实质上,雨水在沙质包气带中的入渗存在滞后现象。雨后地下水位处于不断变化中,位于自由水面变动范围内的介质,其充放水都需要时间,这是渗流场变化滞后于降雨过程的主要原因^[7]。关于降雨对包气带及地下水的补给,前人做了大量研究。常兆丰等^[8]从降雨量入手,研究表明,降雨量越大,下渗速率越大,下渗深度也越大。李中建等^[9]通过建立不同时间尺度上的降雨入渗回归模型表明,降雨入渗量与降雨量正相关,地下水位埋深与降雨量负相关。鲁瑞洁等^[10]以青海湖湖东沙地为研究对象,测得流动沙丘、经治理(人工植被+麦草方格沙障)的流动沙丘、固定沙丘发生下渗的临界降雨量分别为5.6、0.2、1.6 mm。在前人研究的基础上,以固定沙丘为研究对象,充分考虑次降雨量、累计降雨量和降雨强度3方面的影响,试图更全面的探究降雨对沙质包气带及地下水的补给作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于榆林市西北部榆补公路61 km处(109°11'44"E,38°23'26"N),是典型的风沙滩区,属北温

收稿日期:2016-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41272247);教育部留学回国人员科研启动基金项目(210C0290418);国土资源部公益性行业科研专项项目(201311076);中央高校基本科研业务费(2013G1502031,2014G2290018)

作者简介:许登科(1991-),男,河南洛阳人。硕士研究生,研究方向为地下水资源合理开发利用。E-mail: 874914834@qq.com

通信作者:杨泽元(1969-),男,副教授,博士,主要从事干旱半干旱地区地下水和生态环境关系研究。E-mail: yangzeyu@chd.edu.cn

带半干旱大陆季风气候,四季冷暖分明,干湿各异。年平均降雨365.7 mm,年平均水面蒸发1 246 mm,年平均气温8.3 ℃,年平均日照时间2 683.2 h。区内包气带岩性为细砂,地下水为第四系松散岩类孔隙潜水,地下水埋深1.20~1.50 m。

1.2 试验设计

通过分析陕北风沙滩地区降雨入渗过程中的滞后效应,研究降雨对沙地包气带和地下水的补给作用。基于前人的研究成果及要达到的目的,所需观测的要素有:①降雨等相关的气象数据;②包气带不同深度的含水率;③地下水位埋深。包气带含水率测量系统由5个5TM含水率测量探头和1个Em50数据采集器(美国Decagon公司)组成,可以对不同深度处的含水率进行连续观测。气象数据由试验场内所设立的波文比系统(05130-5 RM Yong,美国Campbell公司)自动监测。地下水位由地下水自动检测仪(MiniDiver,荷兰Eijkelkam公司)监测,探头放置在地表以下160 cm深度。

试验在中国地质调查局西安地质调查中心设立的位于陕西省榆林市榆阳区补浪河乡那泥滩村的试验点内进行。所需填埋的仪器为5TM传感器,埋于沙面以下5、10、30、60和90 cm处(图1)。填埋好后平整表面,连接数据采集器,用电脑设置好采集频率,即开始采集数据,并可定期下载数据。仪器的观测频率为1次/h。

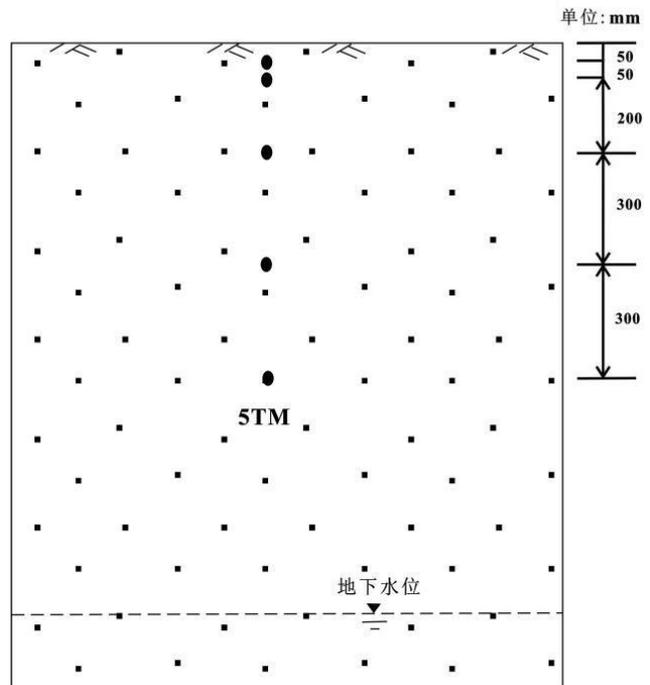


图1 传感器填埋剖面示意图

1.3 方法

数据处理采用降水保证率分析法^[11]和相关分析法。降水保证率分析,通过观测2014年全年降雨,统计降雨的时间,并将降雨量排序,计算各降雨量出现的频率。高于(或低于)某界限降雨量的累计频率,就是该降雨量保证率。相关分析是研究现象之间是否存在某种依存关系,并对具有依存关系的对象探讨其相关程度。考虑到当降雨强度超过一定数值后,包气带含水率将不再随降雨量的增加而增加,二者间的趋势宜采用对数相关^[12]。

2 结果与分析

2.1 降雨

2013年7月1日至2015年6月30日总降雨量为1 130.6 mm。其中2014年降雨量为591.4 mm,降雨134次,降雨周期为2.7 d。134次降雨发生于93 d内,表1给出了那泥滩地区2014年试验期内日降雨量的统计。从表1可以看出,丰雨期(降雨保证率 $\leq 25\%$)降雨量为8.6 mm,枯雨期(保证率 $\geq 75\%$)降雨量为0.4 mm,平雨期降雨量介于二者之间。

从表2可知,从11月到次年3月为枯雨期,5个月总降雨量为9.8 mm。而7—9月为丰雨期,月均降雨量为120.1 mm。4—6月及10月为平雨期,月均降雨量为55.4 mm,降雨集中于6—9月。每年5—9月是该区的无冻期,适合研究降雨在风沙滩地的入渗。

2.2 降雨对包气带含水率的影响

包气带剖面含水率与土壤质地、降雨频次和降雨量密切相关^[13]。连续的包气带含水率监测数据表明(表3),7—10月含水率较高,而12月至次年2月含水率较低,包气带含水率的这种波动与那泥滩地区降雨的季节变化密切相关。根据气候统计法对四季的划分可知,3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至次年2月为冬季^[14],这与榆林地区的实际季节划分相符。夏季是主要的蒸发阶段,由于蒸发,包气带含水率有所下降,但由于降雨和灌溉的原因含水率又有所增加,整体上包气带含水率维持相对较高的水平。此外春季包气带含水率也较高,究其原因是冻土融化所致。

表1 那泥滩地区2014年降雨保证率分析

序号	降雨量/mm	次数	保证率/%	序号	降雨量/mm	次数	保证率/%	序号	降雨量/mm	次数	保证率/%
1	71.6	1	1.1	17	10.8	1	18.1	33	4	1	39.4
2	44.4	1	2.1	18	10.2	1	19.2	34	3.6	3	42.6
3	34	1	3.2	19	9.6	2	21.3	35	3.4	1	43.6
4	30.4	1	4.3	20	9.4	1	22.3	36	2.8	1	44.7
5	26.4	1	5.3	21	9.2	1	23.4	37	2.4	1	45.7
6	24.6	1	6.4	22	8.6	1	24.5	38	2.2	2	47.9
7	22	1	7.5	23	8.2	2	26.6	39	1.8	3	51.1
8	21.4	1	8.5	24	8	1	27.7	40	1.6	1	52.1
9	18.2	1	9.6	25	7.6	1	28.7	41	1.4	3	55.3
10	17.4	1	10.6	26	7.4	1	29.8	42	1.2	2	57.5
11	13	1	11.7	27	7	1	30.9	43	1	1	58.5
12	12.8	1	12.8	28	6.6	2	33.0	44	0.8	2	60.6
13	12.6	1	13.8	29	5.6	2	35.1	45	0.6	3	63.8
14	11.6	1	14.9	30	5.4	1	36.2	46	0.4	12	76.6
15	11.4	1	16.0	31	5.2	1	37.2	47	0.2	21	100.0
16	11	1	17.0	32	5	1	38.3				

表2 那泥滩地区2014年月降雨量统计

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨量/mm	0	2.6	1.8	71	34.8	61.2	94	134.8	131.4	54.4	5.4	0

表3 2014年那泥滩地区包气带不同埋深处月平均体积含水率

埋深/cm	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
5	0.032	0.036	0.053	0.079	0.065	0.048	0.082	0.067	0.104	0.095	0.073	0.035
10	0.036	0.048	0.070	0.087	0.073	0.054	0.088	0.070	0.099	0.091	0.073	0.038

降水在沙丘中的下渗深度与降水量及降水强度正相关^[8]。降雨量较小时,只能补给前期的水分亏缺。如2014年6月6日至6月18日间,累计181 h没有降雨,此后2 h降雨量分别为0.2 mm和1.2 mm,降雨量较少,包气带剖面含水率并没有发生明显的变化。此外,短期的降雨量虽然足以补给前期的蒸发亏损,但是由于降雨持续时间较短,且很快雨过天晴,强烈的光照使得表层土壤中的水还没来得及下渗,就立即被蒸发。

依据降雨强度,降雨可分为:小雨、中雨、大雨和暴雨,见表4^[15]。

表4 降雨分级

级别	小雨	中雨	大雨	暴雨
降雨强度	1 h内降雨量/mm	2.5~8.0	8.1~15.9	≥16
	24 h内降雨量/mm	<10	10.0~24.9	≥50

图2给出了2014年6—9月间那泥滩地区不同类型降雨后,沙质包气带不同深度处含水率的变化。所选时段均为1 d,且该时段之前48 h均无降雨发生。结合图2和表5可知,包气带含水率增量随降雨强度的减小而减小,随包气带埋深的增大而减小。暴雨型(71.6 mm),降雨在包气带5~60 cm埋深范围内入渗的滞后时间从1 h增加到9 h,含水率增量自上而下由0.056 cm³/cm³变为0.046 cm³/cm³。大雨型(30.8 mm),滞后时间从1 h增加到12 h,含水率增量由0.037 cm³/cm³变为0.010 cm³/cm³。中雨型(21.2 mm)滞后时间从1 h增加到15 h,含水率增量由0.031 cm³/cm³变为0.009 cm³/cm³(表5)。小雨型(0.8 mm)和无雨型(0 mm)2种情形,包气带各层含水率均无明显变化,故不存在滞后。

由于仪器埋埋的原因,无法确定包气带表面的无效降雨量,只能以埋深5 cm处为例。通过观测5 cm埋深处含水率与降水的关系发现,在前24 h无降雨的情况下,当次降雨量为1.8 mm时,埋深5 cm处含水率没有变化;而当次降雨量为2.2 mm时,5 cm埋深处含水率有微弱升高。所以埋深5 cm处无效降雨量约为2.0 mm。

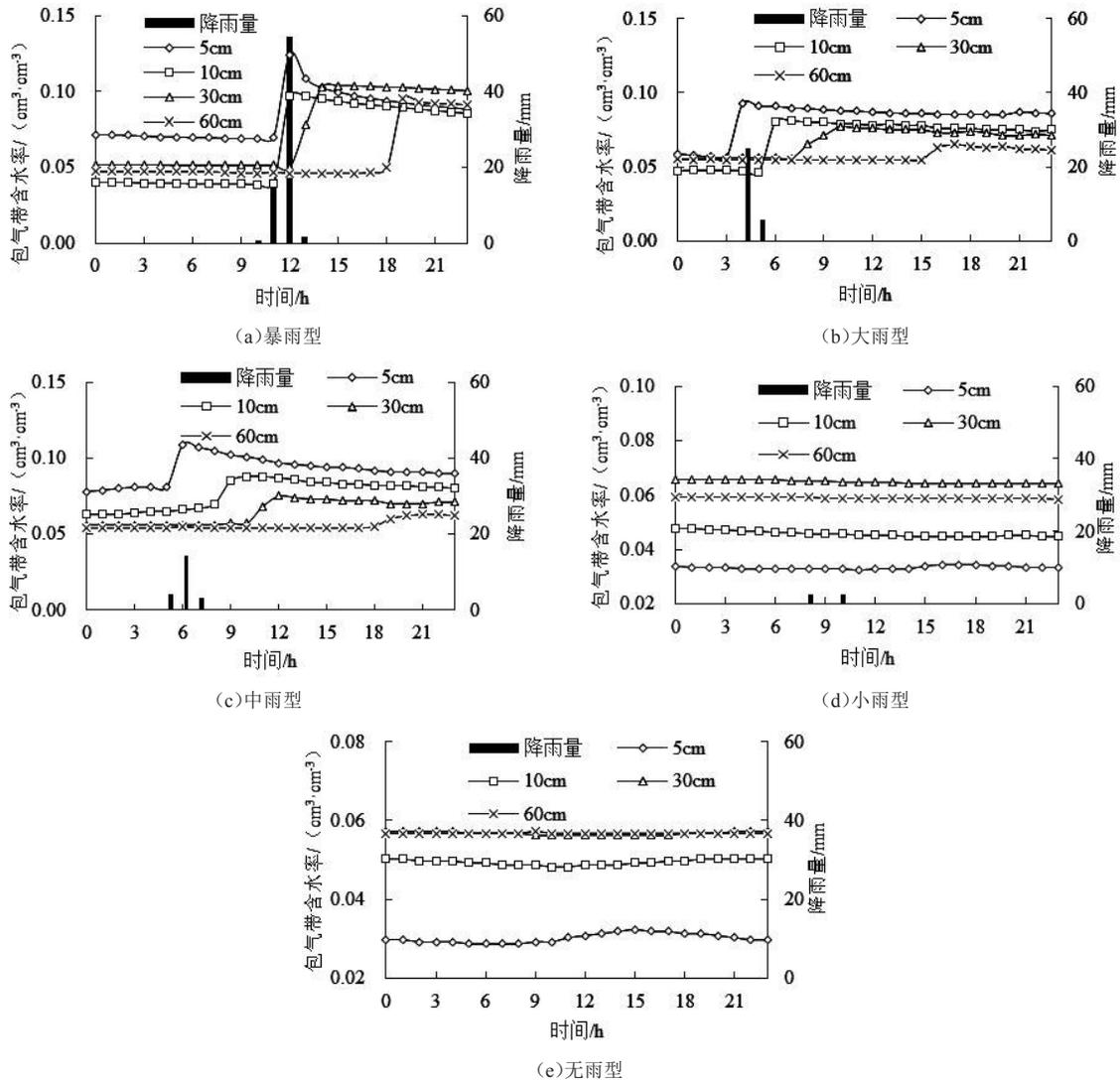


图2 那泥滩地区不同降雨类型对包气带不同深度上含水率的影响

表5 包气带不同深度上含水率随降雨类型的变化

降雨类型	降雨量/mm	埋深/cm	滞后时间/h	包气带含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)		含水率增量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
				雨前	雨后	
暴雨	71.6	5	1	0.069	0.125	0.056
		10	2	0.040	0.097	0.057
		30	4	0.050	0.104	0.054
		60	9	0.047	0.093	0.046
大雨	30.8	5	1	0.056	0.093	0.037
		10	3	0.047	0.081	0.034
		30	5	0.056	0.077	0.021
中雨	21.2	60	12	0.055	0.065	0.010
		5	1	0.078	0.109	0.031
		10	4	0.063	0.088	0.025
		30	7	0.057	0.075	0.018
		60	15	0.054	0.063	0.009

2.3 累计降雨量与包气带含水率的关系

针对连续降雨的情形,需要考虑累计降雨量对包气带含水率的影响。图3给出了5、10和30 cm三个深度的含水率与累计降雨量的对数相关性。

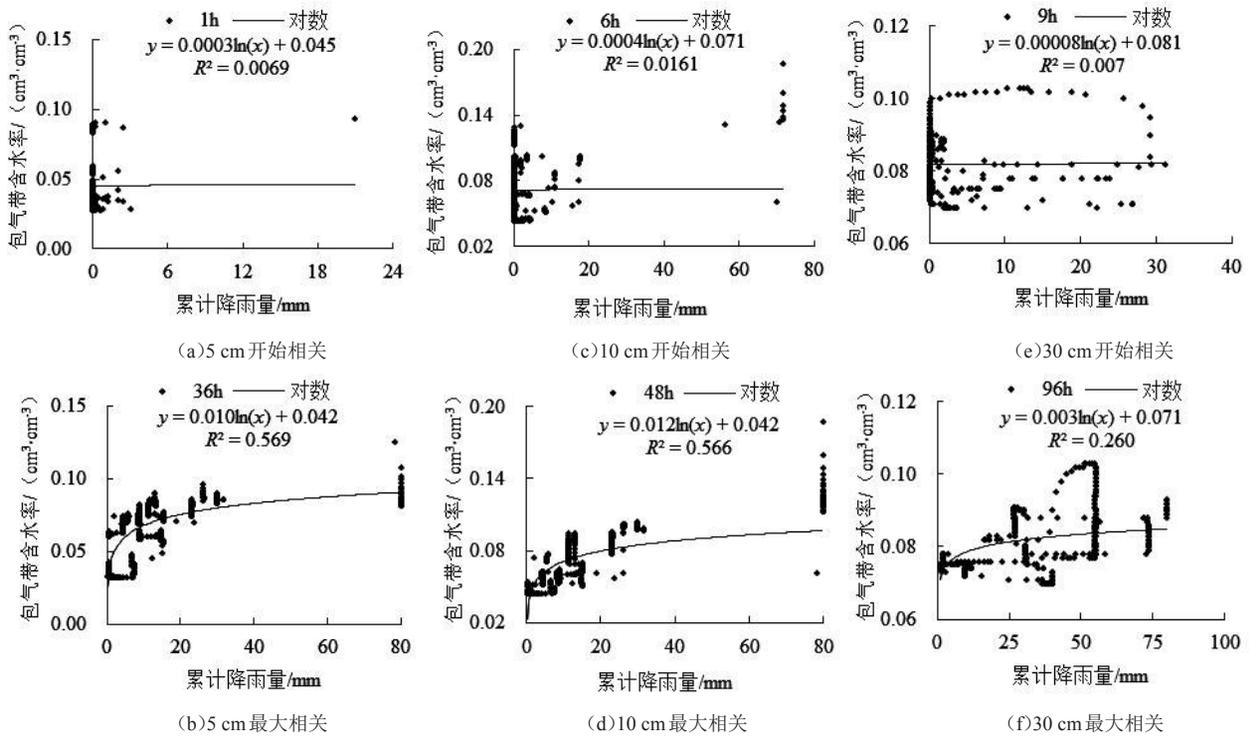


图3 累计降雨量与包气带含水率的相关性分析

图3中(a)、(c)、(e)分别为5、10、30 cm埋深上包气带含水率与前1、6、9 h累计降雨量开始相关的时刻,其相关系数 R 分别为0.083、0.127和0.087,查相关系数表^[6]可知,均大于显著性水平为90%时的相关系数。这表明,埋深5 cm处的滞后时间为1 h,10 cm处为6 h,30 cm处为9 h。从图3(b)、(d)、(f)可以看出,包气带含水率数据与趋势线吻合度高,分别是各埋深处所对应的相关性最大时刻,自此时刻后相关性开始降低。所以连续降雨情形,埋深5 cm处的影响持续时间为35 h,10 cm处为42 h,30 cm处为87 h(图4)。而包气带埋深60、90 cm处,包气带含水率与累计降雨的相关性不显著。

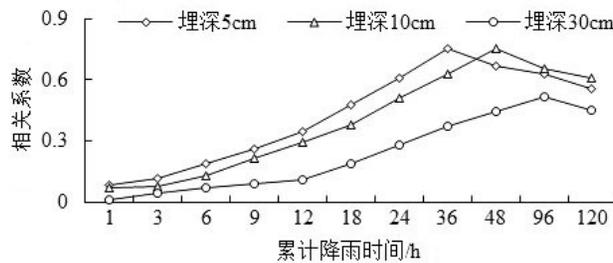


图4 包气带各埋深层含水率与前期累计降雨量的相关性

2.4 降雨对地下水位埋深的影响

榆林地区,夏季受东南暖湿气流影响,是年内降水最集中的季节,近61%的降雨发生于该期。同时,夏季又是蒸发最强烈的季节,降雨和灌溉成为维持作物生长的保障。地下水位随蒸发、降雨和灌溉呈现波动性。图5所示为那泥滩地下水位埋深与各降雨类型的关系(以沙表面为原点,垂直向下为正)。

从图5和表6可知,降雨入渗补给地下水存在滞后性,降水强度越大,滞后时间越短,反之则越长。对暴雨(71.6 mm)、大雨(33.6 mm)和中雨(21.2 mm)3种类型,降雨入渗补给地下水的滞后时间分别为3、6、9 h,地下水位分别升高了9.2、5.1、1.2 cm。而小雨型(1.6 mm),下渗深度达不到地下水埋深,同无雨型(0 mm)一样,地下水埋深只是随昼夜正常波动,不存在滞后。

当降雨量小于某特定值时,降水只补给包气带剖面,并不补给地下水,即对地下水补给是无效的。通过对那泥滩地区2013年7月至2014年12月间次降雨量的统计发现:2013年7月10日次降雨量为14.4 mm,地下水位并没有升高。而2014年8月12日次降雨量为17.2 mm,地下水位升高了0.4 cm。故认为,对地下水位补给的无效降雨量约为16.0 mm。

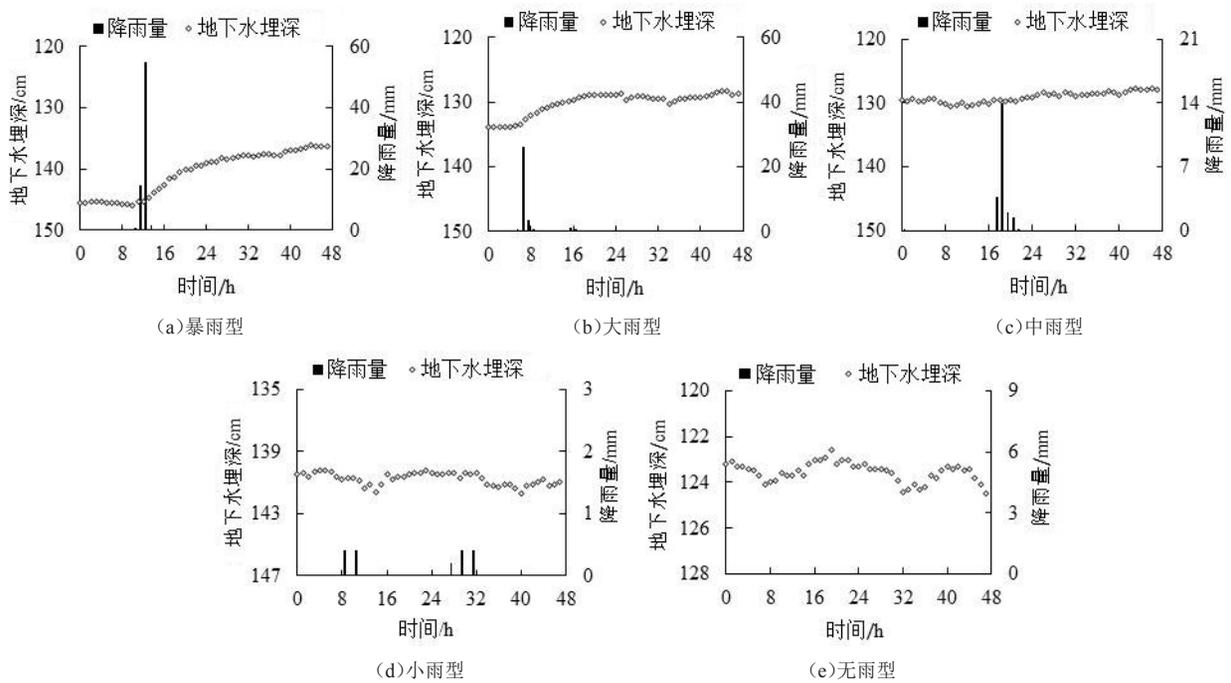


图5 地下水埋深随时间和降雨量的变化

表6 地下水埋深随降雨类型的变化

降雨类型	降雨量/mm	滞后时间/h	地下水埋深/cm		地下水水位升高值/cm
			雨前	雨后	
暴雨	71.6	3	145.4	136.2	9.2
大雨	33.6	5	132.8	127.7	5.1
中雨	21.2	7	129.4	128.2	1.2
小雨	1.6	—	140.5	140.4	0.1

3 结论与讨论

1) 次降雨量的最大入渗深度在 60~90 cm 之间。降雨强度不同,降雨入渗深度不同。降雨强度相同时,降雨入渗深度与降雨量正相关。由此可推算次降雨量对包气带的补给量与补给深度。

2) 埋深 5 cm 处的无效降雨量约为 2.0 mm。次降雨量小于 2.0 mm 时,降雨只是补给 5 cm 以上土层的水分亏缺,并不能对 5 cm 埋深层产生影响,只有次降雨量大于 2.0 mm 时,5 cm 埋深层的含水率才升高。基于浅表面的无效降雨量,可以根据研究区作物生长的需要及气候条件,合理调整灌溉期和灌溉量。

3) 次降雨量或累计降雨量在包气带各埋深层的滞后时间和影响持续时间自上而下递增。就次降雨量而言,从埋深 5 cm 至埋深 60 cm 深度,滞后时间逐渐从 1 h 增加到 15 h。而累计降雨量,滞后时间逐渐从 1 h 增加到 9 h,影响持续时间从 35 h 增加到 87 h。说明包气带岩性为均质细砂时,滞后时间影响持续时间是由降雨量和降雨强度共同决定的。

4) 对地下水补给的临界降雨量约为 16.0 mm。降雨量小于 16.0 mm 时,地下水位只是正常的波动,对地下水而言为无效降雨量,只有大于 16.0 mm 时,才能补给地下水。

兹分析了陕北风沙草滩区固定沙丘的临界下渗降雨量,所得浅表层临界下渗降雨量约为 2.0 mm 与鲁瑞洁等^[10]测得的固定沙丘表面临界下渗降雨量 1.6 mm 相近。可见,在干旱半干旱的中国北方,降雨、蒸发等条件相同的情况下,质地相同的砂土,临界下渗降雨量基本相同。不同于常兆丰等^[8]单从降雨量入手,兹从次降雨量、累计降雨量和降雨强度 3 个方面探讨了降雨在沙丘中的入渗,阐明了降雨量、降雨强度和入渗深度的关系,发现降雨强度决定入渗的快慢,降雨量决定入渗深度的大小。此外,还对不同时间尺度上的降雨量进行分析,但所取时间尺度不同于李中建等^[9]的年、月、日,而是小时,这是因为李中建关于降雨入渗回归模型的研究针对的是粉质细砂和黏土,而本研究针对的是毛乌素细砂。其粒径大于粉质细砂,垂向渗透系数和垂直入渗速率也大于粉质细砂。若还用月、日尺度,不能对各埋深层的滞后时间加以区别。故针对不同

质地的土壤,需采用不同的时间尺度。

参考文献:

- [1] 杨泽元. 地下水引起的表生生态效应及其评价研究——以秃尾河流域为例[D]. 西安: 长安大学, 2004
- [2] 杨泽元, 王文科, 黄金廷, 等. 陕北风沙滩地区生态安全地下水位埋深研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(8): 67-74.
- [3] 雷志栋, 扬诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 77-82.
- [4] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995: 63-66.
- [5] 彭遗柱, 林三益. 一种考虑土壤含水率分布的降雨径流概念模型[J]. 四川水力发电, 1990(1): 4-11.
- [6] LIU X, HE Y, ZHANG T, et al. The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(12):8 699-8 708.
- [7] 虞鸿, 包腾飞, 薛凌峰. 降雨滞后效应的数值模拟[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 200-206.
- [8] 常兆丰, 仲生年, 韩福贵. 降水在沙丘中的渗透过程研究[J]. 防护林科技, 2002(4): 5-8.
- [9] 李中建, 齐登红. 利用回归分析确定降水入渗补给量[J]. 湖南环境生物职业技术学院学报, 2009, 15(2):42-45.
- [10] 鲁瑞洁, 唐清亮, 魏殿生, 等. 青海湖湖东沙地不同沙丘降雨入渗研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(3):797-803.
- [11] 孙翌. 学科化服务技术与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [12] 赵彬, 周景春, 张存岭, 等. 降水与土壤含水量关系分析[J]. 农业灾害研究, 2013, 3(7):14-17.
- [13] ENSIGN K L, WEBB E A, LONGSTAFFE F J. Micro-environmental and seasonal variations in soil water content of the unsaturated zone of a sand dune system at Pinery Provincial Park, Ontario, Canada[J]. Geoderma,2006,136(s3/4):788-802.
- [14] 琳琳. 一年四季的划分[J]. 农村天地, 2003(3):37-37.
- [15] 张星星, 朱成立, 彭世彰, 等. 降水预报准确度分析及其在提高降水利用率中的作用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014(3): 230-233.
- [16] 陈彦光. 地理数学方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

Relationship between Moisture of Aeration Zone and Buried Depth of Groundwater Table with Precipitation in Sandy Marsh Area of Northern Shaanxi Province

XU Dengke^{1,2,3}, YANG Zeyuan^{1,2,3}, ZHENG Zhiwei^{1,2,3}, SHI Yuhong^{1,2,3}, ZHANG Yanna^{1,2,3}, SHI Xiaoqiong⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Regions of Ministry of Education, Xi'an 710054, China;

3. Engineering Research Center of Groundwater and Eco-environment of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China;

4. NO.203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

Abstract: Taking the wind-blown sand beach area of northern Shaanxi as the research area, the recharge of single precipitation and accumulative precipitation for the aeration zone and groundwater were researched. The results indicated that the ineffective precipitation for the surface was about 2.0 mm and the ineffective precipitation for groundwater was about 16.0 mm. From top to bottom, the lag time of all buried depths during precipitation infiltration increased gradually from 1 h to 15 h.

Key words: precipitation; moisture; buried depth of groundwater table; the wind-blown sand beach area of northern Shaanxi province

责任编辑:陆红飞