

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911007

西北内陆盆地降水入渗补给季节性变化 ——以新疆昌吉地下水均衡试验场为例

齐子萱^{1,2}, 周金龙^{1,2}, 季彦桢³, 孙 英^{1,2}, 王新中³, 郑玉莲³

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆昌吉州地质环境监测站, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 西北内陆盆地降水稀少, 一年中有较长时间的冻结期, 了解其降水入渗补给规律的季节性变化对于准确评估其地下水资源量和解释气候变化对其地下水补给的影响非常重要。采用新疆昌吉地下水均衡试验站 27 套地中蒸渗仪 1992—2015 年试验资料, 应用拉依达法则筛选出长系列观测资料中的异常值, 结合昌吉试验场相关气象要素观测资料划分西北内陆盆地冻结期、冻融期和非冻结期的时间区间, 分析不同时期影响降水入渗补给地下水的主要因素; 计算不同时期多年平均降水入渗补给量占多年平均年降水入渗补给量的百分比, 确定不同季节对年降水入渗补给的重要性; 依据多年平均降水入渗补给量随潜水埋深的变化规律, 确定冻融期、非冻结期不同土质降水入渗的最佳潜水埋深。结果表明: 在试验条件下, 砂卵砾石和细砂非冻结期最佳潜水埋深为 0.5 m, 轻黏土非冻结期最佳潜水埋深 0.1 m; 细砂冻融期最佳潜水埋深为 1.0 m, 砂卵砾石冻融期最佳潜水埋深为 0.5 m, 轻黏土冻融期最佳潜水埋深为 0.1 m; 冻结期地下水位埋深对土壤入渗能力的影响十分明显, 潜水埋深和降水入渗补给量之间没有显著的线性关系; 冻融期是西北内陆盆地浅埋型地下水降水入渗补给的重要时期, 冻结期是西北内陆盆地深埋型地下水降水入渗补给的重要时期。

关键词: 降水入渗补给; 非冻结期; 冻融期; 冻结期; 西北内陆盆地

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0012-09

Seasonal variation in recharge of infiltration from precipitation for the inland basins of northwestern China: taking the Changji groundwater balance test station in Xinjiang as an example

QI Zixuan^{1,2}, ZHOU Jinlong^{1,2}, JI Yanzhen³, SUN Ying^{1,2}, WANG Xinzong³, ZHENG Yulian³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. Changji Geological Environment Monitoring Station, Changji, Xinjiang 831100, China)

Abstract: The inland basins of northwestern China has little precipitation and a long freezing period in a year. It is very important to understand the seasonal variation in recharge of infiltration from precipitation for accurately evaluating groundwater resources and explaining the impact of climate change on groundwater recharge in cold and arid regions. This article adopts experimental data of 27 sets of lysimeters in the Groundwater Balance Test Station of Changji, Xinjiang from 1992 to 2015, applies the Layda's rule to screen outliers in long series of observations, combines the observational data of meteorological factors of the test

收稿日期: 2019-11-03; 修订日期: 2019-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709232)

第一作者: 齐子萱(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源研究。E-mail: 775774984@qq.com

通讯作者: 周金龙(1964-), 男, 博士, 二级教授, 博士生导师, 主要从事干旱区地下水利用与保护、绿洲生态地球化学研究。

E-mail: zjzhoujl@163.com

station to divide time range of freezing period, thawing period and non-freezing period in the inland basins of northwestern China, analyzes influencing factors on infiltration recharge of groundwater in different periods. The importance of different seasons to annual recharge infiltration precipitation is determined by calculating the percentage of average replenishment of infiltration from precipitation during different periods to average annual replenishment of infiltration from precipitation. According to the change law of annual replenishment of infiltration from precipitation with groundwater depth, the optimal burial depth for different soil texture in the thawing period and non-freezing period is determined. The results indicate that under the test conditions, the optimal depth of sand gravel and fine sand are 0.5 m in the non-freezing period, and the optimal depth of light clay is 0.1 m in the non-freezing period. The optimal depth of fine sand is 1.0 m in the thawing period, the optimal depth of sand gravel is 0.5 m in the thawing period, and the optimal depth of light clay is 0.1 m in the thawing period. The impact of depth of groundwater level on soil infiltration capacity during freezing period is quite obvious, and there is no significant linear relationship between depth of groundwater level and replenishment of infiltration from precipitation. The thawing period is an important period of replenishment of infiltration from precipitation for the shallow-buried groundwater. The freezing period is an important period of replenishment of infiltration from precipitation for deep-buried groundwater.

Keywords: precipitation infiltration recharge; non-freezing period; thawing period; freezing period; inland basins of northwestern China

地下水补给研究是地下水资源评价、水资源可利用、水资源管理的基础,也是建立地下水模型的关键^[1]。地下水补给研究中降水入渗补给量的计算精度直接关系到区域水资源评价的精度^[2]。降水入渗补给量的大小受很多因素控制,如土地利用类型、降水因素(包括降水强度、降水历时和降水量)、包气带厚度及岩性、地形等^[3]。因此降水入渗补给规律在不同时间和空间尺度上有较大差异^[4]。

Dripps 和 Bradbury^[5]构建了一个土壤-水平衡模型,评价美国威斯康星州北部鳟鱼湖盆地 1996—2000 年地下水补给的时空分布,结果表明在建立模型时忽视地下水补给在时间和空间上的变异性会导致区域水资源管理、污染物运移研究的模型得出的结果和预测无效;刘泓志等^[6]采用克里金插值法绘制了降水入渗补给系数插值图和地下水埋深图,与地形图进行对比,分析发现降水入渗补给系数大小与研究区地形和地下水埋深相关;曹颖等^[7]利用遥感技术,通过构建基于专家经验知识的评价系统和模型,评价分析北京市各区降水入渗补给条件的空间分异性,结果表明地层岩性与地质构造因子是影响降水入渗补给条件的重要因素;张施跃等^[8]提出了一种基于土地利用类型,结合 GIS 和 VBA 编程技术计算大气降水入渗补给量的 PIRCL 方法,以广州市广花盆地为例,用此方法与水量平衡法计算的多年平均降水入渗补给量进行对比,结果表明两种方法计算结果相近,只需要区域遥感数据、

区域降水量数据和对应时段地下水位动态利用 PIRCL 方法可以计算出大气降水入渗补给量,该方法可以节省大量的工作量;郗鸿峰等^[9]通过分析冻结期和冻融期地下水位动态的变化特征及其与相关环境要素的对应关系,确定了实例研究场地内冻融期的融雪入渗补给系数仅为非冻结期大气降水入渗系数 1/2 左右,但其研究成果受限于研究场地的特征以及研究时段内的气象条件,代表性尚不充分。目前国内外使用地中蒸渗仪方法研究降水入渗规律的试验以短期观测资料为基础的比较多,通过长系列数据分析相关参数的少;用短期观测资料对研究区年降水入渗系数和埋深之间关系拟合的线性经验公式较多,但由于资料时间序列短,拟合经验公式适用性较差。从空间尺度上探讨降水入渗补给规律变化的研究比较多,从时间尺度上部分研究仍集中在割裂的探讨某个季节的气候特征对年降水入渗补给的影响,少有研究关注降水入渗补给地下水的季节性分布,特别是在寒冷干旱地区,由于气候和植被的季节性差异,降水入渗补给规律的变化十分明显^[10]。了解降水入渗补给规律的季节性变化对于准确评估寒冷干旱地区地下水资源量和解释气候变化对其地下水补给的影响非常重要^[11]。因此,本文利用新疆昌吉地下水均衡试验场(以下简称“昌吉试验场”)1992—2015 年长系列降水入渗观测资料,划分西北内陆盆地冻结期、冻融期和非冻结期,分析不同时期降水入渗补给地下水的主要影响因素,确定不同季节对地

下水补给的重要性,为应对气候变化条件下西北内陆盆地地下水资源评价和合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

昌吉试验场地处新疆昌吉市北郊,位于新疆天山北麓平原区头屯河冲洪积扇前缘西侧,是西北内陆盆地平原区大型综合试验站,于1992年开始运行。昌吉试验场所在区域的水文地质图,见图1。天山北麓平原区南部山前倾斜平原含水层主要为卵砾石组成的单一结构潜水,孔隙发育,透水性良好;北部风积平原含水层为以砂砾石和砂、粉细砂组成的双层结构潜水-多层结构承压水^[12]。昌吉试验场气候特征为典型的内陆干旱气候,昼夜温差大,多年平均气温7.9℃,多年平均降水量为204.9 mm,多年平均蒸发量为1 857.9 mm。场区内包气带岩性以粉质砂土、粉质亚黏土为主,夹0.30~1.65 m厚的粉细砂层和0.25~0.35 m厚的含砾中细砂层和砂砾石层。试验场2016年平均潜水位埋深为21.09 m。

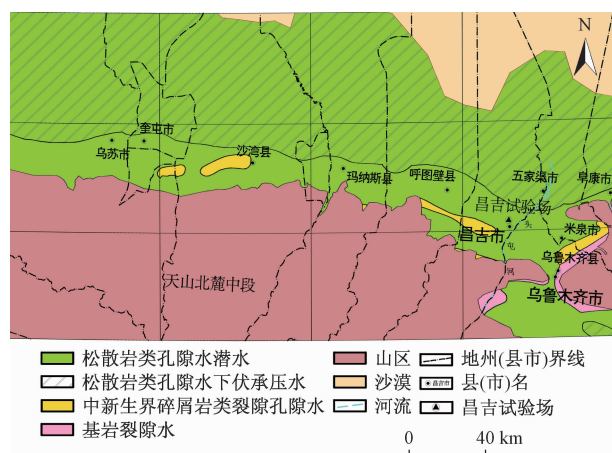


图1 昌吉地下水试验场所在区域水文地质质图

(根据文献[13]修改)

Fig.1 Regional hydrogeological map near the Changji Groundwater Balance Test Station

1.2 试验概况

昌吉试验场模拟剖面入渗补给观测设施为地渗仪观测系统,共有42个皿筒(其中2.0 m²皿筒29个,0.3 m²皿筒10个,4.0 m²皿筒3个)。本文选用横截面积为2.0 m²的皿筒27个,该尺寸皿筒中土壤岩性有砂卵砾石、细砂和轻黏土3种,具体组合方案见表1。降水入渗补给量测试仪器为清华大学水利系水资源实验室研制的马氏瓶,精度为0.003~0.025 mm;观

测时间为每日北京时间8:00和20:00。通过整理地中蒸渗仪1992—2015年实测资料,发现地中蒸渗仪在1992—1998年因土体处于自然释水的密实阶段,观测的降水入渗补给量偏大;2011—2015年仪器出现明显老化现象,观测资料连续性较差;1999—2010年的观测资料连续性较好,且其平均降水量(211.5 mm)与1992—2015年的平均降水量(204.9 mm)相近。因此本文主要依据昌吉试验场1999—2010年的降水入渗观测资料进行分析。气象观测项目包括:气温、地温、冻土和雪深。观测时间为每日北京时间8:00、14:00和20:00,其中地温观测深度为0,5,10,15,20,40,80,160,320 cm。

表1 降水入渗试验方案

Table 1 Precipitation infiltration experimental scheme			
方案	土壤	下垫面	地下水埋深/m
A	砂卵砾石	裸地	0.1,0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0
B	细砂	裸地	0.1,0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0
C	轻黏土	裸地	0.1,0.5,1.0,2.0,3.0,4.0,5.0,6.0,7.0

1.3 数据处理

为避免1999—2010年长系列降水入渗观测数据中的异常值影响,本文采用拉依达3σ准则进行预处理,并剔除异常值,每次剔除异常值后,其余数据应该重新计算σ值,以新的σ值为基础,再次判别异常值是否存在,直至无异常值为止^[14]。拉依达准则公式为:

$$\frac{(X - \bar{X})}{\sigma} \leq 3 \quad (1)$$

式中:X——需要判别的数据;

$\bar{X}$ ——需要判别数据的算术平均值;

σ——需要判别数据的标准差。

2 结果与分析

2.1 冻结期、冻融期和非冻结期划分及气象因素分析

气温和地温两个气象要素每年的变化趋势基本保持不变,且已有研究表明,气温和地温的变化趋势基本一致^[15]。由于4—10月西北内陆盆地气温和地温均在0℃以上,可以定义4—10月为西北内陆盆地的非冻结期。

为具体划分西北内陆盆地平原区冻结期和冻融期的分布时间,选取气温和地温在0℃以下的月份进行研究。考虑到该地区昼夜温差大的特点,选取昌吉试验场2005年11月1日—2010年3月31日近5年每日08:00与14:00的实测气温和地温数据分析。通过

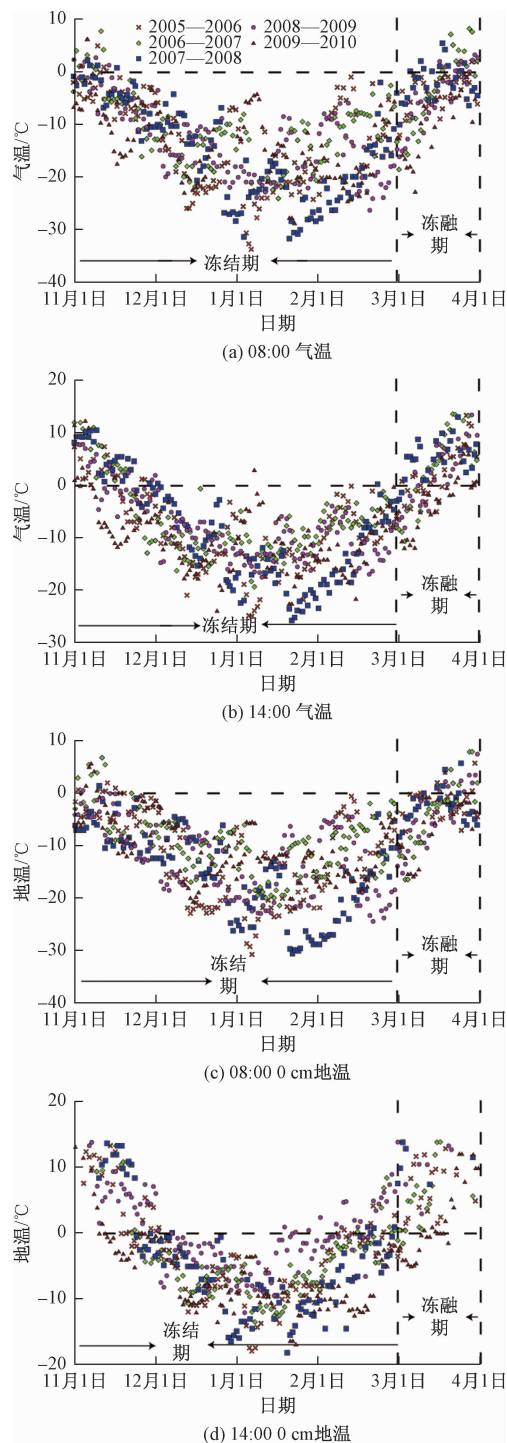


图2 2005—2010年昌吉实验场逐日气温及地温变化

Fig. 2 Daily air and soil temperature change of the Changji Experimental Station from 2005 to 2010

实测气温和地温变化散点图(图2)可以看出,08:00气温和14:00气温在11月—翌年2月多保持在 0°C 以下,08:00最低气温可达 -34°C ,14:00最低气温可达 -31.7°C ,1月上旬是西北内陆盆地气温最低的时段。通过近5年0 cm土层08:00和14:00地温变化

过程线(图2c~2d)可以看出,除11月上旬14:00有少部分地温在 0°C 以上,11月—翌年2月在08:00和14:00地温均处于 0°C 以下,与气温的变化规律基本一致,因此将11月—翌年2月定义为西北内陆盆地的冻结期。

3月08:00气温多保持在 0°C 以下,但14:00气温大部分保持在 0°C 以上,且昼夜温差较大。受昼夜温差的影响,3月0 cm地温在08:00和14:00的变化趋势与气温的变化趋势一致,3月0 cm处地温在08:00多处于 0°C 以下,在14:00基本处于 0°C 以上,土壤表现为明显的昼融夜冻状态,因此将3月定义为西北内陆盆地的冻融期。

无论是冻结期还是冻融期,冻结层的形成与融化影响着土壤剖面的水分运移,而地温和气温是影响冻土冻结和融化的主要因素,冻结期土壤最大冻结深度和土壤的平均冻结速率与稳定的日平均负气温和负地温有密切的关系^[16-17]。以2009—2010年冻结期和冻融期不同土壤埋深条件下14:00气温和地温的变化过程线(图3)可以看出,冻结期和非冻结期0 cm处的地温均保持在 0°C 以下,且气温的变化趋势和0 cm处地温变化趋势一致,随着土壤埋深的增大,80, 160, 320 cm处地温也逐渐增大,320 cm处地温基本稳定在 17°C 。表层土壤受气象要素影响较为显著,随着土壤埋深增大,地温逐渐趋于稳定。

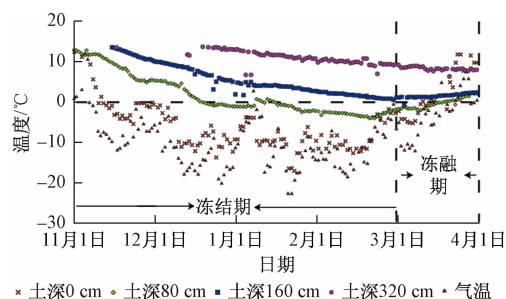


图3 2009—2010年昌吉试验场冻结—冻融期不同土层地温和气温逐日变化

Fig. 3 Daily variation in air and soil temperature in different soil layers during the freezing-thaw period of the Changji Experimental Station from 2009 to 2010

2.2 非冻结期降水入渗规律分析

前人对非冻结期降雨入渗的影响因素^[18-19]、机理^[20-21]等方面做了大量研究。试验条件下,影响非冻结期降雨入渗的主要因素有:降雨量、地下水位埋深、包气带岩性和雨前包气带土壤含水率^[22]。1999—2010年非冻结期多年平均降水量仅为138.8 mm。由

细砂非冻结期降水量和不同潜水位埋深降水入渗补给量之间的关系(图4)可以看出,非冻结期降水量和降水入渗补给量有显著的线性关系,该时期的降水入渗补给量随降水量的增大而增大,同一非冻结期相同降水量条件下,随着地下水位埋深增大,降水入渗补给量减小。

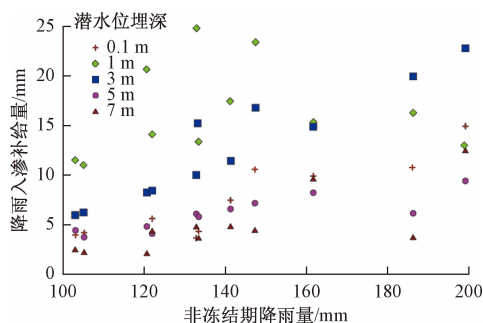


图4 细砂非冻结期降水量和降水入渗补给量的关系

Fig.4 Relationship between precipitation and recharge in fine sand during the non-freezing period

从1999—2010年4—10月非冻结期不同岩性条件下多年平均降水入渗补给量随埋深变化过程线(图5)可看出,相同潜水位埋深条件下,不同土质降水入渗补给量从大到小为:砂卵砾石>细砂>轻黏土。表明非冻结期地下水位埋深相同时,岩性越粗,包气带水分亏缺量越小,越有利于降雨入渗补给。3种岩性在非冻结期潜水位埋深较浅时都存在一个峰值埋深,当潜水位埋深小于该峰值埋深时,降水入渗补给量随埋深的增大而增大;当潜水位埋深大于该峰值埋深时,降雨入渗补给量随埋深的增大而减小,并逐渐趋于稳定。非冻结期峰值埋深的变化规律和年降水入渗补给中的最佳地下水位埋深变化规律相似。年降水入渗补给中的最佳地下水位埋深是指在一定的年降水特征和岩性条件下,入渗补给量最大时的水位埋深。本文引入非冻结期最佳地下水位埋深概念评价该时期降水入渗量的峰值埋深^[23]。非冻结期砂卵砾石最佳地下水位埋深为0.5 m,细砂最佳地下水位埋深为0.5 m,轻黏土最佳地下水位埋深0.1 m。

2.3 冻结期降水入渗规律分析

冻结期土壤水分运移特征与非冻结期土壤水分运移特征有着明显的差异,其过程十分复杂,在冻结期土壤冻结层剖面形成过程中,土壤的水分运动呈上渗型,土壤中的部分气态水和液态水会向冻结层下界面靠近并凝结使冻结层下界面积聚一部分水量^[24]。土壤初始含水率、下垫面条件,土壤温度和土壤结构等都是影

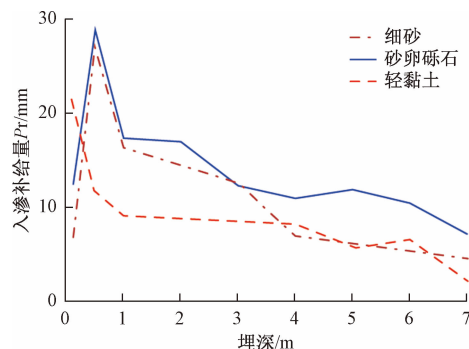


图5 1999—2010年非冻结期(4—10月)不同土质多年平均

降水入渗补给量随埋深变化图

Fig.5 Changing process of the annual average replenishment of infiltration from precipitation with depth in different soils during the non-freezing period from 1999 to 2010

响冻结土壤水分入渗的重要因素,已有研究表明垂向上冻结土壤的入渗能力明显小于非冻结土壤的入渗能力^[25-26]。西北内陆盆地冻结期长达4个月,降水以降雪的形式出现,受到表层冻结土壤的影响,冻结期降水量对地下水无入渗补给。但由于降水入渗补给过程存在明显的时间滞后性,包气带深层地温高,土壤处于未冻结状态,包气带残余的部分水量会继续发生运移,产生入渗补给量。从昌吉试验场1999—2010年冻结期降水入渗补给量统计表(表2)可以看出,冻结期潜水位埋深0~1 m条件下3种土质降水入渗补给量几乎为0.00 mm,潜水位埋深1~2 m条件下降水入渗补给量均小于0.50 mm,表明冻结期潜水位埋深0~2 m条件下3种土质均不利于地下水补给。细砂和砂卵砾石潜水位埋深2~4 m条件下降水入渗补给量仍小于1.0 mm,潜水位埋深大于4.0 m时才产生明显的入渗补给量。轻黏土潜水位埋深大于2.0 m条件下,降水入渗补给量均大于1.00 mm,产生明显的入渗补给并保持稳定。对比3种土质,明显产生入渗补给量时,相同地下水位埋深条件下,砂卵砾石>细砂>轻黏土。由冻结期多年平均降水入渗补给量占多年平均年降水入渗补给量的比例(表3)可以看出,细砂、砂卵砾石和轻黏土分别在潜水位埋深为5.0,7.0,7.0 m时的冻结期多年平均降水入渗补给量分别占多年平均年降水入渗补给量的54.84%、45.61%和64.95%。结果表明,冻结期地下水位埋深对土壤入渗能力的影响十分明显,潜水位埋深和降水入渗补给量之间并没有显著的线性关系。和非冻结期降水入渗规律不同,冻结期潜水位埋深较大时,包气带残余含水量高,土壤入渗能力强,有利于深埋型地下水补给。相同潜水位埋深条件下,岩性越粗,降水入渗

补给量越大,这和非冻结期降水入渗规律相同。冻结期是深埋型地下水降水入渗补给的重要时期。

表 2 冻结期降水入渗补给量统计表

Table 2 Replenishment of infiltration from precipitation during the freezing period /mm

岩性	年份	冻结期降水量/mm	潜水位埋深/m								
			0. 10	0. 50	1. 00	2. 00	3. 00	4. 00	5. 00	6. 00	7. 00
细砂	1999-11—2000-02	82. 0	0. 00	0. 18	0. 23	0. 50	1. 16	0. 84	4. 59	4. 21	7. 98
	2000-11—2001-02	51. 2	0. 01	0. 19	0. 02	0. 35	0. 25	0. 63	6. 51	5. 04	5. 10
	2001-11—2002-02	36. 4	0. 00	0. 23	0. 04	0. 50	0. 82	0. 37	4. 05	8. 43	12. 39
	2002-11—2003-02	42. 7	0. 02	0. 24	0. 15	0. 26	0. 47	0. 43	11. 33	11. 66	3. 87
	2003-11—2004-02	55. 0	0. 01	0. 22	0. 06	0. 29	1. 24	1. 28	3. 75	5. 66	5. 82
	2004-11—2005-02	46. 4	0. 02	0. 11	0. 08	0. 32	0. 66	0. 58	1. 40	4. 84	4. 04
	2005-11—2006-02	66. 4	0. 03	0. 24	0. 01	0. 33	2. 90	2. 57	12. 15	3. 20	3. 10
	2006-11—2007-02	39. 0	0. 04	0. 27	0. 23	0. 17	1. 89	0. 30	10. 50	7. 43	3. 39
	2007-11—2008-02	31. 9	0. 01	0. 11	0. 10	0. 44	0. 86	0. 26	3. 49	3. 14	5. 64
	2008-11—2009-02	29. 9	0. 01	0. 13	0. 18	0. 41	0. 81	0. 25	9. 51	5. 48	2. 66
	2009-11—2010-02	56. 0	0. 02	0. 16	0. 29	0. 24	0. 79	0. 56	4. 34	3. 00	2. 14
	多年平均	47. 2	0. 01	0. 19	0. 12	0. 35	0. 97	0. 58	6. 45	5. 27	4. 62
砂卵砾石	1999-11—2000-02	82. 0	0. 00	0. 23	0. 13	0. 27	0. 61	0. 90	13. 02	9. 45	6. 68
	2000-11—2001-02	51. 2	0. 01	0. 21	0. 01	0. 28	0. 38	0. 19	11. 28	5. 90	13. 42
	2001-11—2002-02	36. 4	0. 00	0. 14	0. 23	0. 41	0. 27	0. 39	8. 03	11. 03	2. 97
	2002-11—2003-02	42. 7	0. 01	0. 17	0. 10	0. 39	1. 26	0. 46	7. 44	4. 92	12. 14
	2003-11—2004-02	55. 0	0. 00	0. 19	0. 04	0. 38	0. 10	0. 37	8. 47	6. 34	5. 35
	2004-11—2005-02	46. 4	0. 02	0. 13	0. 05	0. 15	0. 03	0. 27	7. 00	13. 59	3. 79
	2005-11—2006-02	66. 4	0. 00	0. 16	0. 01	0. 33	0. 49	0. 37	12. 41	12. 90	6. 31
	2006-11—2007-02	39. 0	0. 00	0. 09	0. 17	0. 30	0. 31	0. 42	5. 91	8. 01	8. 29
	2007-11—2008-02	31. 9	0. 00	0. 04	0. 16	0. 41	1. 02	0. 34	2. 68	3. 68	6. 03
	2008-11—2009-02	29. 9	0. 00	0. 02	0. 25	0. 50	0. 47	0. 25	2. 51	3. 45	2. 14
	2009-11—2010-02	56. 0	0. 02	0. 08	0. 30	0. 44	1. 11	0. 41	6. 09	1. 73	2. 32
	多年平均	47. 2	0. 00	0. 13	0. 13	0. 36	0. 53	0. 36	7. 70	7. 30	5. 99
轻黏土	1999-11—2000-02	82. 0	0. 01	0. 03	0. 21	0. 49	4. 42	7. 95	5. 06	3. 29	8. 85
	2000-11—2001-02	51. 2	0. 02	0. 14	0. 11	0. 31	3. 65	5. 31	6. 59	2. 05	5. 36
	2001-11—2002-02	36. 4	0. 00	0. 26	0. 25	0. 42	2. 22	6. 17	8. 49	4. 92	7. 30
	2002-11—2003-02	42. 7	0. 01	0. 02	0. 29	0. 40	1. 77	4. 01	1. 77	1. 71	3. 92
	2003-11—2004-02	55. 0	0. 01	0. 09	0. 28	0. 23	3. 57	5. 17	2. 17	2. 20	5. 07
	2004-11—2005-02	46. 4	0. 00	0. 21	0. 14	0. 28	1. 89	2. 66	2. 21	4. 04	4. 28
	2005-11—2006-02	66. 4	0. 00	0. 24	0. 16	0. 45	3. 90	4. 98	4. 78	6. 56	6. 12
	2006-11—2007-02	39. 0	0. 05	0. 28	0. 13	0. 26	3. 17	3. 67	3. 94	1. 74	3. 59
	2007-11—2008-02	31. 9	0. 01	0. 23	0. 58	0. 34	4. 05	5. 56	4. 45	1. 00	2. 94
	2008-11—2009-02	29. 9	0. 02	0. 22	0. 30	0. 55	2. 55	2. 67	1. 28	4. 05	2. 91
	2009-11—2010-02	56. 0	0. 01	0. 11	0. 16	0. 41	3. 66	3. 57	2. 59	2. 77	2. 06
	多年平均	47. 2	0. 01	0. 17	0. 21	0. 37	3. 18	4. 57	3. 73	2. 97	4. 61

表 3 冻结期多年平均降水入渗补给量占多年平均
年降水入渗补给量的比例

Table 3 Percentage of the average replenishment of
infiltration from precipitation during the freezing period
to the average annual replenishment of infiltration
from precipitation /%

岩性	潜水位埋深/m									
	0. 10	0. 50	1. 00	2. 00	3. 00	4. 00	5. 00	6. 00	7. 00	
细砂	0. 03	0. 20	0. 20	0. 88	2. 25	6. 46	54. 84	34. 32	44. 32	
砂卵砾石	0. 02	0. 23	0. 27	0. 75	1. 20	1. 09	24. 23	26. 72	45. 61	
轻黏土	0. 03	0. 77	1. 33	2. 67	23. 95	33. 33	38. 55	33. 01	64. 95	

2. 4 冻融期降水入渗规律分析

1999—2000 年和 2008—2009 年冻结、冻融期降雪量分别为 1999—2010 年冻结、冻融期降雪量的最大值和最小值。选取昌吉试验场 1999—2000 年、2008—2009 年数据分析冻土和积雪的发育与消失过程,由图 6 可见降雪量不影响冻融期积雪和冻土的消融时间,冻土和积雪的形成是一个缓慢的过程,起初厚度有起伏,总的趋势是逐渐增厚然后保持稳定。但其融化过程是一个迅速的过程,融化时间远小于发育时间,1999—2000 年积雪和冻土融化过程仅用了 14 d,

2008—2009 年融化过程仅用了 16 d。伴随积雪和冻土的消融过程冻结层下界面也开始融通,受到冻土、积雪的形成与消融和冻结层下界面积聚的一部分水量的影响,冻融期地下水补给的下垫面条件与冻结期和非冻结期的差异很大。

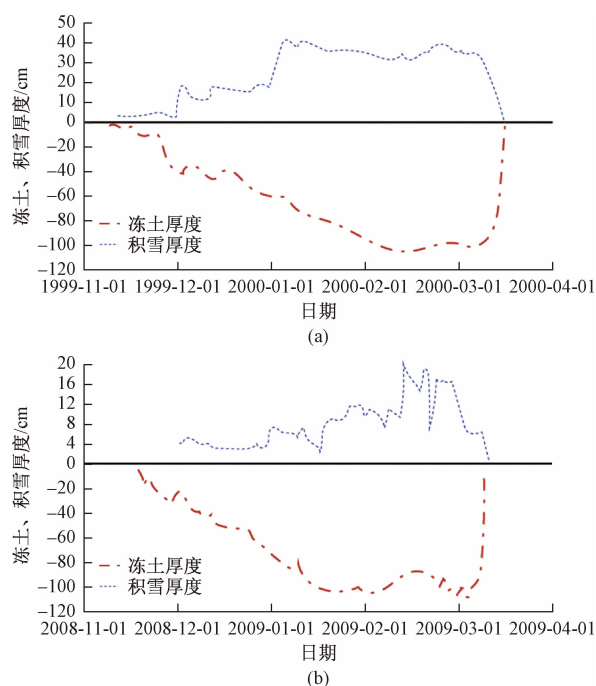


图 6 冻土层和积雪厚度变化过程

Fig. 6 Freezing and thawing processes of the frozen soil layer and accumulated snow

1999—2010 年冻融期不同土质多年平均降水入渗补给量随埋深变化过程线见图 7。冻融期降水入渗补给量随潜水平埋深增大到一个峰值,继而急剧下降,该峰值埋深可认为是 3 种土质冻融期降水入渗补给地下

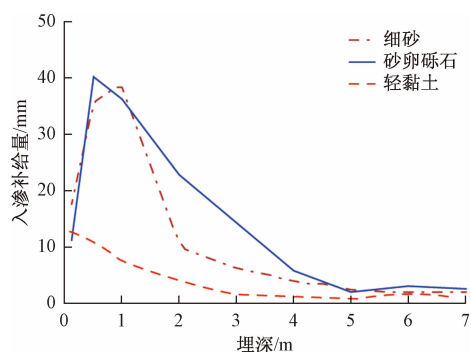


图 7 1999—2010 年冻融期(3 月)不同岩性多年平均降水入渗补给量随埋深变化过程线

Fig. 7 Changes in the annual average replenishment of infiltration from precipitation with depth in different soils during the thawing period from 1999 to 2010

水的最佳潜水平埋深。细砂、砂卵砾石和轻黏土冻融期最佳潜水平埋深分别为 1.0, 0.5, 0.1 m。由冻融期多年平均降水入渗补给量占多年平均年降水入渗补给量的比例(表 4)可看出,潜水平埋深较浅时,细砂、砂卵砾石和轻黏土在潜水平埋深为 1.0, 1.0, 0.5 m 时的冻融期多年平均降水入渗补给量分别占多年平均年降水入渗补给量的 64.49%、77.32% 和 50.82%, 结果表明西北内陆盆地冻融期是浅埋型地下水降水入渗补给的重要时期^[23]。

表 4 冻融期多年平均降水入渗补给量占多年平均年降水入渗补给量的比例

Table 4 Percentage of the average replenishment of infiltration from precipitation during the thawing period to the average annual replenishment of infiltration from precipitation / %

岩性	潜水平埋深/m								
	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
细砂	37.55	37.08	64.49	25.76	14.65	45.45	20.88	12.92	19.74
砂卵砾石	42.12	69.14	77.32	47.66	31.44	17.25	6.31	10.72	19.36
轻黏土	36.73	50.82	45.60	30.86	11.06	8.53	10.61	18.65	26.62

3 结论

(1) 西北内陆盆地非冻结期为 4—10 月,冻结期为 11—翌年 2 月,冻融期为 3 月。表层土壤受气象要素影响显著,其地温波动幅度和相关气象要素波动幅度一致,冻融期土壤表现为昼融夜冻特征。

(2) 非冻结期降水量和降水入渗补给量有显著的线性关系,该时期获得的降水入渗补给量随着降水量的增大呈增加趋势。非冻结期地下水位埋深相同时,岩性越粗,包气带水分亏缺量越小,越有利于降水入渗补给。在非冻结期潜水平埋深较浅时 3 种岩性地层都存在一个峰值埋深,当潜水平埋深小于该峰值埋深时,降水入渗补给量随埋深的增大而增大;当潜水平埋深大于该峰值埋深时,降雨入渗补给量随埋深的增大而减小并逐渐趋于平稳。砂卵砾石、细砂和轻黏土非冻结期最佳潜水平埋深分别为 0.5, 0.5, 0.1 m。

(3) 和非冻结期降水入渗规律不同,冻结期潜水平埋深较大时,包气带残余含水量高,土壤入渗能力强,有利于深埋型地下水补给,冻结期是深埋型地下水降水入渗补给的重要时期。

(4) 冻融期降水入渗补给量随潜水平埋深增大到一个峰值,继而急剧下降,该峰值埋深可认为是 3 种岩性冻融期降水入渗补给地下水的最佳潜水平埋深。细砂、

砂卵砾石和轻黏土冻融期最佳潜水埋深分别为 1.0, 0.5, 0.1 m。冻融期是浅埋型地下水降水入渗补给的重要时期。

参考文献 (References):

- [1] 申豪勇,梁永平,徐永新,等. 中国北方岩溶地下水补给研究进展[J]. 水文, 2019, 39(3): 15-21. [SHEN H Y, LIANG Y P, XU Y X, et al. Research progress of karst groundwater recharge in Northern China[J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39(3): 15-21. (in Chinese)]
- [2] 卢选伟. 降水入渗补给系数分析研究[J]. 地下水, 2006, 28(1): 33-35. [LU X W. Analysis and study on recharge coefficient of precipitation infiltration[J]. Ground Water, 2006, 28(1): 33-35. (in Chinese)]
- [3] 王焕榜,贺伟程. 平原地区降雨入渗补给系数计算方法的初步探讨[J]. 水文, 1981, 1(6): 1-4. [WANG H B, HE W C. Preliminary discussion on calculation method of precipitation recharge coefficient in plain area[J]. Journal of China Hydrology, 1981, 1(6): 1-4. (in Chinese)]
- [4] JYRKAMA M I, SYKES J F. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario) [J]. Journal of Hydrology, 2007, 338(3/4): 237-250.
- [5] DRIPPSW R, BRADBURY K R. The spatial and temporal variability of groundwater recharge in a forested basin in northern Wisconsin[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(4): 383-392.
- [6] 刘泓志,肖长来,张岩祥,等. 基于地统计学的降水入渗补给系数的空间变异特征分析[J]. 节水灌溉, 2014(6): 54-56. [LIU H Z, XIAO C L, ZHANG Y X, et al. Spatial variation characteristics analysis of precipitation infiltration recharge coefficient based on geostatistics. [J]. Water Saving Irrigation, 2014(6): 54-56. (in Chinese)]
- [7] 曹颖,郭兆成,王强强,等. 基于遥感技术的降水入渗补给条件空间分异性研究[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 91-95. [CAO Y, GUO Z C, WANG Q Q, et al. Research on spatial differentiation of precipitation infiltration recharge condition based on remote sensing technology [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(3): 91-95. (in Chinese)]
- [8] 张施跃,束龙仓,闵星,等. 基于土地利用类型的大气降水入渗补给量计算[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(3): 860-867. [ZHANG S Y, SHU L C, MIN X, et al. Calculation of precipitation infiltration recharge based on land-use type [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(3): 860-867. (in Chinese)]
- [9] 郝鸿峰,程婷婷,洪沛东,等. 季节性冻土区融雪入渗对地下水的补给作用分析[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 23-29. [XI H F, CHENG T T, HONG P D, et al. Analysis on recharging effect from snowmelt infiltration on groundwater within seasonal frozen-soil region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(2): 23-29. (in Chinese)]
- [10] ZHANG J, WANG W K, WANG X Y, et al. Seasonal variation in the precipitation recharge coefficient for the Ordos Plateau, Northwest China [J]. Hydrogeology Journal, 2019, 27: 801-813.
- [11] JASECHKO S, BIRKS, S J, GLEESON T, et al. The pronounced seasonality of global groundwater recharge [J]. Water Resources Research, 2014, 50(11): 8845-8867.
- [12] 湛天德,陈旭光,王文科,等. 准噶尔盆地地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2009. [SHEN T D, CHEN X G, WANG W K, et al. Investigation and assessment of groundwater resources and its environmental issues in the Junggar Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [13] 王彩华. 新疆维吾尔自治区环境地质图集[R]. 昌吉:新疆金版印务有限公司, 2005. [WANG C H. Atlas of environmental geology of Xinjianguygur autonomous region [R]. Changji: Xinjiang Jinban Printing Company, 2005. (in Chinese)]
- [14] 王磊,何江涛,张振国,等. 基于信息筛选和拉依达准则识别地下水主要组分水化学异常的方法研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(3): 919-929. [WANG L, HE J T, ZHANG Z G, et al. Research on the method to identify the outliers of the main components of groundwater based on the information screening coupled with Pauta criterion [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 919-929. (in Chinese)]
- [15] 任景全,王冬妮,刘玉汐,等. 吉林省土壤冻融的逐日变化及与气温、地温的关系[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 324-333. [REN J Q, WANG D N, LIU Y X, et al. Daily variation of soil freezing-thawing and its relationship with air and soil temperature in Jilin Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,

- 2019,41(2):324-333. (in Chinese)]
- [16] 胡国杰,赵林,李韧,等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融期间水热运移特征分析[J]. 土壤,2014,46(2):355-360. [HU G J, ZHAO L, LI R, et al. Characteristics of hydro-thermal transfer during freezing and thawing period in permafrost regions[J]. Soils,2014,46(2):355-360. (in Chinese)]
- [17] 苗春燕,陈军锋,郑秀清. 冻融期气温与土壤冻融过程的关系研究[J]. 太原理工大学学报,2018,49(3):412-417. [MIAO C Y, CHEN J F, ZHENG X Q. Relationship between air temperatures and soil freezing-thawing process [J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2018,49(3):412-417. (in Chinese)]
- [18] 李金柱. 降水入渗补给系数综合分析[J]. 水文地质工程地质,2009,36(2):29-33. [LI J Z. An analysis of the coefficient of replenishment from infiltration of precipitation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36 (2): 29 - 33. (in Chinese)]
- [19] 郭会荣,靳孟贵,齐登红,等. 基于地中渗透仪的入渗补给方式分析[J]. 水文地质工程地质,2007,34(4):107-115. [GUO H R, JIN M G, QI D H, et al. Characterization of groundwater recharge processes based on large lysimeters[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,34(4):107-111. (in Chinese)]
- [20] 霍思远,靳孟贵. 不同降水及灌溉条件下的地下水入渗补给规律[J]. 水文地质工程地质,2015,42(5):6-13. [HUO S Y, JIN M G. Effects of precipitation and irrigation on vertical groundwater recharge[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(5):6-13. (in Chinese)]
- [21] 范琦,王骥,蔺文静,等. 包气带增厚条件下地下水补给规律研究[J]. 水文地质工程地质,2006,33(3):21-24. [FAN Q, WANG J, LIN W J, et al. The groundwater recharge rule study in the condition of aeration zone incassation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33 (3): 21 - 24. (in Chinese)]
- [22] 周金龙,董新光,王斌. 新疆平原区降水入渗补给地下水研究[J]. 西北水资源与水工程,2002,13(4):10-14. [ZHOU J L, DONG X G, WANG B. Research on precipitation recharge of phreatic water in Xinjiang plain area[J]. Northwest Water Resources & Water Engineering, 2002, 13 (4): 10 - 14. (in Chinese)]
- [23] 周旻,靳孟贵,魏秀琴,等. 利用地中渗透仪观测资料进行降雨入渗补给规律分析[J]. 地质科技情报,2002,21(1):37-40. [ZHOU M, JIN M G, WEI X Q, et al. Analysis of precipitation recharge using observed data of lysimeter[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21 (1): 37 - 40. (in Chinese)]
- [24] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等. 冻结期和冻融期土壤水分运移特征分析[J]. 水科学进展,2002,13(3):298-302. [GUO Z R, JING E C, NIE Z L, et al. Analysis on the characteristics of soil moisture transfer during freezing and thawing period [J]. Advances in Water Science,2002,13(3):298-302. (in Chinese)]
- [25] 何志萍. 冻融土壤水分入渗规律的试验研究[D]. 太原:太原理工大学,2003. [HE Z P. Experimental Study on the law of water infiltration into freeze-thaw soils[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2003. (in Chinese)]
- [26] 郑和祥,李和平,郭克贞,等. 河套灌区冬小麦冻结期土壤入渗特性分析[J]. 农业工程学报,2014,30(4):70-78. [ZHENG H X, LI H P, GUO K Z, et al. Soil infiltration characteristics of winter wheat field during freezing in Hetao irrigation district [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(4):70-78. (in Chinese)]

编辑:张若琳