

黑土区不同水分处理对大豆田土壤含水量动态变化的影响

杨春葆¹, 邹文秀², 江 恒^{2,3}, 韩晓增², 郝翔翔², 李 猛²

(1. 东北农业大学 资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所/黑土区农业生态国家重点实验室/海伦农田生态系统国家野外观测研究站, 黑龙江 哈尔滨 150081; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要:基于中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测试验站内控水试验场的定位试验,研究了不同土壤进水量(降水和灌溉水之和)对剖面土壤水分运移的影响。结果表明:过量水分(I1)、适宜水分(I2)、干旱(I3)和自然降水(R)影响土壤剖面的深度为0~130 cm;I1处理试验期间土壤累计进水量为514 mm,土壤水分入渗的最大深度为110 cm。I3处理0~90 cm土层土壤储水量较其他处理平均减少了38 mm,说明黑土处于干旱状态时0~90 cm土层内土壤水分均能供给大豆生长需要。受土壤进水量的影响I1和R,I2和I3处理0~150 cm土层土壤储水量的季节性变化分别表现出相似的趋势。因此,水分进入土壤的频率和量是影响剖面土壤水分变异的主要因子,当土壤发生干旱时能加深土壤水分的循环深度;同时黑土具有强大的水分调节能力,对于调节季节性干旱具有重要作用。

关键词:土壤进水量;变异系数;土壤储水量;土壤水分调节

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2014)01-0073-06

Effect of Water Treatments on Soil Water Dynamics in Soybean Field of Mollisols Area in Northeast China

YANG Chun-bao¹, ZOU Wen-xiu², JIANG Heng^{2,3}, HAN Xiao-zeng², HAO Xiang-xiang², LI Meng²

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, National Observation Station of Hailun Agroecology System, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Black soil had strong water capacity. The impact of different water entry amount (precipitation + irrigation) including excessive water (I1), suitable water (I2), drought (I3) and rainfed (R) treatments on the migration of soil water in soil profile was conducted based on controlled water treatment located in Hailun Agricultural Ecology Station of Chinese Academy of Sciences. The soil profile impacted by different water entry amount was as deep as 130 cm. For I1 treatment, the water infiltrated depth was 110 cm and the accumulated water entry was as high as 514 mm during soybean growing season. Compared with other treatments, soil water storage in 0-90 cm soil layer reduced 38 mm in I3, suggesting soil water stored in 0-90 cm soil layer could be utilized by soybean under drought stress. The similar temporal variation of soil water storage in 0-150 cm soil layer was observed in R and I1, I2 and I3, respectively. Therefore, the variation of soil water in soil profile was affected by the frequency and amount of water entry, water cycle depth increased when soil was in drought status. It also suggested that black soil has strong soil water regulation capacity, which was very important for the occurrence of seasonal drought.

Key words: Soil water entry; Variation coefficient; Soil water storage; Soil water regulation

东北黑土区属“雨养农业区”,大气降水是土壤水分的主要来源^[1-2]。地下水位深度在10 m以下,不参与上层水分运移,导致黑土区土壤水分循环方式以降水入渗和土壤水分上行蒸发为主^[3-4]。土壤-植物-大气连续体中,在降水、灌溉、土壤蒸发和植物蒸腾利用等因素的共同作用下,土壤水分在剖面上的分布表现出层次性变化^[5]。外界条件对土壤剖面水分的影响,随土层深度的增加而减弱^[6]。根据韩晓增等^[1]对中国科学院海伦农业生态试验站近50年降水量的统计分析,海伦地区丰、平和枯水分年各占1/3,因此年际间降水存在较大变异。然而

在降水总量充足的情况下,由于降水年内分布不均导致该地区出现季节性干旱,进而影响作物产量^[7]。在灌溉制度中补充灌溉能够缓解季节性干旱对作物影响的研究已经受到了关注^[8-9]。有研究表明在季节性干旱经常发生的地区,在作物生长的关键时期进行补充灌溉能够明显增加作物的产量^[10-11]。然而关于不同土壤进水量对剖面土壤水分运移的影响鲜有报道。

邹文秀等报道了东北黑土区不同降水年型对土壤水分运移的影响^[12],但该研究是在不同年份进行的,没有考虑不同年际间气象因素(降水除外)和

收稿日期:2013-07-02

基金项目:中国科学院黑土区农业生态重点实验室开放基金;国家自然科学基金(41101208);国家重点基础研究发展计划“973计划”(2011CB100506)。

第一作者简介:杨春葆(1986-),男,硕士,主要从事农田土壤水分研究。E-mail:zouwenxiu@hotmail.com。

通讯作者:韩晓增(1957-),男,研究员,主要从事土壤生态方面的研究。E-mail:xzhan@neigae.hrb.ac.cn。

作物因素的影响。本研究通过水分控制装置在作物生长季内模拟不同降水量,在保证气象条件和作物一致的条件下研究了不同进水时间和进水量对土壤水分在时间和空间上分布变化的影响,以期在黑土区土壤水分调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院海伦农田生态系统国家野外科学观测研究站内的水分观测场内进行,海伦站地处黑土区中部,地势平坦,属于温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同季,

年平均气温 1.5℃,极端最高温度为 37℃,极端最低温度为 -39.5℃,年降水量 500~600 mm,主要集中在 7~9 月份,年均有效积温 2 450℃,年均日照时数 2 600~2 800 h,无霜期 125 d。土壤类型为中厚层黑土,是在第四纪形成的黄土状母质上发育起来的地带性土壤,质地以粘性土为主,土壤物理性粘粒大于 60%,土壤固相比大于 50%,土壤膨胀性大于 25%,土体结构致密,渗透能力弱,毛管水运移速率较慢,土壤持水能力和保水能力较强,储水库容较大。地下水埋深 20~30 m。剖面土壤的物理性质见表 1。

表 1 海伦站土壤的物理性质

Table 1 The soil hydro-physical properties in Hailun station

土层深度 Soil depth /cm	容重 Bulk density /g·cm ⁻³	田间持水量 Field capacity /%	饱和含水量 Saturated capacity /%	总孔隙度 Total porosity /%	渗透速率 Infiltration rate/m·d ⁻¹	凋萎系数 Wilting coefficient/%
0~29	1.08	38.64	56.39	53.65	0.08	12.72
29~60	1.24	30.58	46.74	49.18	0.06	11.82
60~83	1.29	28.58	43.31	49.21	0.06	11.15
83~100	1.32	28.17	40.60	48.33	0.16	11.71

1.2 试验设计

控水试验开始于 2011 年,设置 4 个处理,分别是自然降水(R)、过量水分(I1)、适宜水分(I2)和干旱处理(I3),每处理 4 次重复,随机排列。小区面积 52 m²,小区的四周用钢筋混凝土浇筑深至 2.0 m,防止在灌溉过程中发生侧渗现象。每个小区的中央埋入深度为 1.7 m 的中子管。试验中的 3 个控水处理采用防雨棚遮挡降水。大豆控水时期为 6 月 29 日~9 月 9 日,期间每隔 2 d 使用中子仪观测土壤含水量,进而确定灌溉时间,在 5 月 1 日~9 月 30 日非灌溉时间每隔 5 d 用中子仪测定土壤含水量。灌溉标准为分别保持 I1、I2 和 I3 的土壤含水量为田间持水量的 80%~90%、60%~70% 和 40%~50%。作物生育期内土壤进水量为降水量和灌水量之和。土壤储水量采用式(1)计算:

$$W = \sum (\Delta\theta_2 \times Z_i) \quad (1)$$

式中 W 为土壤储水量(mm), $\Delta\theta_2$ 为土壤某一层体积含水量(%), Z_i 为土壤层次厚度, i 为土壤层次。

土壤含水量变异系数和标准差分别采用式(2)和式(3)计算:

$$Cv_{ij} = \frac{S}{SM_{ij}} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N_y - 1} \sum_{k=1}^{N_y} (SM_{ijmk} - SM_{ij})^2} \quad (3)$$

其中, Cv_{ij} 是土壤含水量变异系数, S_{ij} 是土壤含水量标准差。

2012 年种植的作物为大豆,品种为黑农 50。5 月 5 日播种,9 月 28 日收获。

1.3 数据处理

采用 SPSS 13.0 进行单因素方差分析,采用 Sigmaplot 10.0 和 Excel 2007 作图。

2 结果与讨论

2.1 进水量分布

大豆生育期内 I1、I2 和 I3 处理的土壤进水量(控水前、后降水量与灌溉水量之和)分别为 514、352 和 243 mm,自然降水量为 502 mm。试验区域内作物生育期多年降水量平均值为 474 mm,与之相比,I1 处理高出 8.5%,I2 处理下降 25.7%,I3 处理下降 48.6%。5 月 1 日~6 月 29 日(自然降水阶段)的降水量为 131 mm,主要集中在 6 月 5~11 日(图 1)。自控水试验开始,3 个控水处理的灌水量相对均匀地分布在作物生长的各阶段,而自然降水则在作物生育期内分布不均,其中在 5 月 25 日~6 月 16 日和 7 月 19 日~8 月 8 日 2 个时间段,降水量

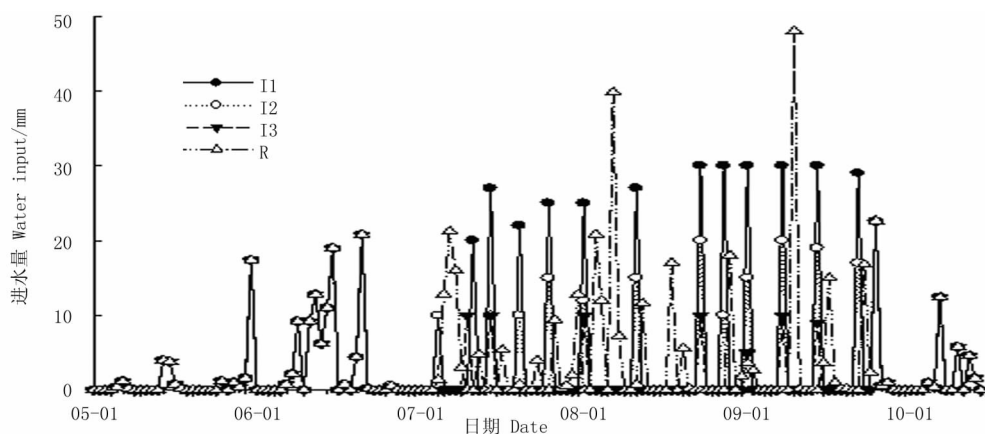


图1 试验期间土壤进水时间分布

Fig.1 The distribution of water entry during experimental period

之和达到 251 mm,相当于作物生育期总降水量的 50%,其他时段降水偏少。

2.2 土壤剖面含水量

由图 2 可知,各处理土壤剖面含水量在不同的测定时间均随着剖面深度的增加而增加。5 月 10 日作物播种时不同控水处理间剖面土壤含水量差异较大($P < 0.05$),主要集中在 0~130 cm。其中 I3 处理土壤含水量最低,平均比 I1、I2 和 R 处理减少 15%、7% 和 13%,其主要原因是 2011 年进行灌溉试验导致不同处理之间剖面含水量的差异。5 月 10 日~6 月 28 日进入土壤中的水分以自然降水为主,水分散失以土壤蒸发为主^[13]。由于大气降水入渗和土壤剖面融冻过程中的水力提升导致不同处理

间 40 cm 以下土壤含水量差异较小^[14]。6 月 28 日后由于灌溉导致各处理间剖面土壤含水量的差异较大,至控水结束(9 月 9 日)差异达最大值。从土壤剖面土壤含水量变化来分析,灌溉水或者是大气降水进入土壤后再分布的过程有一定的滞后性,在 7 月 19 日不同处理间土壤含水量的差异主要集中在 0~70 cm,而到了 9 月 13 日,不同处理间的差异已经增至 110 cm 土层。试验期间单次最大灌溉量为 35 mm,对于 I1 处理来说累计灌溉量为 335 mm,从 9 月 9 日土壤剖面含水量分布可以看出不同处理间 110 cm 以下土壤含水量基本没有差异,说明在目前的灌溉量的条件下水分不会渗漏到 110 cm 以下。

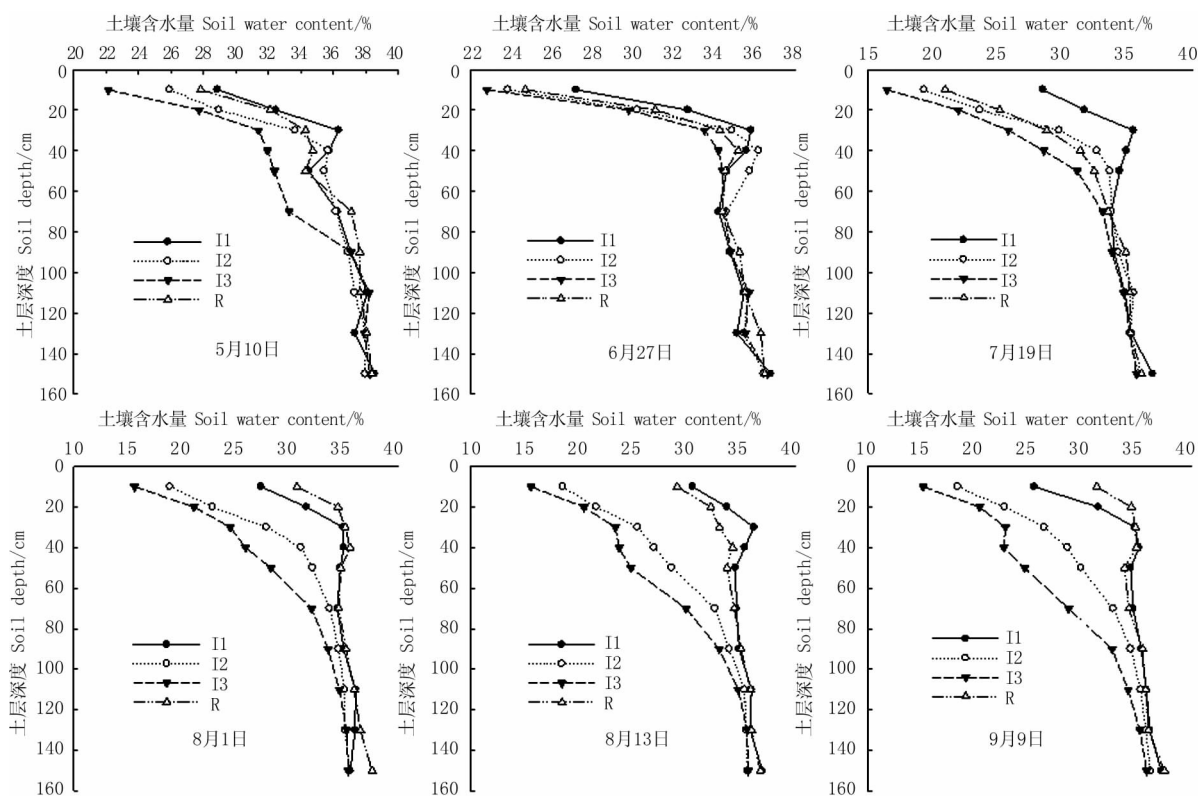


图2 不同控水处理对剖面土壤含水量的影响

Fig.2 The effect of controlled water treatments on soil water content in soil profile

不同控水处理土壤剖面含水量的标准差和变异系数均随着土壤剖面深度的增加而减小(图3), 归因于土层越深, 土壤水分受到降水/灌溉水和作物根系的影响越小, 土壤含水量变异越小。不同处理间土壤剖面含水量的变异基本表现为 $I3 > R > I2 > I1$, 这主要受到了灌溉/降水量与频率的影响^[15]。前人根据标准差和变异系数将剖面土壤水分的垂直变化划分为速变层、活跃层、次活跃层和相对稳

定层4个层次^[6]。本研究将其划分为2个层次: I1 处理0~150 cm 均为相对稳定层; I2 处理0~40 cm 为次活跃层, 50~150 cm 为相对稳定层; I3 处理增加了土壤水分次活跃层的深度(0~50 cm), 70~150 cm 为相对稳定层; R 处理0~20 cm 为次活跃层, 30~150 cm 为相对稳定层; 各处理均未出现速变层和活跃层(表2)。

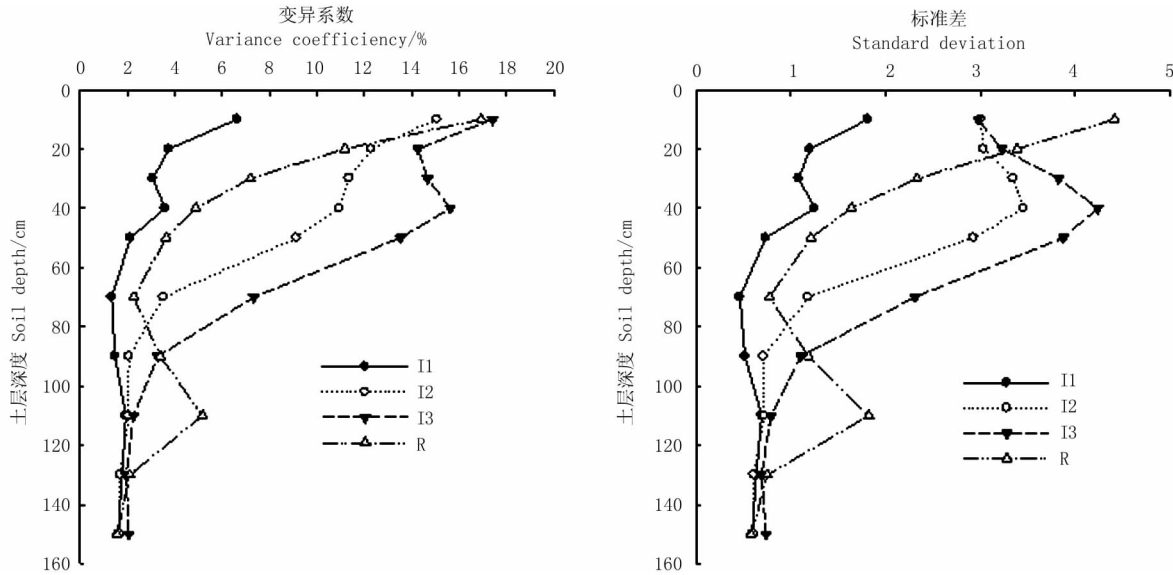


图3 不同控水处理对剖面土壤含水量标准差和变异系数的影响

Fig.3 The effect of controlled water treatments on standard difference and variance coefficient

表2 土壤水分活动层次划分

Table 2 Soil water variation at different soil depths

处理 Treatment	深度 Depth/cm	标准差 Standard deviation/%	变异系数 Variation coefficient/%	层次划分 Layer division
I1	0~150	0.46~1.81	1.34~6.64	相对稳定层 Relative stable layer
I2	0~40	3.00~3.46	10.96~15.08	次活跃层 Second active layer
	40~150	0.61~3.46	1.70~10.96	相对稳定层 Relative stable layer
I3	0~50	2.98~4.24	13.53~17.41	次活跃层 Second active layer
	50~150	0.69~2.98	1.95~13.53	相对稳定层 Relative stable layer
R	0~20	3.39~4.41	11.18~16.93	次活跃层 Second active layer
	20~150	0.58~3.39	1.58~11.18	相对稳定层 Relative stable layer

2.3 土壤水分季节变化

2.3.1 0~150 cm 土壤储水量动态变化 图4 显示了大豆生育期内各水分处理0~150 cm 土层内土壤储水量的变化。在5月10日~7月19日各处理土壤储水量均呈下降趋势。这一时间段内大豆生长较慢, 地表裸露面积较大, 加之气温持续升高, 地表蒸发量大, 随着大豆的生长其耗水量也逐渐增加, 导致土壤水分被大量消耗。6月29日控水开始, 但是土壤进水量不足以弥补水分消耗。7月19日至大豆生育期结束, I1 与 R 处理, I2 与 I3 处理土壤储水量变化分别表现出相近的趋势。7月19日~8月13日, I1 与 R 处理进水频繁且总量较大, 使得土壤水储量在作物耗水剧烈的生长旺季表现为盈余。8月13日~9月9日, 降水减少, 灌水频率下降,

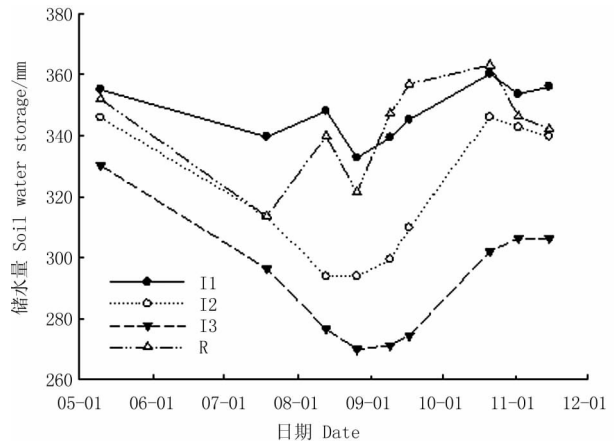


图4 0~150 cm 土层土壤储水量的季节性变化

Fig.4 The temporal variation of soil water storage in 0-150 cm soil profile

I1 与 R 处理土壤水储量又有所下降;随后控水结束,所有试验进入自然降水条件下,由于在大豆生育末期降水较大(图 1),导致后期土壤含水量有所增加。I2 和 I3 处理由于土壤进水量减少,导致 0~150 cm 土层土壤水储量在 7 月 19 日~9 月 9 日持续下降。控水试验结束后,作物生育期接近尾声,耗水量减少,再加上降水较多,使得 I2 和 I3 处理 0~150 cm 土层土壤水储量开始恢复,至 10 月末趋于稳定。

2.3.2 不同土层土壤储水量动态变化 如图 5 所示,控水开始之前(5 月 10 日~6 月 29 日)各处理不同土层土壤储水量不一致,但是表现出相同的变化趋势。5 月 10~24 日,各处理在 0~20 cm、20~50 cm 和 90~150 cm 土层土壤储水量增加,而在 50~90 cm 土层则表现为减少,这主要归因于该时期发生的土壤冻层融化过程^[14],说明 50~90 cm 土层水分上行补充上层水分消耗。5 月 24 日~6 月 17 日,

在 0~20 cm、20~50 cm、50~90 cm 土层深度土壤储水量都有所增加,而 90~150 cm 土层的水分补充到上层,引起该层储水量大幅下降。控水开始后(6 月 19 日~9 月 18 日),各处理不同深度储水量变化情况出现明显差异。I1 处理由于进水量大且较为均匀,足以抵消水分消耗,所以各层次的储水量变化曲线走势相对平缓。I2 与 I3 处理进水时间与 I1 处理相同但进水量少,因此两处理在 0~20 cm、20~50 cm 深度土壤水分急剧减少,尤其是 I3 处理在 50~90 cm 储水量减少仍十分剧烈,说明当土壤处于干旱状态时,黑土的供水深度可达到剖面 90 cm。R 处理由于不均匀的降水,导致表层(0~20 cm)土壤储水量出现大幅波动,随着土层深度的增加变化幅度逐渐减小。因此,不同水分处理对上层土壤储水量的变化有较大影响,这种影响随土层深度的增加而减弱。

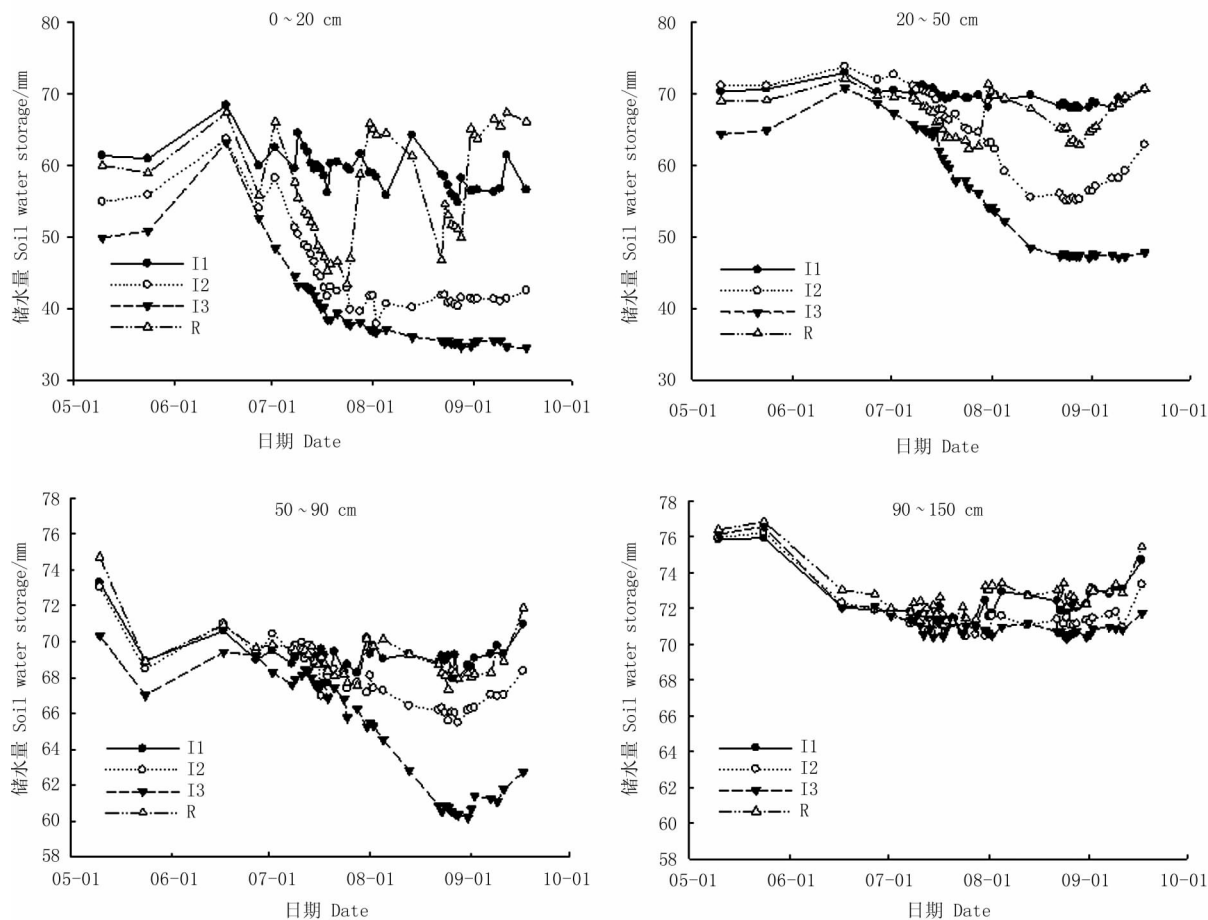


图 5 不同土层土壤储水量的季节性变化

Fig. 5 Temporal variation of soil water storage in different soil layers

3 结论

黑土剖面土壤含水量受到上一季剖面土壤水分状况和冻融过程的影响。当土壤进水量过量时,

即作物生长季内累计土壤进水量为 514 mm 时,土壤水分入渗的深度为 110 cm,并将剩余的水分保存在该土层,说明 110 cm 以上的土层具有很强持水能力;而土壤进水量严重缺乏时,0~130 cm 土层土壤

含水量均表现为减少,用以满足大豆生长发育对水分的需求。土壤储水量主要受水分进入土壤的时间和频率影响,当进入土壤中的水分缺乏时,供给大豆生长需要的水分主要来自 0~90 cm 土层。因此,黑土具有强大的水分调节能力,对于缓解季节性干旱具有重要的作用。

参考文献

- [1] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等. 海伦地区黑土农田土壤水分动态平衡特征研究[J]. 农业系统科学与综合研究,2003,19(4): 252-255. (Han X Z, Wang S Y, Song C Y, et al. Research of feature of the dynamic balance on the soil moisture in farmland of black soil in Hailun district[J]. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture,2003,19(4):252-255.)
- [2] 孟凯,张兴义,隋跃宇,等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. 土壤通报,2003,34(1):11-14. (Meng K, Zhang X Y, Sui Y Y, et al. Black soil water characteristic in Hailun, Heilongjiang[J]. Chinese Journal of Soil Science,2003,34(1):11-14.)
- [3] 陈宝群,赵景波. 黄土高原土壤水分环境评价初步研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(5):184-189. (Chen B Q, Zhao J B. Soil moisture environmental assessment in Loess Plateau[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,24(5):184-189.)
- [4] 杨新民. 黄土高原灌木林地水分环境特性研究[J]. 干旱区研究,2001,18(1):8-13. (Yang X M. Study on the characteristics of water environmental in shrubbery land of Loess Plateau[J]. Arid Zone Research,2001,18(1):8-13.)
- [5] 李笑吟,毕华兴,李俊,等. 晋西黄土区土壤剖面水分动态研究[J]. 中国水土保持科学,2006,4(4):72-77. (Li X Y, Bi H X, Li J, et al. Dynamics of moisture of soil profile in Loess area of western Shanxi[J]. Science of Soil and Water Conservation,2006,4(4):72-77.)
- [6] 李洪建,王孟本,柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. 应用生态学报,2003,14(4):515-519. (Li H J, Wang M B, Chai B F. Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(4):515-519.)
- [7] 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):196-202. (Zou W X, Han X Z, Jiang H, et al. Characteristics of precipitation in black soil region and response of soil moisture dynamics in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2011,27(9):196-202.)
- [8] Ekren S, Sönmez Ç, Özçakal E, et al. The effect of different irrigation water levels on yield and quality characteristics of purple basil [J]. Agricultural Water Management,2012,109:155-161.
- [9] Daniel W, Georg V. Effect on a single irrigation at different reproductive growth stages on soybean planted in early July and late June[J]. Irrigation Sciences,2002,21:69-73.
- [10] Korte L L, Specht J E, Williams J H, et al. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. II. Yield component responses[J]. Crop Science,1983,23:528-533.
- [11] Korte L L, Williams J H, Specht J E, et al. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny. I. Agronomic responses [J]. Crop Science,1983,23:521-527.
- [12] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等. 降水年型对黑土区土壤水分动态变化的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(5):138-142. (Zou W X, Han X Z, Wang S Y, et al. Impact of different yearly rainfall patterns on dynamic changes of soil moisture in black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(5):138-142.)
- [13] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等. 长期施肥对大豆地土壤蒸发和水分利用效率的影响[J]. 大豆科学,2009,28(3):487-490,494. (Zou W X, Han X Z, Wang S Y, et al. Effect of long-term fertilization on soil evaporation and water use efficiency in soybean field [J]. Soybean Science,2009,28(3):487-490,494.)
- [14] 王凤,乔云发,韩晓增,等. 冻融过程黑土 2m 土体固液态水分含量动态特征[J]. 水科学进展,2008,19(3):361-366. (Wang F, Qiao Y F, Han X Z, et al. Study on the dynamic characteristics of solid and liquid water in the process of freezing-thawing in black soil[J]. Advances in Water Science,2008,19(3):361-366.)
- [15] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等. 不同水分处理下农田黑土水分特征[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(3):35-38. (Zou W X, Han X Z, Wang S Y, et al. Effect of water treatment on water regime in farm land black soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2009,25(3):35-38.)