

灌溉方式对土壤水分与灌水量影响的模拟研究

黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳

(中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002)

摘要: 为明确灌溉方式对土壤水分和灌水量的影响, 采用土壤水分概率模型分析了传统灌溉和连续灌溉的土壤水分概率分布特征与土壤平均水分变化规律, 研究了灌溉方式对灌水量的影响效应。结果表明: 不同灌溉方式的土壤水分概率分布特征差异明显, 连续灌溉的土壤水分概率密度极大值出现在 $s = s^*$ 处, 传统灌溉的土壤水分概率密度极大值出现在 $s = s_{fc}$ 处; 与传统灌溉方式相比, 连续灌溉使土壤平均水分含量保持在相对较低的水平, 当降雨发生时, 其土壤能够容纳更多的入渗水量。连续灌溉明显减少了土壤水分深层渗漏和地表径流损失水量, 显著提高了降雨利用率并降低了灌溉水量, 从而提高了农业水资源利用率。

关键词: 灌溉方式; 土壤水分; 灌水量; 概率密度函数; 模拟

中图分类号: S274.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)04-0091-05

Simulation of soil water content and irrigation amount under different irrigation schemes

HUANG Zhong-dong, QI Xue-bin, FAN Xang-yang

(Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: In order to understand the effects of irrigation schemes on soil water content and irrigation amount, a soil water probability model was employed to simulate the characteristics of soil water probabilistic distribution and the changes of average soil water content under traditional and continuous irrigation. The results indicated that there was a significant distinction of soil water probabilistic distribution for different irrigation schemes, and the maximum value of probability density function of soil water appeared at $s = s^*$ for continuous irrigation, but $s = s_{fc}$ for traditional irrigation. Compared to traditional irrigation, continuous irrigation kept the soil water content at a lower level, thus reducing leakage losses and surface runoff by storing more water into the soil when rainfall happened. Therefore, continuous irrigation could significantly increase the use efficiency of agricultural water resources by improving the utilization rate of rainwater and reducing the amount of irrigation water.

Keywords: irrigation scheme; soil water; irrigation amount; probability density function; simulation

我国农业灌溉用水量约占全国总用水量的 65%, 据统计, 在不增加灌溉用水的情况下, 未来 2030 年全国缺水量将达 1 300 ~ 2 600 亿 m^3 , 其中农业缺水 500 ~ 700 亿 m^3 ^[1]。与此同时, 随着我国社会经济的发展, 工业和生活用水需求呈增长趋势, 粮食消耗量也逐年增加^[2], 未来农业水资源短缺形势更加严峻。因此, 发展农业节水灌溉, 提高农业灌溉水的利用率是解决农业水资源缺乏的必然途径^[3]。

连续式灌溉(如滴灌和喷灌)较传统集中式灌溉

(如畦灌和沟灌)具有节水增产的优势^[4]。传统灌溉是一次性投入一定数量的水量, 以满足作物在未来数天内的蒸腾耗水, 而连续灌溉则是以持续性的微量供水来满足作物的蒸腾耗水。与传统灌溉相比, 连续灌溉能依照作物耗水规律, 适时、适量、均匀而又缓慢地供水, 使作物根层经常保持最佳的水分状态, 同时又能减少灌溉用水量和深层渗漏水量, 从而提高灌溉水利用率^[5]。连续灌溉的特点决定了其土壤水分特征和灌水量与传统灌溉具有显著的区别。

收稿日期: 2013-09-01

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203077); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2012ZL067)

作者简介: 黄仲冬(1981—), 男, 四川绵竹人, 助理研究员, 博士研究生, 研究方向为农业水资源优化配置与调控技术。E-mail: zdlhuang@126.com。

通信作者: 齐学斌(1963—), 男, 研究员, 陕西户县人, 博士生导师, 主要从事农业水资源与水环境方面的研究工作。E-mail: qxb6301@sina.cn。

研究人员针对不同作物开展了灌溉方式对土壤水分和灌水量的影响等方面研究^[6-8], 研究表明, 与沟灌和畦灌等传统集中式灌溉相比, 滴灌、喷灌和微喷灌等连续灌溉方式能显著降低田间水分深层渗漏, 减少灌溉用水量, 提高灌溉水利用率。然而, 以往研究均是在有限的时间和单一的条件下进行的, 不能完全反映外界因素等影响效应, 如降雨的随机性对土壤水分的影响; 不同降雨量与降雨分布条件下灌溉方式对土壤水分、灌水量的影响等研究较少。为此, 本文以一种假想作物(生长期为 100 d 的马铃薯)为研究对象, 将作物生育期的降雨过程视为随机过程, 采用土壤水分概率模型分析传统灌溉和连续灌溉方式下作物根区土壤水分的概率分布特征, 研究不同降雨条件下两种灌溉方式对作物根区土壤平均水分变化规律以及灌水量的影响效应。将模拟模型应用于灌溉方式的影响研究, 不仅能够弥补田间试验的不足, 并且能够分析更多环境条件下灌溉方式对土壤水分和灌水量的影响。

1 材料与方法

1.1 研究方案

主要采用数学模拟的方法来探讨传统灌溉和连续灌溉对马铃薯土壤水分及灌水量的影响。以土壤水分概率密度函数表示土壤水分的分布特征, 并通过土壤水分概率密度建立灌水量的计算公式。以降雨事件的降雨量和间隔期为随机变量, 采用土壤水分概率模型模拟分析不同降雨量和间隔期条件下传统灌溉和连续灌溉的土壤水分概率分布特征与土壤平均水分变化规律, 并利用灌水量计算公式探讨灌溉方式对灌水量的影响效应。

灌溉方式为传统灌溉和连续灌溉, 传统灌溉方式以地面灌溉为主: 当土壤水分达到灌水下限(即作物开始产生水分胁迫的临界土壤含水率)时, 进行灌溉, 灌水上限为田间持水量; 连续灌溉方式以滴灌为主: 当土壤水分达到灌水下限时, 进行灌溉, 灌水量为作物潜在腾发量。为探讨不同降雨条件下两种灌溉方式对土壤水分和灌水量的影响效应, 将降雨过程视为随机过程, 降雨事件的降雨量和间隔期视为随机变量, 通过它们与土壤水分和灌水量的定量关系进行分析研究。

研究作物假设为生长期 100 d 的马铃薯, 其潜在腾发量的日均值为 $0.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 根系深度为 60 cm, 冠层截留能力为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。研究土壤为砂壤土, 孔隙度为 0.42, 田间持水量为 0.218(体积含水率), 作物开始产生水分胁迫的临界土壤体积含水率

为 0.13。

1.2 降雨随机模拟

假定日尺度的降雨过程为泊松过程^[9], 降雨事件的降雨量(h)和间隔期(τ)服从指数分布:

$$f_T(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau}, \quad \tau \geq 0 \quad (1)$$

$$f_H(h) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha}h}, \quad h \geq 0 \quad (2)$$

因此, 降雨过程的基本特征可以采用参数 λ 和 α 定量描述。其中, λ 为降雨事件的发生频率(d^{-1}), α 为降雨事件的平均降雨量(mm)。

1.3 土壤水分概率特征与均值计算

将降雨过程视为随机过程以后, 土壤水分动态特征只能以概率的形式进行表达^[10]。Rodriguez - I-turbe 等^[11]和 Vico 等^[12]给出了不同灌溉方式下土壤水分概率密度函数(SW - PDF)的计算公式。

无灌溉:

$$p(s) = \begin{cases} \frac{C}{\eta} \left(\frac{s}{s^*} \right)^{\lambda s^* / \eta - 1}, & 0 \leq s \leq s^* \\ \frac{C}{\eta} e^{-\lambda s^* / \eta} e^{-s(\gamma - \lambda' / \eta)}, & s^* \leq s \leq s_{fc} \end{cases} \quad (3)$$

传统灌溉:

$$p_t(s) = \frac{C_t}{\eta\gamma - \lambda'} \left[\frac{\lambda'}{\eta} e^{-(\gamma - \lambda' / \eta)(s - s^*)} - \gamma \right], \quad s^* \leq s \leq s_{fc} \quad (4)$$

连续灌溉:

$$p_c(s) = \frac{C_c}{\eta} e^{-\lambda s^* / \eta} e^{-s(\gamma - \lambda' / \eta)}, \quad s^* \leq s \leq s_{fc} \quad (5)$$

$$\lambda' = \lambda e^{-\Delta / \alpha}, \quad \alpha' = k\alpha, \quad \gamma = nZ_r / \alpha', \quad \eta = ET_p / nZ_r \quad (6)$$

式中: n 为土壤孔隙度; Z_r 为根系层厚度(mm); s 为土壤饱和度; s^* 为作物开始产生水分胁迫的临界土壤饱和度; ET_p 为作物潜在腾发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为冠层截留能力($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); k 为冠层截留以后的净降雨量与降雨量的比值系数。积分常数 C , C_t 和 C_c 分别由方程 $\int_0^{s_{fc}} p(s) = 1$, $\int_{s^*}^{s_{fc}} p_t(s) = 1$ 和 $\int_{s^*}^{s_{fc}} p_c(s) = 1$ 计算得到。 ET_p 依据 FAO56 Penman - Monteith 公式^[13] 和作物系数^[14] 计算得到。

土壤平均水分 $\langle s \rangle$ 采用下述公式计算:

$$\langle s \rangle = \int_0^{s_{fc}} sp(s) ds \quad (7)$$

1.4 灌水量计算

基于土壤水分概率密度函数可以得到两种灌溉方式下作物生育期灌水量(V)的计算公式。

传统灌溉:

$$V_t = (s_{fc} - s^*) p_t(s^*) ET_p T_{seas} \quad (8)$$

连续灌溉:

$$V_c = p_c(s^*)ET_p T_{seas} \quad (9)$$

式中: V_l 和 V_c 分别为传统灌溉和连续灌溉方式下作物生育期的总灌水量(mm); T_{seas} 为生育期天数(d)。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式对土壤水分的影响

图 1 显示了三种不同降雨条件下(图 1a 为降雨稀少,图 1b 为降雨中等,图 1c 为降雨充沛),无灌溉、传统灌溉和连续灌溉的土壤水分概率分布特征。从图中可以看出,不同灌溉方式的土壤水分概率分布具有明显差异。无灌溉的 SW - PDF 曲线明显向左偏移,特别是在降雨稀少条件下(图 1a), $p(s)$ 曲线的极大值出现在 $s = 0.024$ 附近。对于传统灌溉和连续灌溉,由于灌溉水对土壤水分的补充,其 SW - PDF 曲线的横坐标均介于 s^* 和 s_{fc} 之间,但二者 SW - PDF 曲线的形状和极大值出现的位置有所差异。由于持续性的微量供水,连续灌溉方式的土壤水分经常处于 s^* 附近,因而 s^* 出现的频次较高,其概率密度最大;对于传统灌溉,由于采用集中的灌溉方式,灌水量较大,再加上降雨对土壤水分的补充作用,其土壤水分在 $s = s_{fc}$ 处出现的频次较高,特别是在降雨充沛条件下(图 1c),由于降雨比较频繁,土壤经常处于湿润状态, s_{fc} 处的概率密度明显偏高。

图 2 显示了不同降雨条件下三种灌溉方式土壤平均水分($\langle s \rangle$)的变化规律。从图 2a 中可以看出,当 α 一定时,无灌溉、传统灌溉和连续灌溉的 $\langle s \rangle$ 均随着生育期总降雨量($\Theta = \alpha \lambda T_{seas}$)的增大而逐渐增大。传统灌溉与连续灌溉 $\langle s \rangle$ 的差异随着降雨条件的变化有所不同。在降雨稀少的条件下,二者 $\langle s \rangle$ 的差异较大,如 $\Theta = 100$ mm 时,传统灌溉的 $\langle s \rangle$ 比连续灌溉高 18.79%;在降雨充沛的条件下,二者 $\langle s \rangle$ 的差值较小,如 $\Theta = 600$ mm 时,传统灌溉的 $\langle s \rangle$ 仅比连续灌溉高 4.28%。从总体变化规律来看,无论作物生育期总降雨量多少,连续灌溉的 $\langle s \rangle$ 始终小于传统灌溉的 $\langle s \rangle$ 并且更接近于 s^* ,连续灌溉使土壤水分保持在较低的状态而不会引起作物水分胁迫,既减少了降雨产生深层渗漏和地表径流损失又能保证作物的水分需求。当 Θ 一定时,也可以得到相同的结果,如图 2b 所示,不再累述。

为了进一步分析不同降雨条件下传统灌溉和连续灌溉对土壤水分的影响,将不同 α 和 λ 组合代入到公式(3)、(7)计算得到两种灌溉方式的 $\langle s \rangle$,并把二者 $\langle s \rangle$ 的差值制于图 3 得到 $\langle s \rangle$ 差值等值线图。

$\langle s \rangle$ 差值等值线图反映了传统灌溉和连续灌溉方式在不同降雨量及其分布条件下对土壤水分的影响程度。从图中可以看出,不同的降雨模式下两种灌溉方式对 $\langle s \rangle$ 的影响程度是有所差异的。在降雨稀少的干旱条件下,灌溉方式的影响显著,随着降雨量和降雨频率的增大, $\langle s \rangle$ 差值逐渐减小,灌溉方式的影响逐渐减弱。

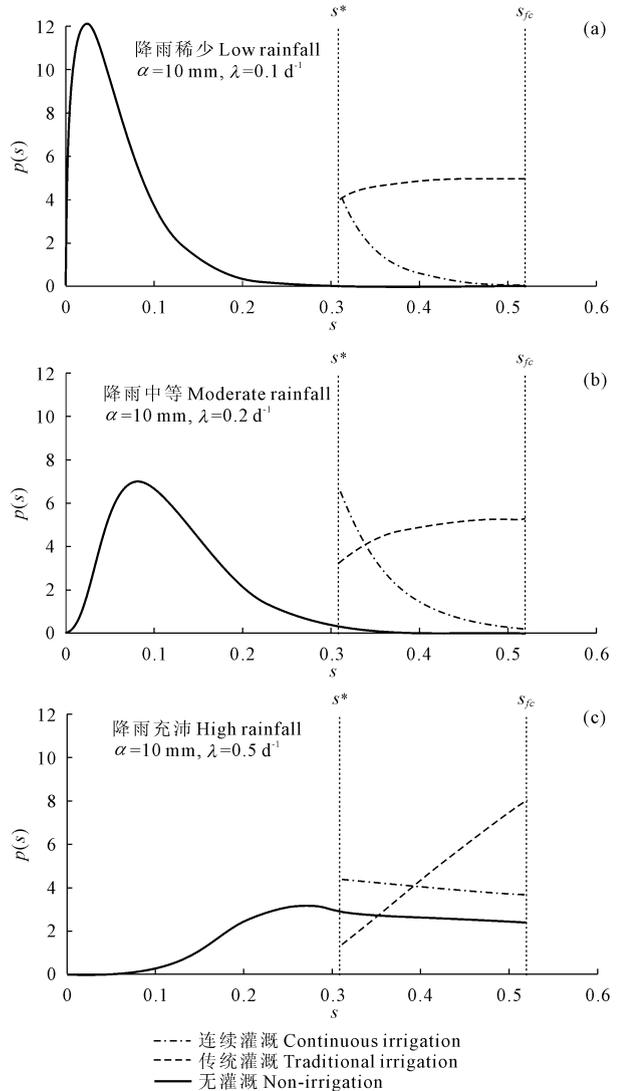


图 1 不同灌溉方式土壤水分概率分布特征

Fig.1 Soil water probability distribution under different irrigation schemes

2.2 灌溉方式对灌水量的影响

两种灌溉方式下作物全生育期灌水量随降雨参数的变化规律如图 4 所示。当 α 一定,传统灌溉和连续灌溉的灌水量(V)均随总降雨量的增加而减小;两种灌溉方式 V 的差值随着总降雨量的增加呈逐渐增大的趋势。当 $\Theta = 100$ mm 时,二者差值为 13.1 mm,传统灌溉比连续灌溉高 4.04%;当 $\Theta =$

500 mm 时,二者差值为 44.2 mm,传统灌溉比连续灌溉高 68.42%。由此可见,当 α 一定时,灌溉方式在不同降雨条件下对灌水量的影响不同。在降雨较多的条件下,影响显著;在降雨较少的条件下,影响微弱。

量较大;当 α 较大时, λ 较小,降雨频次少雨量大,降雨和灌溉产生的地表径流和深层渗漏较大。两种灌溉方式 V 的差值随着 α 的增加逐渐增大,当 α 较大时,两种灌溉方式对 V 的影响明显;当 α 较小时,两种灌溉方式对 V 的影响微弱。从二者 V 差值与降雨参数关系的等值线图(图 5)也可以看出,总降雨量等于 500 mm 曲线所处的区域 V 差值均偏大,而总降雨量等于 100 mm 曲线所处的区域 V 差值均较小。由此可见,灌溉方式对灌水量的影响效应也随着降雨条件的改变而发生变化,在降雨较多的湿润条件下,传统灌溉和连续灌溉对灌水量的影响明显,随着总降雨量的减少,影响效应逐渐变弱。

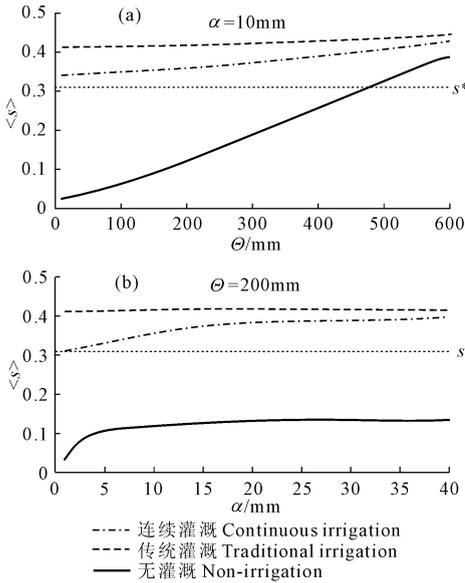


图 2 不同灌溉方式土壤平均含水量随降雨参数的变化规律
Fig.2 Average soil water content versus rainfall parameters under different irrigation schemes

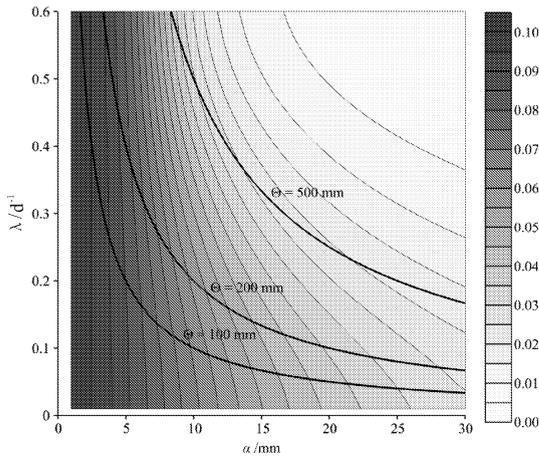


图 3 不同降雨条件下传统灌溉和连续灌溉土壤平均水分的差值

Fig.3 Difference of average soil water content between traditional and continuous irrigation under different rainfall conditions

当 θ 一定时,两种灌溉方式的 V 随 α 的增加呈现出先减小后缓慢增大的趋势,主要原因是:当 α 较小时, λ 较大,作物冠层截留在这种雨量小频次高的条件下影响作用明显,相当一部分降雨量被冠层截留,进入到土壤的降雨量偏少,因而所需要的灌水

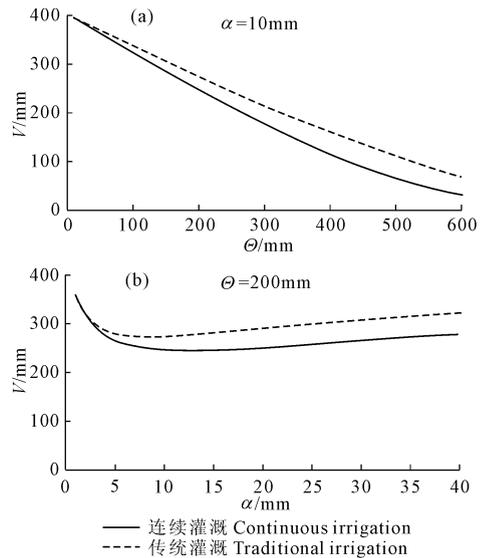


图 4 不同灌溉方式灌水量随降雨参数的变化规律
Fig.4 Irrigation amount versus rainfall parameters under different irrigation schemes

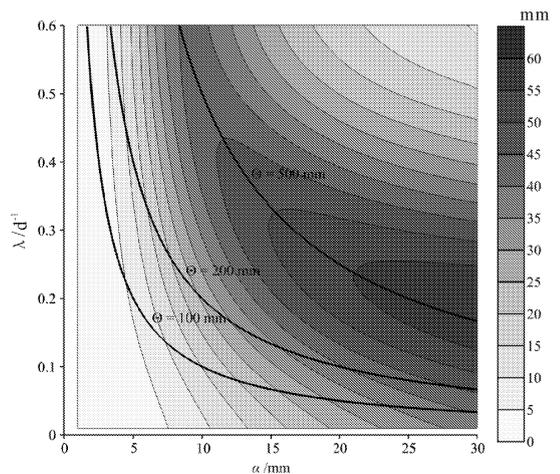


图 5 不同降雨条件下传统灌溉和连续灌溉灌水量的差值
Fig.5 Difference of total irrigation amount between traditional and continuous irrigation under different rainfall conditions

3 讨论

3.1 土壤水分概率模型

与传统的地面灌溉方式相比,滴灌、喷灌以及微喷灌等现代连续灌溉方式因具有明显的节水效益而被广泛关注。国内外专家学者针对不同作物开展了许多相关的室内和田间试验,研究表明,连续灌溉方式持续小流量供水的特点有效地减少了田间水分深层渗漏和地表径流,提高了灌溉水的利用率^[4-8]。然而,以往开展的灌溉试验研究是在室内或田间人为设定条件下进行的,如何将一定年份、一定地点以及特定条件下的试验结果扩展到更多条件下,如将特定降雨条件下的研究结果扩展到不同降雨条件是亟待解决的关键问题之一。本文将降雨过程作为随机过程,并利用土壤水分概率模型来分析不同降雨条件对土壤水分和作物生育期灌水量可以较好地解决上述问题。利用模型进行模拟研究,可以得到不同降雨条件下灌溉方式对土壤水分和灌水量的影响效应。

本研究运用土壤水分概率模型来分析灌溉方式对土壤水分和灌水量的影响也存在一些局限:(1)土壤水分概率模型对田间实际土壤水分动态变化规律模拟的真实程度,模型计算采用的 ET_p 为作物生育期的均值,无法反映其动态变化特征,因而其模拟的真实性可能不如动力学模型。(2)模型参数的精确度,本文采用模拟的方法来探讨灌溉方式对不同降雨条件下土壤水分和灌水量的影响,以弥补田间试验的不足,但还需要长系列的观测数据对模型参数的精确度进行验证。

3.2 灌溉方式的合理选取

与传统灌溉相比,连续灌溉的优势在于降低了降雨产生深层渗漏和地表径流的水量损失,提高了降雨和灌溉水利用率,然而,连续灌溉存在一个潜在的问题,即是土壤盐碱化,长期连续灌溉可能会导致土壤盐分在作物耕层的累积从而影响作物的生长发育,因此,在土壤盐分问题比较突出的地区,通过传统灌溉方式来淋洗土壤盐分也是必不可少的。

4 结论

综上所述,通过分析传统灌溉和连续灌溉方式对土壤水分以及灌水量的影响,主要得出以下结论:

1) 两种灌溉方式的土壤水分概率密度曲线具

有明显的差异,连续灌溉的土壤水分概率密度极大值出现在 $s = s^*$ 处,而传统灌溉的土壤水分概率密度极大值出现在 $s = s_{fc}$ 处。

2) 与传统灌溉相比,连续灌溉使土壤平均水分保持在一个相对较低的状态,当降雨发生时,其土壤能够容纳更多的入渗水量,因而减少了深层渗漏和地表径流损失。

3) 灌溉方式对灌水量的影响效应随着降雨条件的改变而变化,在降雨较多的湿润条件下,连续灌溉对灌水量的影响明显,随着总降雨量的减少,影响逐渐变弱。

参考文献:

- [1] 康绍忠. 农业水土工程概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [2] 高占义, 王浩. 中国粮食安全与灌溉发展对策研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1273-1278.
- [3] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 水利科学与海洋工程学科发展战略研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] 李巧珍, 郝卫平, 龚道枝, 等. 不同灌溉方式对苹果园土壤水分动态、耗水量和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 128-133.
- [5] 吴娜, 赵宝平, 曾昭海, 等. 两种灌溉方式下保水剂用量对裸燕麦产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(8): 1552-1557.
- [6] 李敏敏, 安贵阳, 郭燕, 等. 不同灌溉方式对渭北果园土壤水分及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 174-179.
- [7] 吴燕, 梁银丽. 灌溉方式对温室樱桃番茄结果期根系特征与产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 37-41.
- [8] 任玉忠, 王水献, 谢蕾, 等. 干旱区不同灌溉方式对枣树水分利用效率和果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 95-102.
- [9] Eagleson P S. Ecohydrology: Darwinian expression of vegetation form and function[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [10] 潘兴瑶, 夏军, 张榕. 土壤水分随机模型支持下的土壤水平衡研究进展[J]. 资源科学, 2008, 30(3): 460-467.
- [11] Rodriguez-Iturbe I, Porporato A, Ridolfi L, et al. Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, Probabilistic modelling of water balance at a point: the role of climate, soil and vegetation[J]. Proceedings the Royal of Society A, 1999, 455: 3789-3805.
- [12] Vico G, Porporato A. Traditional and microirrigation with stochastic soil moisture[J]. Water Resources Research, 2010, 46(3): W03509.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [14] 段爱旺, 孙景生, 刘钰, 等. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.