

喷灌冬小麦农田土壤水分分布特征及水量平衡^[20]

孙泽强^{1, 2}, 康跃虎¹, 刘海军¹

(¹ 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 以传统地面灌溉(畦灌)为对照, 分析了喷灌条件下, 冬小麦农田土壤水分分布特征和水量平衡。结果表明: 喷灌条件下土壤水分运动表现出明显的非饱和和土壤水运动特征, 地面灌溉条件下土壤水分运动具有饱和和土壤水运动的特征。喷灌条件下灌溉水主要分布在土壤表层 0~50 cm 范围内, 地面灌溉条件下灌溉水可达地表以下 150 cm 处。喷灌条件下, 没有明显的土壤水分渗漏发生; 地面灌溉条件下, 土壤水分渗漏量占灌溉水量的 10% 左右。2003 年和 2004 年试验期间, 喷灌蒸散量分别为 312.2 mm 和 324.4 mm, 分别比地面灌溉蒸散量少 13.1 mm 和 35.1 mm。

关键词: 喷灌; 冬小麦; 土壤水分分布; 水量平衡

中图分类号: S 152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006)01-0100-08

华北平原是我国主要粮食产区之一, 水资源的短缺日益成为限制华北地区粮食产量乃至经济发展的重要因素。发展节水灌溉, 提高水分利用效率成为解决华北平原农业用水问题的有效途径。

地面灌溉是一种传统而古老的灌溉方式, 也是目前我国普遍采用的一种灌溉方式。喷灌作为一种现代化的灌溉技术, 在世界各国得到了广泛应用。根据国际灌排委员会(ICID)资料统计, 1998 年全世界喷灌面积达到 973 万 hm^2 , 截止到 2002 年, 我国喷灌面积达到 233 万 hm^2 ^[1]。在传统地面灌溉条件下, 往往是低频率大水量灌溉^[2], 约有 20% 的灌溉水渗漏损失掉^[3], 中心支轴式喷灌与传统地面灌溉相比节约用水 60%~72%^[4]。喷灌与传统地面灌溉相比, 在比较典型的条件下, 喷灌的水资源损耗率大约比传统地面灌溉小 15%~20%^[5]。本文以目前地面灌溉普遍采用的畦灌为对照, 分析冬小麦返青至收获期间, 喷灌条件下的土壤水分分布运移特征以及农田水量平衡, 为华北地区喷灌灌溉计划的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在中国科学院地理科学与资源研究所通州农田水循环与现代节水灌溉试验基地进行。地理位

置为北纬 39°36', 东经 116°48', 海拔 20 m, 年平均气温 11.2℃, 年平均降水 620 mm。土壤为粉壤质潮土, 耕层土壤容重为 1.35 g/cm^3 , 土壤有机质 1.31%, 全氮 0.098%, 碱解氮 69 mg/kg , 有效磷 10.1 mg/kg , 有效钾 95.8 mg/kg 。

2002~2004 年两个生长季的冬小麦喷灌试验和对照畦灌试验同时进行, 试验处理时间为冬小麦返青期到收获期。采用大区试验, 喷灌试验区的面积为 240 m × 208 m, 采用管道式喷灌系统, 每条支管上安装 12 个摇臂式喷头(ZY-2), 喷嘴流量为 3 m^3/h , 喷头射程为 18 m, 支管和喷头间距均为 18 m。对照地面灌溉试验区的面积为 215 m × 139 m, 采用低压管道输水小畦灌, 畦宽 5 m, 长约 70 m。喷灌冬小麦灌溉时间根据土壤基质势来决定, 当 0~40 cm 的平均土壤基质势降到 -45 kPa 左右开始灌水, 喷水量约 50 mm。地面灌溉的灌溉时间和灌水量根据田间的土壤含水量和冬小麦的长势决定, 灌水量通过水表读数计算得到。

2002~2004 年两个生长季, 灌水日期和灌水量见表 1。2003 年喷灌共灌水 4 次, 总灌水量为 196.5 mm, 地面灌溉灌水 3 次, 总灌水量为 302.4 mm; 2004 年喷灌共灌水 3 次, 总灌水量为 150.5 mm, 地面灌溉共灌水 2 次, 总灌水量为 161.0 mm。2002~2003 年生长季喷灌和地面灌溉施肥时期保持同步,

[20] 收稿日期: 2005-02-24

基金项目: 国家杰出青年基金(40125003)

作者简介: 孙泽强(1977-), 男, 山东阿县人, 博士研究生, 研究方向为农业水资源高效利用。

通讯作者: 康跃虎, 研究员, 博士生导师。Email: kangyh@igsnr.ac.cn

并且施肥量相同,施肥方式为人工撒施。施肥分底肥和追肥两次进行:播种前,喷灌和地面灌溉施硫酸钾复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)750kg/hm²作为底肥;返青后,追施尿素(46%N)300kg/hm²。2003~2004年播种前,喷灌施硫酸钾复合肥(N:

P₂O₅:K₂O=15:15:10)300kg/hm²,为了弥补地面灌溉耕层土壤养分与喷灌的差异,地面灌溉施硫酸钾复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:10)375kg/hm²,比喷灌施肥量稍有增加,返青后,喷灌和地面灌溉都追施尿素(46%N)300kg/hm²。

表 1 2003年和 2004年喷灌和地面灌溉灌水量
Table 1 The water supply in sprinkler irrigation and surface irrigation in 2003and 2004

2003年喷灌 Sprinkler irrigation in 2003		2003年地面灌溉 Surface irrigation in 2003		2004年喷灌 Sprinkler irrigation in 2004		2004年地面灌溉 Surface irrigation in 2004	
日期(M d) Date	灌水量 Water supply (mm)	日期(M d) Date	灌水量 Water supply (mm)	日期(M d) Date	灌水量 Water supply (mm)	日期(M d) Date	灌水量 Water supply (mm)
04-10	38.3	04-13	118.1	04-09	49.0	04-09	89.7
04-21	54.5	05-05	93.3	04-26	50.0	05-25	71.3
05-04	50.1	05-22	91.0	05-25	51.5		
05-21	53.5						
合计Total	196.5		302.4		150.5		161.0

1.2 测定项目和方法

1.2.1 土壤含水量和储水量 试验期间大约每5天用土钻取1次土样,0~40cm每10cm取1个样,40~100cm每20cm取1个样,100~135cm取1个样,每次取样3个重复,灌水后加测,土壤含水量用烘干法测定^[9]。

土壤体积含水量和土壤储水量分别由式(1)和(2)计算:

$$\theta = \theta_v \times \rho \tag{1}$$

$$W_s = \sum_{i=1}^n \theta_{hi} \tag{2}$$

式(1)中,θ为土壤体积含水量(cm³/cm³),θ_v为土壤质量含水量(g/g),ρ为土壤容重(g/cm³)。式(2)中,W_s为一定土体内土壤储水量(mm),θ_i为第i层土壤平均体积含水量(cm³/cm³),h_i为第i层土壤厚度(mm),i=1,2,3,...,n为土体第i层土壤。

1.2.2 土壤基质势 采用DLS-II型水银式负压计测定,测定深度为10,20,30,40,50,70,90,120,150和180cm十个层次,喷灌和地面灌溉各有3个重复,每天早晨8:00时读数测定。

1.2.3 气象数据 喷灌和地面灌溉试验田内各有一套小气候观测记录系统,能自动观测记录降水、气温、辐射等气象数据。

1.2.4 土壤饱和导水率和非饱和导水率 田间取样,室内测定135cm处土壤饱和导水率,采用西安理工大学水资源研究所制造的饱和渗透仪测定,测定方法为定水头法,单位为mm/d。

土壤非饱和导水率根据van Gehuchten模型^[7],由土壤水分特征曲线求得:

$$K(h) = K_s \times \left\{ \frac{1 - (\alpha)^{n-1} [1 + (\alpha)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha)^n]^{\frac{m}{2}}} \right\}^2 \tag{3}$$

式中,K_s为土壤饱和导水率(mm/d);h为土壤基质势(cm水柱);α_{n,m}分别为模型的经验系数,m=1-1/n。

土壤水分特征曲线参数由2003年田间实测的土壤基质势数据和土壤含水量数据经RETc拟和得到,参数结果为α=0.03696/cm,n=1.1619。

1.2.5 土壤水分平衡与水分渗漏量的计算 农田土壤水分平衡是指在一定时间内,作物根系层范围一定深度内得到的水分和损失的水分之间的平衡关系^[9]。根据田间观测的冬小麦根系分布,选择0~135cm作为农田水分平衡方程的计算深度。在无地表径流条件下的土壤水分平衡方程可写为^[9]:

$$ET_a = P + I - \Delta S - D \tag{4}$$

其中,ET_a为实际作物蒸散量(mm),P为降雨量(mm),I为灌溉水量(mm),ΔS为135cm土体储水量的增加量(mm),D为通过地表以下135cm处的水分渗漏量(mm),向下为正,向上为负。水分渗漏量通过达西定律来计算:

$$D = q \Delta t = -K(h) \text{grad}H \Delta t \tag{5}$$

其中,q为Δt时间段内平均体积流速密度(mm/d),Δt为时间段(d),K(h)为135cm处土壤导水率(mm/d),gradH为135cm处土壤水势梯度

(cm/cm) 。

2 结果与分析

2.1 试验期间的降水分布

2002~ 2003 年生长季内总降水量为 136.4 mm, 试验处理期间(2003 年 4 月 8 日~ 6 月 15 日) 共降水 20 次, 降水量为 41.0 mm, 其中约 50% 降水在冬小麦成熟期。2003~ 2004 年生长季总降水量为

135.7 mm, 试验处理期间(2004 年 4 月 6 日~ 6 月 15 日) 共降水 12 次, 降水量为 89.7 mm。2002~ 2003 年和 2003~ 2004 年冬小麦生长季内总降水量虽然相差不多, 但降水的分布有明显的不同: 2002~ 2003 年试验处理前降水较多, 而在冬小麦返青后降水相对较少, 2003~ 2004 年在冬小麦返青后降水量较大, 且分布较为均匀。

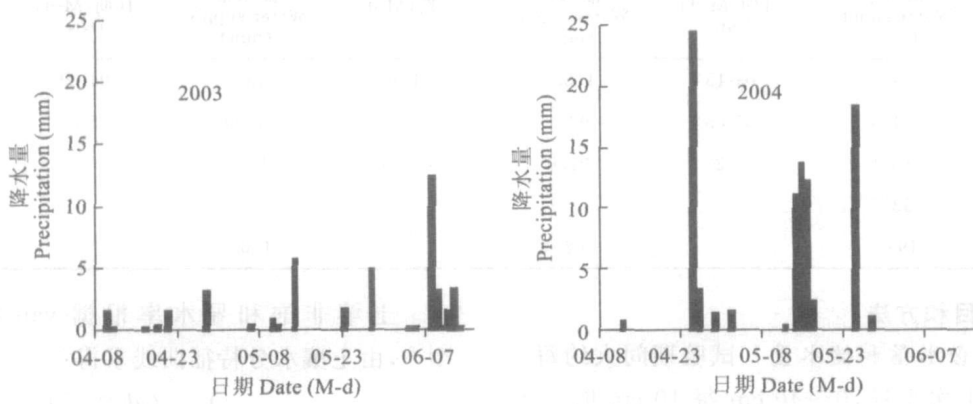


图 1 2003 年和 2004 年试验处理期间降水分布

Fig. 1 Precipitation distribution during the periods of experiment treatments in 2003 and 2004

2.2 喷灌条件下土壤水分分布变化特征

土壤水分状况受降水、灌溉和作物生长的影响, 土壤水分的分布尤其受灌溉方式的影响。图 2 为喷灌和地面灌溉灌水前和灌水后 1、2、3、5、7、10、14 d 的土壤基质势分布变化。

从图 2 中可看出(b 1~b 3), 地面灌溉灌水后第 1 天, 150 cm 以内土壤剖面的基质势立刻都有明显的增加, 增加幅度随土壤深度的增加而减小, 主要变化土层在 90 cm 以上, 土壤剖面的基质势大小分布比较均匀, 第 2 天整个剖面土壤基质势都有不同程度的减小, 在灌水后 3 天内, 各层土壤基质势都大于 -10 kPa , 土壤水分都达到或超过田间持水量^[10]。地面灌溉条件下土壤水分属于积水入渗, 具有明显的饱和土壤水运动特征, 在土壤入渗剖面上会形成明显的饱和区, 与下层土壤之间的水势梯度大, 土壤水分入渗速度快。由于土壤蒸发和小麦根系吸水, 灌水后土壤水分主要在 70 cm 以上变化, 在冬小麦生长后期可达 120 cm, 这与冬小麦根系对土壤水分利用有关。喷灌灌水后土壤水分的入渗再分布过程较为缓慢(a 1~a 3), 土壤剖面基质势的分布变化也较为复杂, 喷灌灌水后土壤剖面水分随土壤深度依次增加, 先是 10 cm 或 20 cm 土壤基质势有明显的增

加, 下层土壤基质势没有明显变化, 随着水分的入渗, 下层土壤基质势逐渐增加, 表层土壤基质势减小, 大约灌水后 3 d, 50 cm 处的土壤基质势才有明显的增加。灌水对土壤水分的影响深度较浅, 一般在 50 cm 以上, 在冬小麦生长后期由于小麦根系的分布吸水, 土壤水分变化层次可达到 70 cm。主要是由于喷灌条件下的土壤水分入渗属于无压入渗, 土壤水分的运动变化具有典型的非饱和土壤水运动特征。

2.3 喷灌条件下的土壤水分平衡

2.3.1 喷灌条件下土壤储水量的变化 图 3 为 2003 年和 2004 年试验处理期间喷灌和地面灌溉分层土壤储水量变化。从图中可看出, 0~ 40 cm 土层是冬小麦根系主要分布层, 也是土壤水分变化最活跃的区域。地面灌溉条件下, 各层土壤储水量峰值都与灌水或大的降水相对应, 每次灌水后各层土壤水分都能达到或超过田间持水量; 在喷灌条件下, 只有 100~ 135 cm 土层储水量在 2004 年接近田间持水量的水平, 其他土壤层次土壤水分都小于田间持水量。2003 年喷灌 0~ 40、40~ 100 和 100~ 135 cm 土壤储水量的变化幅度分别为 52.8、52.2 和 24.8 mm, 地面灌溉各层土壤储水量的变化幅度分别为 58.4、64.

8、29、4 mm; 2004 年喷灌 0~40、40~100 和 100~135 cm 土壤储水量的变化幅度分别为 61.5、42、37.7 mm, 地面灌溉各层土壤储水量的变化幅度分别为 66.6、80.6、38.8 mm。喷灌各层土壤储水量变化幅度都小于地面灌溉, 其他研究者也得出了相似的结论^[1]。

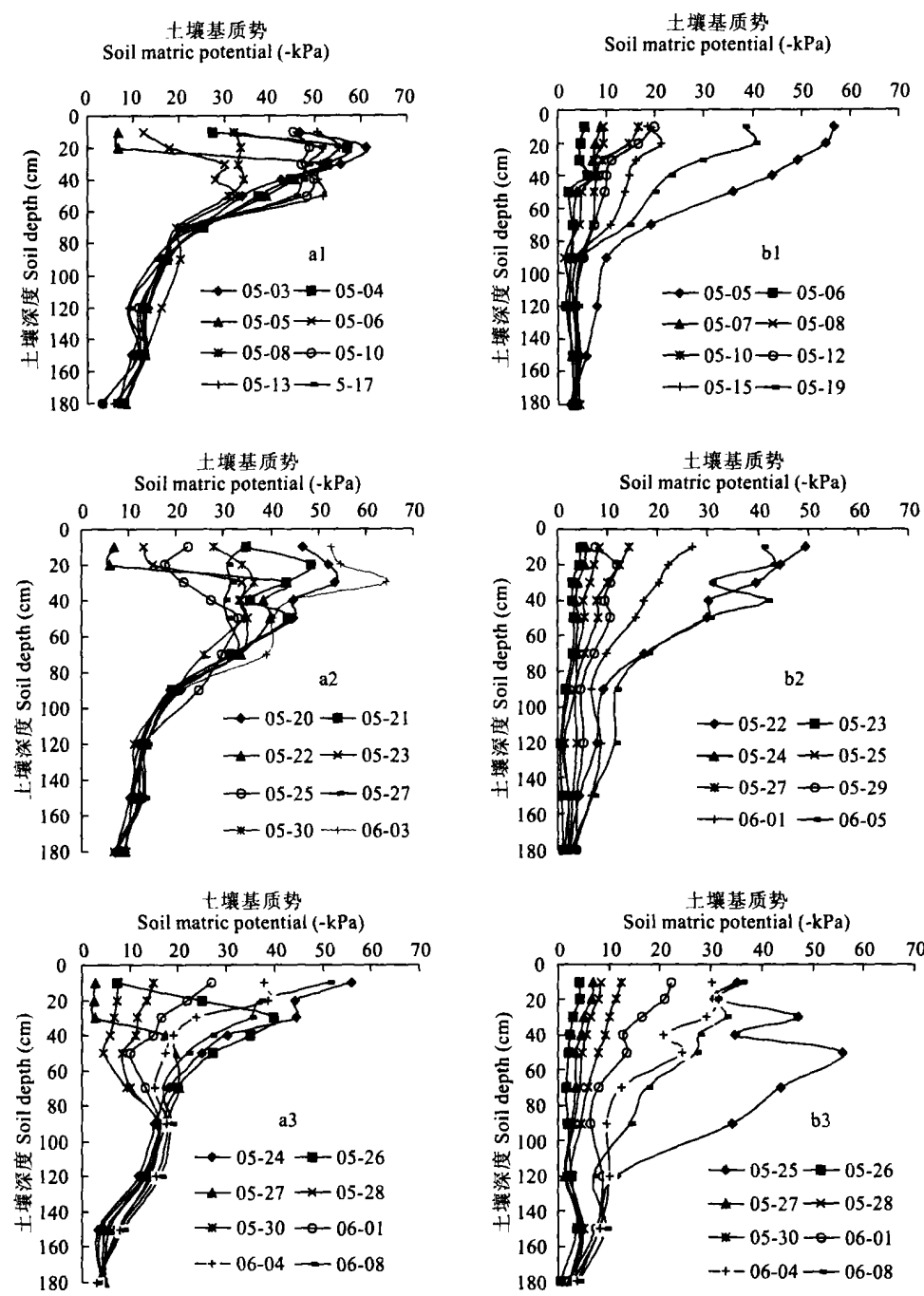


图 2 喷灌和地面灌溉灌水后土壤基质势分布变化特征
(a 1, a 2 为 2003 年喷灌, a 3 为 2004 年喷灌; b 1, b 2 为 2003 年地面灌溉, b 3 为 2004 年地面灌溉)
Fig. 2 The characteristics of soil matrix distribution after sprinkler irrigation and surface irrigation
(a 1, a 2: sprinkler irrigation in 2003; a 3: sprinkler irrigation in 2004;
b 1, b 2: surface irrigation in 2003; b 3: surface irrigation in 2004)

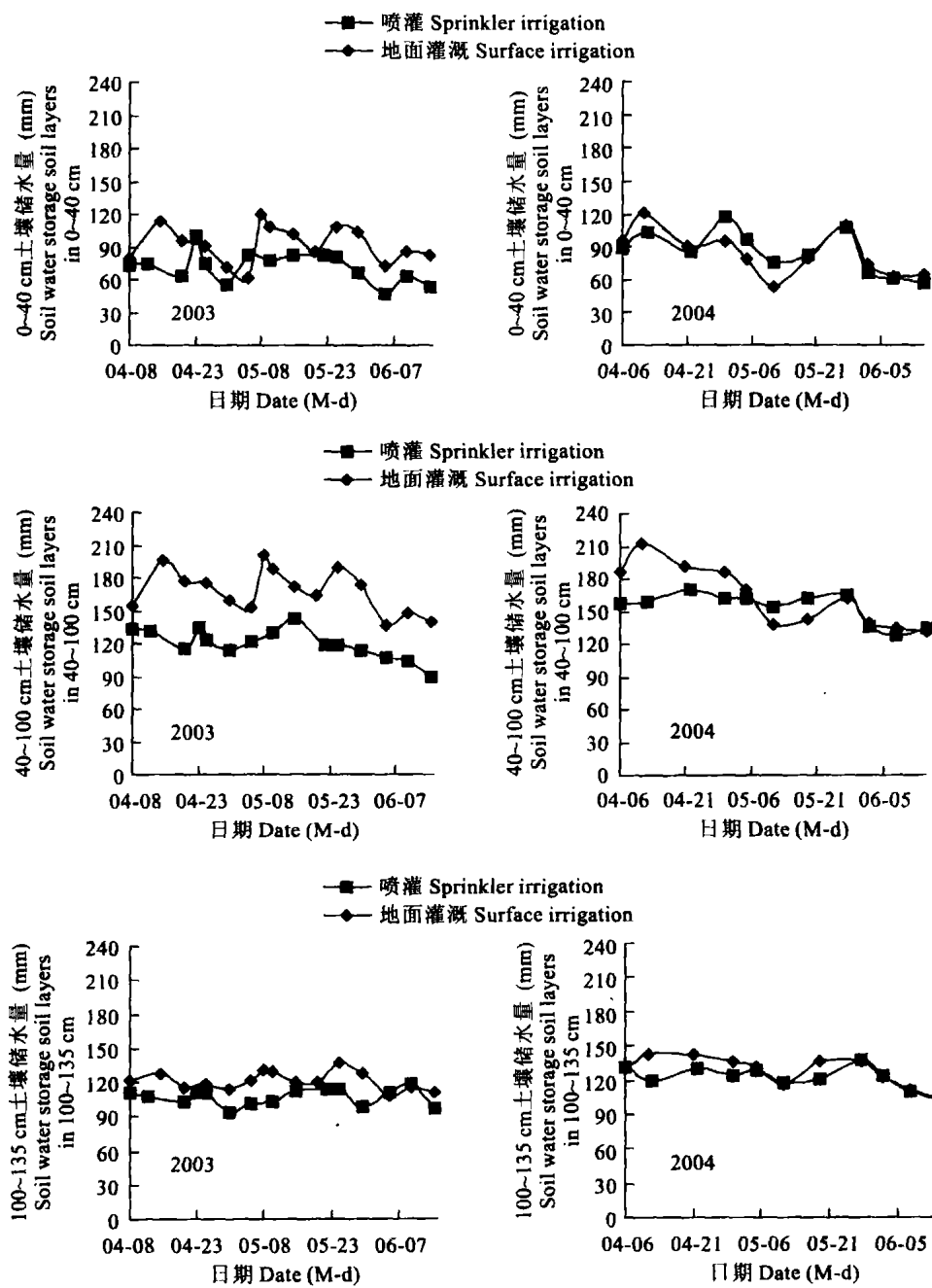


图 3 2003年和 2004年试验处理期间喷灌和地面灌溉分层土壤储水量变化

Fig. 3 The dynamics of layered soil water storage during experimental periods under sprinkler irrigation and surface irrigation in 2003and 2004

2 3 2 喷灌条件下的土壤水分渗漏量 图 4为 2003年和 2004年试验处理期间喷灌和地面灌溉累积土壤水分渗漏量。从图中可看出,地面灌溉条件下,有明显的土壤水分渗漏产生,特别是灌水后 5d 以内,土壤水分渗漏量有明显的增加,5月下旬(灌浆期)的灌水最为明显。而在喷灌条件下,灌溉时没有明显的水分渗漏发生。

2 3 3 喷灌对冬小麦蒸散量的影响 蒸散量是土壤水分重要的支出项。图 5为试验处理期间喷灌和地面灌溉条件下冬小麦的累积蒸散量。比较 2003年和 2004年试验处理期间冬小麦的蒸散量可看出,2004年喷灌和地面灌溉冬小麦蒸散量比 2003年同种灌水方式下蒸散量要大。喷灌冬小麦蒸散量要小于同期地面灌溉蒸散量,喷灌和地面灌溉冬小麦蒸

散量的差异在冬小麦生长后期表现最为明显,喷灌条件下冬小麦的蒸散量小于地面灌溉。

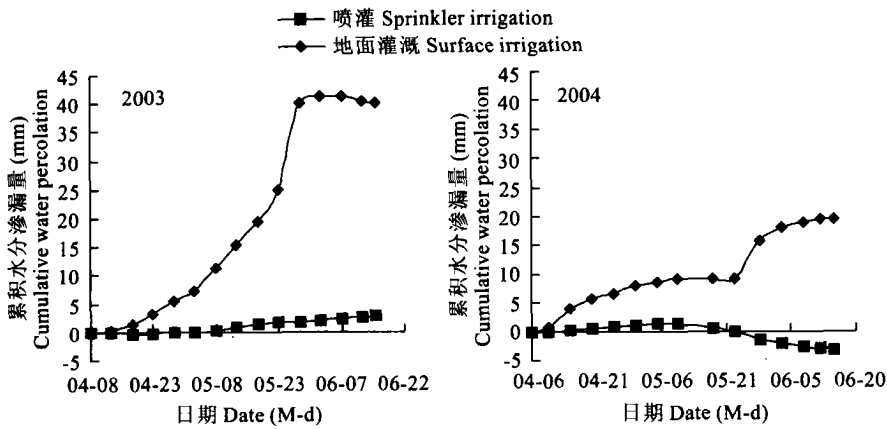


图 4 2003年和 2004年试验处理期间喷灌和地面灌溉累积土壤水分渗漏量
Fig. 4 The cumulative soil water percolation during experimental periods under sprinkler irrigation and surface irrigation in 2003and 2004

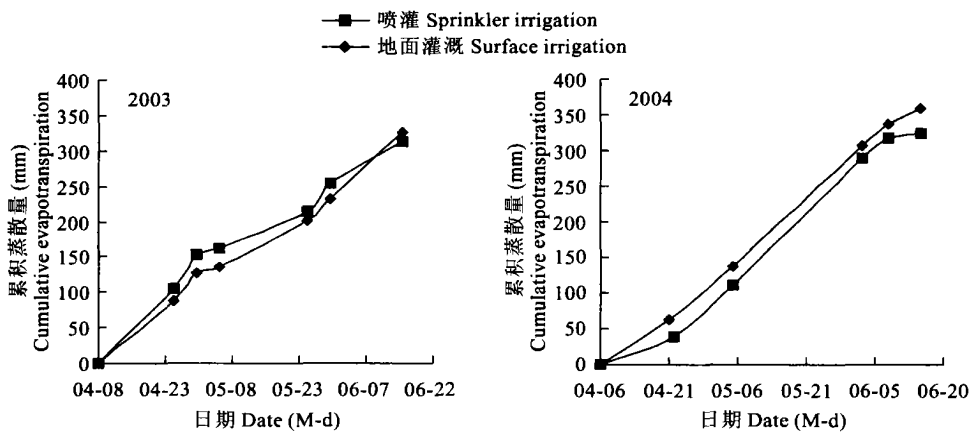


图 5 2003年和 2004年试验处理期间喷灌和地面灌溉冬小麦累积蒸散量
Fig. 5 The cumulative evapotranspiration of winter wheat during experimental periods under sprinkler irrigation and surface irrigation in 2003and 2004

2 3 4 喷灌条件下的水量平衡分析 2003年和 2004年喷灌和地面灌溉冬小麦返青至收获农田水分平衡见表 2。对于 135cm 根层深度内的土壤水分,收入项为灌溉、降水和下层土壤水分的补给,支出项为作物蒸散和水分深层渗漏。

从表中可看出,2003年和 2004年试验期间,喷灌和地面灌溉土壤水分都有不同程度的亏损,喷灌亏损量分别为 77.5mm 和 81.5mm,两年相差不大;地面灌溉亏损量分别为 22mm 和 128.2mm,两年有很大差异。可见,在试验处理期间,降水和灌溉水量不能满足作物蒸散的需要,土壤水分是冬小麦生长的重要供水项。在相同降水条件下,喷灌灌水量都小于地面灌溉,2003年相差 105.9mm,2004年相差

10.5mm。在 2003年试验处理期间,喷灌冬小麦蒸散量是 312.2mm,比地面灌溉少 13.1mm;2004年试验处理期间,喷灌冬小麦蒸散量是 324.4mm,比地面灌溉少 35.1mm。试验期间地面灌溉条件下土壤水分渗漏量,2003年为 40.1mm,为灌溉水量的 13.3%,2004年为 19.4mm,为灌溉水量的 12.0%;喷灌 2003年试验期间土壤水分渗漏量只有 2.8mm,为灌溉水量的 1.4%,2004年试验期间总的土壤水分通量向上,土壤水分补给量为 3.2mm,为灌溉水量的 2.1%。可见,喷灌土壤水分的渗漏或补给量占灌溉水的比重很小,可以忽略;地面灌溉土壤水分渗漏量占灌溉水量的 10%以上。喷灌与地面灌溉相比,明显减少了土壤水分渗漏量。

表 2 2003和 2004年冬小麦返青至收获农田土壤水分平衡

Table 2 Soil water balance during reviving to harvesting of winter wheat in 2003and 2004

土壤水分平衡项 Items of soil water balance	2003年 4月 8日~6月 15日 April 8to June 15in 2003		2004年 4月 6日~6月 15日 April 6to June 15in 2004	
	喷灌 Sprinkler irrigation	地面灌溉 Surface irrigation	喷灌 Sprinkler irrigation	地面灌溉 Surface irrigation
135 cm 土壤储水量增量 Increment of water storage in 0~ 135 cm soil layer (mm)	- 77. 5	- 22 0	- 81 0	- 128 2
降水 Rainfall (mm)	41 0	41 0	89. 7	89 7
灌溉 Irrigation (mm)	196 5	302 4	150 5	161 0
渗漏或补给水量 Water percolation or upward (mm)	2 8	40 1	- 3 2	19 4
实际蒸散量 ETa (mm)	312 2	325 3	324 4	359 5

注：“-”表示水分补给;“+”表示水分渗漏。
Note: “-” stands for water replenishment; “+” stands for water percolation.

3 结 论

通过两年冬小麦的田间试验,比较分析了喷灌和地面灌溉条件下的土壤水分分布特征和水量平衡,初步得出以下结论:

- 1) 喷灌土壤水分的运动具有明显的非饱和土壤水分运动特征,土壤水分入渗分布较慢;地面灌溉土壤水分具有明显的饱和土壤水分运动特征。
- 2) 喷灌灌溉水主要分布在土壤表层 0~ 50cm 范围内,地面灌溉条件下灌溉水可达地表以下 150 cm 处。
- 3) 喷灌条件下,没有明显的水分渗漏发生;地面灌溉条件下,发生明显的水分渗漏,土壤水分渗漏量占灌溉水量的 10%左右。
- 4) 2003年和 2004年试验处理期间,喷灌条件下的蒸散量都小于地面灌溉条件下的蒸散量。

参 考 文 献:

[1] 《中国水利年鉴》编纂委员会. 中国水利年鉴[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003 450

[2] Diez J A, Roman R, Caballero R, et al. Nitrate leaching from

soils under a maize wheat maize sequence, two irrigation schedules and three types of fertilizers [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1997, 65: 189- 199

[3] Roman R, Bustos R, Diez J A, et al. Water and solutes movement under conventional corn in Central Spain. I. Water balance[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 1530- 1536

[4] Schepers J S, Varvel G E, Watts D G. Nitrogen and water management strategies to reduce nitrate leaching under irrigated maize[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1995, 20: 227- 239

[5] 赵竟成. 论喷灌是否节水[J]. 节水灌溉, 1999(5): 13- 17.

[6] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京:中国农业出版社, 2000 22- 24

[7] Van Genuchten M T. A close form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892- 898

[8] 龚元石,李保国. 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量[J]. 水科学进展, 1995, 6(1): 16- 21

[9] 刘海军. 喷灌条件下近地面气象要素分布特征及其对作物生长的影响[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2003

[10] 华 孟,王 坚. 土壤物理学[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1993 125

[11] 宫 飞,陈 阜,杨晓光,等. 喷灌对冬小麦水分利用的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(5): 30- 34

Soil water distribution characteristics and water balance in winter wheat field under sprinkler irrigation

SUN Ze qiang^{1, 2}, KANG Yue hu¹, LIU Hai jun¹
(¹Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, CAS, Beijing 100101, China;
²Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The characteristics of soil water distribution and soil water balance of winter wheat were

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

analyzed under sprinkler irrigation, with surface irrigation (border irrigation) as the control treatment. The experimental results indicated that the soil water movement under sprinkler irrigation appeared obviously the characteristics of unsaturated water movement, while that under surface irrigation presented the characteristics of saturated water movement. The irrigation water was distributed in 0~50 cm soil layer under sprinkler irrigation, and it could reach 150 cm layer below ground surface under surface irrigation. There was no obvious soil water percolation under sprinkler irrigation, but the rate of water percolation was about 10% of irrigation amount under surface irrigation. During the experiment periods in 2003 and 2004, the evapotranspiration of sprinkler irrigation was 312.2 mm and 324.4 mm, respectively, being 13.1 mm and 35.1 mm less than that of surface irrigation.

Key words: sprinkler irrigation; winter wheat; soil water distribution; water balance

(上接第 76 页)

Characteristics of nitrate distribution in deep unsaturated zone in farmland

FU Yu qin^{1, 2}, LEI Yu ping¹, ZHENG Li¹, ZHANG Li^{1, 2}

(¹Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetic and Developmental Biology, CAS, Shijiazhuang 050021, China; ²The Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: In this study, the Geoprobe(r) direct push system was employed to obtain 15 meters of continuous soil core samples from the deep unsaturated zone of the cropland in North China Plain, so as to analyze the nitrate concentration in the soil samples and evaluate the risk of groundwater contamination by chemical fertilizer in this area. The results showed that, in the tested soil samples of medium permeability, the nitrate could be leached into the depth of more than 15 meters below ground surface. The distribution of nitrate in the deep unsaturated zone in such a typical setting could be separate into three zones: medium concentration zone in the root absorption area, high concentration zone below the root absorption area and low concentration zone in the deep subsurface area. The nitrate concentration below the root absorption area was obviously higher than that in the root absorption area. Although the nitrate concentration in the deep subsurface area was low, its accumulation might be higher than that in the root zone, therefore, the underlying groundwater was highly threatened by contamination. Soil texture obviously impacted the distribution of nitrate concentration below the root absorption area; and the nitrate concentration distribution was positively correlated with the soil moisture content in the deep soil profile.

Key words: nitrate leaching; deep unsaturated zone; soil texture; soil moisture; groundwater contamination