

华北平原秸秆覆盖滴灌冬小麦 中后期耗水规律研究

王建东¹, 赵月芬², 张彦群¹, 龚时宏¹, 隋娟¹, 晏清洪¹

(1. 中国水利水电科学研究院 水利研究所, 北京 100048;

2. 中国水利水电科学研究院 北京中水科工程总公司, 北京 100048)

摘要: 基于 2013—2015 年华北平原典型区连续两年田间试验, 采用 Penman - Monteith 公式、FAO 单作物系数法以及水量平衡法, 研究分析了充分滴灌下秸秆覆盖与不覆盖对冬小麦棵间蒸发、耗水量、产量及水分利用效率的影响, 研究表明: 滴灌条件下秸秆覆盖显著抑制了日棵间蒸发量及其日变化波动幅度 ($P < 0.05$), 在冬小麦中后期相比不覆盖可减少棵间蒸发 30% 以上; 基于田间冬小麦的气孔阻力系数实测值, 采用 P - M 公式直接计算冬小麦日耗水量具有较高精度, 其值与 FAO 单作物系数法计算值具有较高相关性 ($R^2 > 0.8$); 秸秆覆盖滴灌减少了 7% ~ 15% 的灌溉定额, 但与不覆盖滴灌相比, 冬小麦日耗水量和生育期总耗水量不存在显著差异 ($P > 0.05$), 冬小麦 4—6 月份期间平均日耗水量在 4.0 ~ 4.5 mm·d⁻¹ 之间; 充分滴灌下秸秆覆盖并没有显著提高作物的产量和水分利用效率 ($P > 0.05$)。

关键词: 秸秆覆盖; 滴灌; 冬小麦; 耗水量; 产量; 水分利用效率; 华北平原

中图分类号: S275.6; S512.1⁺1 **文献标志码:** A

Research on the water consumption rule of winter wheat in middle and late stage by drip irrigation with straw-mulching in North China Plain

WANG Jian-dong¹, ZHAO Yue-fen², ZHANG Yan-qun¹, GONG Shi-hong¹, SUI Juan¹, YAN Qing-hong¹
(1. Irrigation and Drainage Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;
2. Beijing IWHR Corporation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: Based on the field experiments of two consecutive years (2013—2015) in North China Plain (NCP), using the Penman - Monteith Equation (P - M), FAO single crop coefficient method and water balance method, We researched and analyzed the influences of straw mulching and without mulching to the soil evaporation, water consumption, yield and water use efficiency(WUE) of winter wheat under full drip irrigation. The research results indicated that: The straw mulching under drip irrigation could notably restrained the daily soil evaporation and its fluctuation range ($P < 0.05$) compared with no mulching, the daily evaporation could be reduced more than 30% in middle and late period of winter wheat. Based on the field measured stomatal resistance coefficient of winter wheat, using the P - M formula to directly calculate the daily water consumption of winter wheat has possessed good accuracy. It has a high correlation with the calculated value by FAO single crop coefficient method ($R^2 > 0.8$). Though the irrigation norm could be decreased about 7% ~ 15% by straw mulching with drip irrigation, compared with no mulching and drip irrigation, the daily water consumption and total water consumption during growth period did not existed significant difference. The daily water consumption of winter wheat was between 4.0 mm·d⁻¹ to 4.5 mm·d⁻¹ during April to June. The crop yield and WUE were not significantly increased under full drip irrigation with straw mulching ($P > 0.05$).

Keywords: straw mulching; drip irrigation; winter wheat; water consumption; yield of winter wheat; WUE; North China Plain

收稿日期: 2016-05-10

修回日期: 2017-10-12

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2014BAD12B05); 国家自然科学基金项目(51279211, 51309250)

作者简介: 王建东(1978—), 男, 湖南茶陵人, 高级工程师, 博士, 主要从事节水灌溉原理与技术研究。E-mail: wangjd@iwhr.com。

通信作者: 赵月芬(1980—), 女, 江苏淮安人, 高级工程师, 主要从事节水灌溉技术与推广应用。E-mail: zhao801030@163.com。

由于水资源的短缺,在我国干旱和半干旱地区,在推广农膜或秸秆覆盖等农艺节水措施的同时,针对大田作物大力推广高效节水灌溉技术(如滴灌)已成为政府有关部门和用户的共识。秸秆覆盖等农艺措施具有改善农田水土环境、降低土壤蒸发等优点^[1-2],但如何与先进灌水技术模式相结合,实现作物优质高产目标下对其高效调控是亟待解决的科学难题。由于秸秆覆盖改变了土壤与大气的界面层状况,其与无覆盖下作物耗水、棵间蒸发或裸土蒸发过程存在本质区别。此外,滴灌作为一种局部灌水方式,其灌溉制度及供给作物水分的方式有别于地面灌水方式,与此相关的一些科学问题,如基于覆盖措施下滴灌对作物棵间蒸发、耗水及产量的影响机理等方面依然是田间高效节水灌溉技术研究的薄弱环节。

目前针对作物棵间蒸发、耗水机制方面的研究多数围绕地面灌水方式展开,主要侧重于采用蒸渗仪或微型蒸发器测定地面灌水方式下无覆盖或裸地下田间蒸散发及作物耗水的变化规律^[3-5],而针对覆盖条件下滴灌对作物棵间蒸发及耗水规律影响机理的研究相对较少。Zhou 等^[1]的研究表明,秸秆覆盖能提高作物产量,而 Chen 等^[6]的研究表明,相比传统不覆盖处理,秸秆覆盖地面灌水方式下华北典型区冬小麦产量和水分利用效率(WUE)并没有得到显著提高,产量甚至低于传统不覆盖处理。正如 Gajri 等^[7]的研究结果表明,覆盖下作物的产量相比不覆盖并不一定总是增加的,还与土壤类型及灌溉模式(灌溉方式与灌溉制度)等存在很大关系。

本研究以华北平原典型区的冬小麦为研究对象,基于连续两年的田间试验,旨在揭示充分滴灌条

件下秸秆覆盖对田间冬小麦棵间蒸发、作物耗水、产量及水分利用效率的影响机理,对于构建大田作物高效节水灌溉技术模式及其相关评价方法或标准具有重要的科学意义和实用价值。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验 2013—2015 年在北京市大兴区中国水利水电科学研究院大兴试验基地(39°39'N, 116°15'E)开展,当地气候属典型的半干旱大陆性季风气候,多年平均降雨量为 540 mm。试验田 0~100 cm 土层的土壤质地为壤土,0~100 cm 土层的平均田间体积持水率和土壤容重分别为 30.58% 和 1.58 g·cm⁻³,具体的分层土壤质地可参考相关文献^[8]。试验基地有自动气象站(Monitor Sensors, Caboolture QLD, Australia),可每隔 30 min 测定 2 m 高处的大气温度、风速、太阳辐射、降雨等气象参数。具体气象参数平均值参见表 1。

田间试验于 2013 年 10 月—2014 年 6 月和 2014 年 10 月—2015 年 6 月连续两年开展,以冬小麦为研究对象,供试冬小麦品种为中麦 175,2013—2014 和 2014—2015 年度试验分别于 10 月 11 日和 10 月 13 日人工播种,播种行距均为 30 cm,播种量 300 kg·hm⁻²,11 月末进行冬灌,灌水量为 67 mm。

1.2 试验设计

试验采用地表滴灌,滴灌系统灌水器选用以色列 Netafim 公司 Typhoon 型号滴灌带,额定流量为 1.1 L·h⁻¹,滴头间距为 30 cm,滴灌带布置间距为 60 cm。试验设计两个滴灌处理,分别为秸秆覆盖充分

表 1 2013—2015 年试验地冬小麦生育期气象参数平均值

Table 1 Average values of climatic factors in growing season of winter wheat during 2013 to 2015

月份 Month	大气温度/℃ Air temperature		太阳净辐射/(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹) Solar net radiation		平均风速/(m·s ⁻¹) Wind speed		降雨/mm Precipitation	
	2013—2014	2014—2015	2013—2014	2014—2015	2013—2014	2014—2015	2013—2014	2014—2015
10 Oct	12.25	12.86	3.71	3.22	0.66	0.53	9.40	12.95
11 Nov	4.69	5.10	0.90	1.03	1.06	0.66	0	0.76
12 Dec	-1.81	-1.96	-0.61	-0.30	1.01	0.93	0	0.76
1 Jan	-2.20	-1.88	-0.27	0.13	1.05	1.10	0	1.02
2 Feb	-1.52	0.32	1.45	1.06	1.20	1.17	5.59	8.38
3 Mar	8.81	7.77	4.81	3.51	1.40	1.48	7.62	3.56
4 Apr	15.84	14.78	8.06	7.28	0.97	1.52	27.94	32.00
5 May	20.94	20.73	10.28	9.83	1.08	1.12	36.83	36.07
6 June	24.21	24.20	11.43	8.77	0.43	0.88	50.8	16.51

滴灌处理(TM)和不覆盖充分滴灌处理(TN)。每个处理设置 4 个重复,随机布置,每个试验小区的面积是 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。TM 处理覆盖的秸秆来自粉碎后的玉米秸秆(5~10 cm 碎片),在冬小麦播种后 2~3 d 开始覆盖,覆盖厚度约为 2~3 cm,秸秆覆盖量约为 $6\ 000\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。TM 和 TN 处理的滴灌灌溉制度主要依据作物有效根区的水分下限来制定,即当作物有效根区的水分下限达到 65% 田间持水量时,开始灌水,灌溉上限为 100% 田间持水量,各生育期实际的灌水定额依据以下公式确定^[9]:

$$I = H(\theta_{up} - \theta_0)p_w/\eta \quad (1)$$

表 2 各处理灌水时间和灌水量

Table 2 The irrigation time and irrigation amount for each treatment

处理 Treatment	首次灌水 First irrigation		二次灌水 Second irrigation		三次灌水 Third irrigation		四次灌水 Fourth irrigation		五次灌水 Fifth irrigation		总灌水量 Total irrigation amount/mm
	灌水 日期 Irrigation date	灌水量 Irrigation amount /mm									
2014-TM	04-03	40.75	04-23	42.26	05-05	42.21	05-21	50.25		0	175.47
2014-TN	04-03	45.71	04-23	47.47	05-05	47.50	05-21	54.57		0	195.25
2015-TM	04-08	26.17	04-28	40.49	05-08	44.50	05-22	39.54	05-28	31.71	182.41
2015-TN	04-08	29.28	04-28	64.44	05-08	51.43	05-22	42.74	05-28	38.84	226.73

1.3 土壤棵间蒸发量测定

TM 和 TN 处理下的土壤蒸发 E_s 采用自制的微型蒸发器(MLS)和电子天平(精度 0.1 g, 换算成水深约为 0.0012 mm)进行测定,每个小区在滴头正下方随机安装 3~5 个 MLS,每隔 3~5 d 换一次土,灌溉或 > 5 mm 降雨后加换。每天下午 17:00—18:00 之间称量,两次称量结果之差即为蒸发水量损失,根据内桶截面积将其单位转换为 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。其中 MLS 由内桶和外桶组成,均由 PVC 管材制成,内桶外径 11 cm,壁厚 0.36 cm,高 15 cm,MLS 使用其它注意事项可参考文献^[11]。

1.4 冬小麦生育期总耗水量 ET_a 计算

冬小麦从播种到收获整个生育期内的总耗水量 ET_a 采用水量平衡方法计算:

$$ET_a = I + P - \Delta S - R - D \quad (2)$$

式中, ET_a 是生育期蒸发蒸腾总量(mm); I 是计算时间段灌水量(mm); P 是有效降水量(mm); ΔS 是研究时段开始和结束时的土壤含水率变化量; R 为地表径流损失(mm),本研究地表滴灌未形成地表积水,因此可忽略; D 是渗漏损失(mm),采用下式估算^[12]:

$$D = \alpha I_m \quad (3)$$

式中, I 是每次灌水定额(mm); H 是计划湿润层深度(mm), H 在出苗~拔节前期为 60 cm,后续生育期为 80 cm; θ_{up} 是灌水上限($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); θ_0 是灌水时土壤实际平均体积含水率($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$); p_w 是湿润比(滴灌取值 60%); η 是灌溉水利用系数(滴灌取值 90%)。TM 和 TN 处理被视为充分滴灌灌水,不存在水分胁迫效应^[8,10]。每个处理生育期第二次灌水时,采用文丘里施肥器追施尿素,施加的纯氮量为 $110\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,2014 和 2015 年冬小麦生育期各处理实际的灌水情况见表 2。

式中, α 是渗漏系数,主要受土壤质地及灌水定额影响,针对本试验地的土壤质地以及灌水定额, α 取值为 0.1; I_m 是每次灌水定额(mm)。

土壤含水率的测定是利用水量平衡法确定 ET_a 的关键。本研究土壤含水率采用田间取土、烘干法测定,每隔 3~5 d 取土一次,灌溉前后及中度和强度降雨后安排取土。取土时,每个处理各选两个小区,每个小区在干湿区域分别取两个样点,考虑到冬小麦的主根系范围在 0~100 cm,因此取土深度定为 1 m,按土层深度(0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)取土,烘干法测定土壤含水率。

1.5 冬小麦日耗水量 ET_d 计算

(1) P-M 公式计算方法

在 1948 年彭曼公式的基础上,经过后来学者的不断修正,提出了 Penman - Monteith (P - M) 公式^[13-14]:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (4)$$

式中, λET 是潜热($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); λ 为潜气化热($\approx 2.45 \times 10^6\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$); R_n 是太阳净辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); G 是土壤热通量($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); $(e_s - e_a)$ 代表空气饱和水汽压差

(kPa); ρ_a 是平均空气密度 ($\approx 1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_p 是空气比热 ($\approx 1013 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); Δ 代表饱和水汽压差与气温曲线的斜率 ($\text{kPa} \cdot \text{K}^{-1}$); γ 是干湿表常数 ($\approx 0.067 \text{ kPa} \cdot \text{K}^{-1}$); r_s 和 r_a 分别是冠层阻力系数和空气阻力系数 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)。其中, R_n 通过安装在冬小麦冠层上方 1 m 处的净辐射仪测定, G 通过安装在地表以下 5 cm 深度的热通量板, 同时结合同步测定通量板上层土壤温度和含水率等参数计算获得。其它气象因子由气象站获得。

如果能获得作物的冠层地表阻力系数 r_s 和空气阻力系数 r_a , 公式(4) 两边同时除以 λ , 就可以获得作物每天的实际蒸腾蒸发量 ET_d [14]。

空气阻力系数 r_a 通过下式计算 [14-15]:

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{Z_m - d}{Z_{om}}\right] \ln\left[\frac{Z_h - d}{Z_{oh}}\right]}{\kappa^2 u_z} \quad (5)$$

式中, Z_m 是风速测定高度 ($= 2 \text{ m}$); Z_h 是湿度测定高度 ($= 2 \text{ m}$); d 是动量零平面位置高度 (m , $d \approx 2/3$ 作物株高) [16-17]; Z_{om} 是控制动量转移的粗糙高度 (m , $Z_{om} = 0.123$ 作物株高) [18]; Z_{oh} 是控制水汽转移的粗糙高度 (m , $Z_{oh} = 0.1Z_{om}$) [18], k 是 Karman 常数 ($= 0.41$); U_z 是风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

冠层地表阻力系数 r_s 通过如下公式计算 [14,19]:

$$r_s = \frac{r_l}{LAI_{eff}} \quad (6)$$

式中, r_l 是充分光照叶片的气孔阻力系数, 即为叶片气孔导度的倒数 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); LAI_{eff} 是参与热量交换的有效叶面积指数。

许多研究表明 [13,20-22], 基于 P - M 公式计算的作物 ET 值对 r_l 的变化具有较低的敏感度, 尽管 r_l 是随着一天或者不同生育期中太阳辐射、气温及水汽压梯度等因素的变化而变化 [20-21], 在使用 P - M 公式计算作物 ET 时, 科研人员依然将 r_l 采用某个定值来处理 [19]。在本研究中, 冬小麦的 r_l 通过 Li - Cor 6400 光合系统 (Li - cor Company, USA) 测定叶片的气孔导度而获得, 在每个冬小麦的生育期, 选择 4 个晴天, 每天测定时间为 8:00、10:00、12:00 和 14:00、16:00, 4 d 平均的气孔阻力系数 r_l 值用于该生育阶段计算冬小麦 r_s 。

LAI_{eff} 通过以下公式计算 [23]:

$$LAI_{eff} = \frac{LAI}{0.3LAI + 1.2} \quad (7)$$

其中, 冬小麦不同生育期叶面积指数 LAI 通过测定田间实地测量获得, 采用比叶重法的鲜重法, 测定时

每个处理选两个小区, 每个小区选两行具有代表性的植株割取 5 cm, 共割取 20 cm。剪下全部鲜叶片, 称鲜重, 再选取大、中、小三个类型的叶片各 5 片, 称鲜重, 用 Cannon 叶面积扫描仪求得其叶面积, 计算比叶重 (鲜叶重/鲜叶叶面积, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), 其它相关注意事项可参考相关文献 [8]。

(2) FAO 单作物系数方法

单作物系数法是 FAO 组织推荐的具有一定精度且计算作物需水量较为简便的一种方法。刘钰等 [24] 针对华北地区的冬小麦的研究验证了该方法具有较高的精度。本研究采取 FAO 推荐的单作物系数方法计算 2014 年和 2015 年冬小麦生育期 4—6 月之间的日耗水量, 并与 P - M 公式的计算结果进行了拟合比较。采用单作物系数计算方法时, 首先需要从 FAO56 的相关表中查出冬小麦在生育期不同阶段的作物系数值, 生长初期为 $Kc_{ini(Tab)} = 0.7$, 生长中期为 $Kc_{mid(Tab)} = 1.15$, 生长末期为 $Kc_{end(Tab)} = 0.4$, 并按大兴地区的气候条件, 根据相关公式分别校正 Kc_{mid} 和 Kc_{end} , 具体计算公式及步骤可参见文献 [14,24]。同时参考刘海军等 [25] 针对北京通州地区冬小麦拔节和抽穗期作物系数的研究成果, 最终调整确定大兴地区冬小麦生长中期 $Kc_{mid(Tab)} = 1.25$ 。需要注意的是, 在冬小麦生长初期, 棵间蒸发占总腾发量比例较大, 因此计算 $Kc_{ini(Tab)}$ 时必须考虑土面蒸发的影响, 同时需要进一步考虑土壤质地、灌水频率、灌水定额以及滴灌湿润范围 (本研究中滴灌系统为 60%) 等参数, 参考 FAO56 中相关图表进一步修正生长初期作物系数值 $Kc_{ini(Tab)}$ 。最后基于作物参考系数和参考作物腾发量 ET_0 , 即可得到冬小麦日耗水量。

1.6 水分利用效率 (WUE) 计算

冬小麦收获时, 在每个小区的中心位置选择 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的面积进行收割测产, 所测产量均为晒干后 (水分含量大约 10%) 麦粒重量。水分利用效率 (WUE) 计算公式如下 [8], 所有试验数据采用 Excel 2007 作图和 SPSS 软件进行统计和方差分析。

$$WUE = \frac{Y}{ET_a} \times 0.1 \quad (8)$$

式中, WUE 为水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y 是小麦晒干后产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_a 是冬小麦整个生育期内耗水量 (mm)。

2 结果分析与讨论

2.1 棵间蒸发变化规律

华北地区的冬小麦一般都在 3 月下旬开始进入

返青阶段,因此本研究主要针对冬小麦4—6月生育期间的日棵间蒸发开展测定分析。由图1和图2可知,4—6月份期间,不覆盖处理(TN)和覆盖处理(TM)下的日棵间蒸发具有相似的变化趋势,这与TN和TM处理下相近的灌溉制度和相同的大气环境密切相关。但由于受到秸秆覆盖的影响,TM处理下的日棵间蒸发波动幅度明显小于TN处理,棵间蒸发日平均值也显著小于TN处理(表3)。在灌水或者显著

降雨后,土壤含水率增加,之后大部分的日棵间蒸发都会呈现先增大而后随着土壤含水率的减少而降低的现象,这说明土壤蒸发与土壤含水率存在明显正相关,但在灌溉后有些日期没有出现土壤蒸发明显增大的情况,这与灌后的天气状况密切相关,如在2014年5月21日灌水后第二天(图1),即5月22日出现阴天,太阳净辐射明显降低,尽管土壤含水率明显提高,但土壤蒸发量并没有出现明显增大。

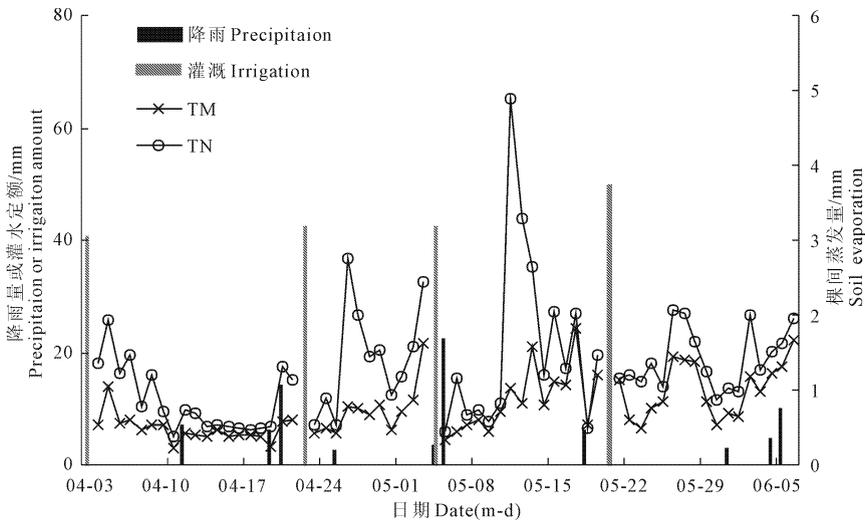


图1 2014年4—6月份降雨、灌溉和TM和TN处理下日棵间蒸发变化

Fig.1 The change of precipitation, irrigation and daily soil evaporation under TM and TN treatments during April to June in 2014

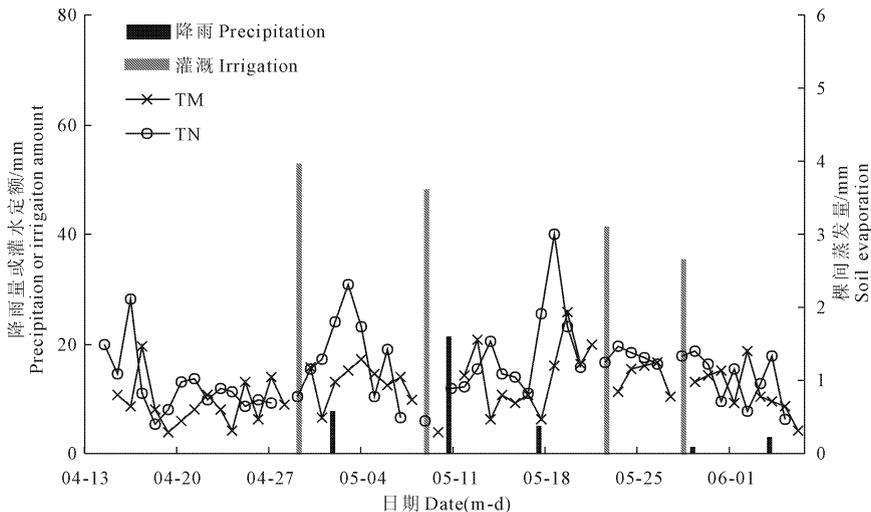


图2 2015年4—6月份降雨、灌溉和TM和TN处理下日棵间蒸发变化

Fig.2 The change of precipitation, irrigation and daily soil evaporation under TM and TN treatments during April to June in 2015

由表3进一步分析可知,2014年和2015年TM处理下4—6月份平均日蒸发量分别为0.84 mm和0.85 mm,而TN处理下的平均日蒸发量则分别达到1.33 mm和1.24 mm,2014年和2015年覆盖滴灌处理比不覆盖滴灌处理棵间蒸发减幅分别达到了36.84%和31.45%。由此可见,秸秆覆盖显著抑制

了田间棵间蒸发。从不同生育期覆盖抑制蒸发比例的变化分析可知,在拔节~抽穗生育阶段,秸秆覆盖对棵间蒸发的抑制效果要大于其它生育阶段,其原因主要是随作物生长,叶面积对棵间土壤的遮盖率不断提高,同比不覆盖处理,生育中后期秸秆覆盖对蒸发的抑制效果有所减弱。

表 3 2014 和 2015 年 4—6 月份 TM 和 TN 处理下分生育期日平均棵间蒸发值比较/($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)Table 3 The comparison of mean daily E_s under mulch (TM) and no-mulch (TN) treatments from April to June in 2014 and 2015

处理 Treatment	拔节~抽穗 Stem~elongation		抽穗~灌浆 Heading		灌浆~成熟 Grain~filling		生育期平均(4—6月) Average value from April to June	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015	2014	2015
TM	0.56a	0.62a	0.96a	1.00a	1.00a	0.93a	0.84a	0.85a
TN	1.01b	0.96b	1.55b	1.44b	1.43b	1.32b	1.33b	1.24b
TM 抑制蒸发比 Decreasing ratio/%	44.55	35.42	38.06	30.56	30.07	29.55	36.84	31.45

注:表中同列中具有不同字母表示数值间差异显著($P>0.05$)。下同。

Note: The column with different letter means significant difference($P>0.05$). The same as below.

2.2 冬小麦日耗水量 ET_d 计算比较

从图 3 和图 4 可以看出,基于 P-M 公式计算的日蒸腾蒸发量(ET_{PM})和基于 FAO 单作物系数法计算的日蒸腾蒸发量(ET_{sc})具有较高的相关性,无论是 TM 还是 TN 处理,2014 年和 2015 年拟合回归结果显示, ET_{sc} 和 ET_{PM} 之间的线性回归方程的相关性参数 R^2 均大于 0.80。采用 P-M 公式直接计算作物耗水量,除了需要获得太阳净辐射、风速、饱和水汽压差等气象因子外,更为重要的是如何获取所在试验地块作物的冠层阻力系数和空气阻力系数值。P-M 模型将植被冠层看成位于动量源汇处的一片大叶,将植被冠层和土壤当作一层,属于单源模型,该模型可以较好地估算稠密冠层的实际蒸发蒸腾量^[26]。相比传统地面灌和不覆盖而言,滴灌和秸秆覆盖措施在一定程度上改变了农田小气候和农田中的能量分配,这些改变反过来会影响作物蒸腾关键因子的变化,比如,气孔阻力系数,这也是 P-M 公式中需要获得的重要参数。因此,利用先进光合

系统测定滴灌覆盖和不覆盖下冬小麦不同生育期气孔阻力系数,结合农田中气象参数可以直接计算获得滴灌覆盖和不覆盖各处理的日耗水量。鉴于 FAO 单作物系数法是一种比较可靠的用于计算华北地区无水分亏缺条件下冬小麦耗水量的方法^[27],因此可认为此方法具有较高的精度和可靠度,这种方法的难度在于需要全生育期监测作物的气孔阻力系数以获得计算作物耗水量所需的地表冠层阻力系数,但可为田间相关试验研究工作提供参考。

表 4 进一步比较了 4—6 月份期间基于 P-M 方法、FAO 单作物系数法和水量平衡方法算得的冬小麦平均日耗水量,2014 年和 2015 年的比较结果表明,基于 P-M 方法和水量平衡方法算得的冬小麦平均日耗水量相对比较接近,且不存在显著差异,但都要大于 FAO 单作物系数法获得的平均日耗水量,且两年中水量平衡方法获得的冬小麦平均日耗水量显著大于 2014 年 FAO 单作物系数法所获得值。水量平衡法是一种较为准确计算较长周期内作物耗水

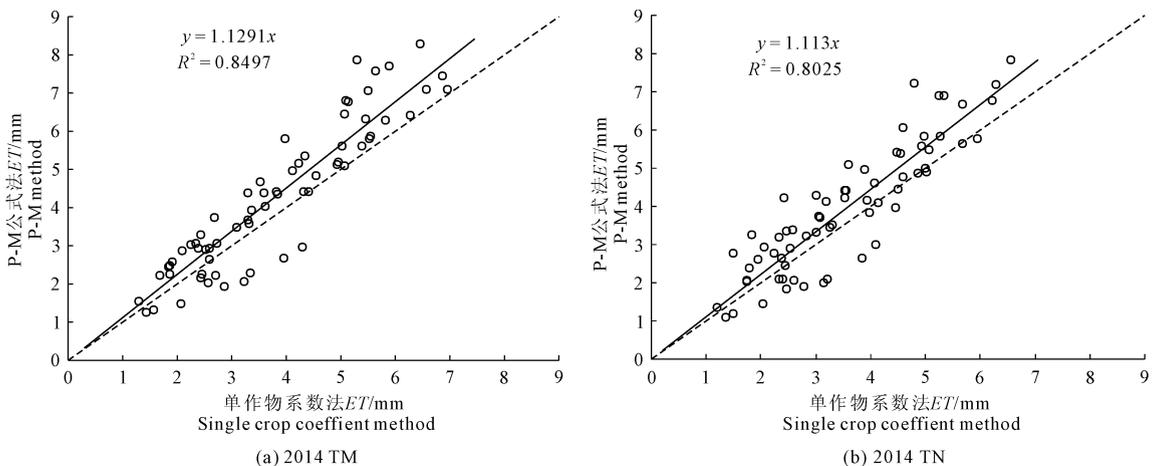
图 3 2014 年 TM 和 TN 处理下单作物系数法与 P-M 公式法冬小麦 ET_d 计算拟合比较(4—6 月)

Fig. 3 The fitting comparison of ET_d of winter wheat by single crop coefficient method and P-M method under TM and TN treatments in 2014

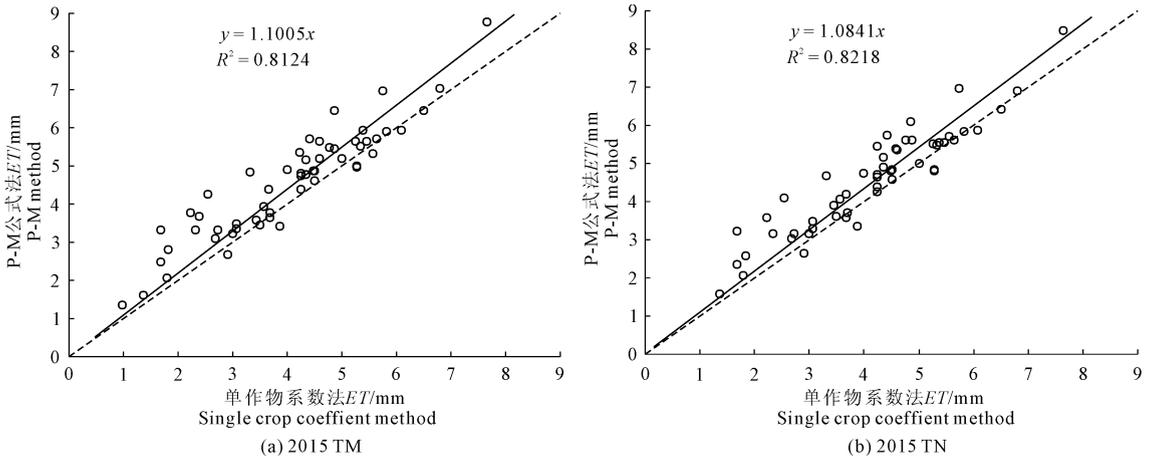


图4 2015年TM和TN处理下单作物系数法与P-M公式法冬小麦 ET_d 计算拟合比较(4—6月)

Fig.4 The fitting comparison of ET_d of winter wheat by single coefficient method and P-M method under TM and TN treatments in 2015

表4 P-M公式和单作物系数法及水量平衡法下冬小麦平均日耗水量 ET_d 比较(4—6月)/($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 4 The comparison of mean daily ET_d of winter wheat by P-M, single crop coefficient and water balance methods from April to June

处理 Treatment	P-M公式 P-M equation		FAO单作物系数方法 FAO single coefficient method		水量平衡法 Water balance method	
	2014	2015	2014	2015	2014	2015
TM	4.04ab	4.38a	3.81b	4.05ab	4.31a	4.28a
TN	4.16ab	4.41a	3.89b	4.08ab	4.42a	4.45a

量的最基本方法^[25],本研究基于水量平衡法计算出4—6月期间的冬小麦耗水量,进而获得4—6月期间平均日耗水量。因此,可认为基于P-M方法和水量平衡方法算得的冬小麦平均日耗水量更能代表本典型试验区冬小麦实际平均日耗水情况。采用FAO单作物系数方法获得的日耗水量值稍低于其它两种方法,或许存在低估大兴地区冬小麦关键生育阶段参考作物系数值的可能性,还需要进一步的研究。

基于P-M方法和水量平衡方法计算结果,对于充分滴灌下覆盖处理TM和不覆盖处理TN,2014和2015年的4—6月份期间冬小麦日耗水量 ET_d 在4.0~4.5 mm之间,从两年中各种计算方法的比较结果来看,2014和2015年的4—6月份期间覆盖处理下的平均日耗水量均要略微小于不覆盖处理,但不存在显著差异,因此可以推断,尽管覆盖显著降低了棵间蒸发,但同时也明显增加了作物蒸腾,这也是覆盖和不覆盖处理下作物耗水量不存在显著差异的主要原因。

2.3 冬小麦水分利用效率和产量

基于水量平衡方法获得2013—2014年和

2014—2015年冬小麦这整个生育期内的总耗水量 ET_a 。由表5可知,2014年覆盖处理TM比不覆盖处理TN灌溉定额同比减少19 mm,减少比例为7.3%,2015年同比减少45 mm,减少比例为15.3%。而2014年和2015年覆盖处理比不覆盖处理的生育期耗水量 ET_a 减少比例分别只有2.3%和3.3%。由表6可知,2014和2015年TM和TN处理下的冬小麦全生育期内的总耗水量 ET_a 均不存在显著差异,这进一步验证了秸秆覆盖措施增加了作物蒸腾量的结论,其原因很可能是覆盖后的农田小气候环境发生了改变,而这在一定程度上引起能量平衡的再分布,增加了用于作物腾发的潜热。当然,由于作物腾发受到太阳辐射、农田小气候、土壤供水等多因素的影响,秸秆覆盖提高了作物蒸腾量的内在机理还需进一步明晰。

TM和TN处理两年的平均冬小麦产量分别为5 744 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和5 847 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,不存在显著差异,这两年当中,最大的产量值来自2015年的TN处理,最小的产量值来自2014年的TM处理,2014年TM处理的产量比TN处理少1.4%,2015年则少了2.2%。TM和TN处理两年的平均冬小麦水分利用

率分别为 $1.53 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 不存在显著差异, 其中最大的 WUE 值来自 2015 年的 TM 处理, 最小的 WUE 值来自 2014 年的 TN 处理。

总体而言, 充分滴灌条件下, 相比不覆盖处理, 尽管秸秆覆盖能减少 7% ~ 15% 的灌溉定额, 也减少冬小麦生育期耗水量 ET_a , 提高了水分利用效率 WUE, 但都没有达到显著水平 ($P > 0.05$), 换言之, 充分滴灌下秸秆覆盖并没有显著提升作物的产量和水分利用效率。这一结论与 Chen and Zhang^[6] 针对华北典型区冬小麦地面灌措施下得到的试验结论相吻合。尽管覆盖减少了棵间蒸发, 但同时增加了作

物的蒸腾, 并没有显著改变作物耗水总量。从这个结论来讲, 如果华北地区冬小麦采用秸秆覆盖 + 滴灌技术措施的话, 需要进一步采用非充分滴灌灌溉制度, 以达到秸秆覆盖与滴灌最优的组合效益, 但这也需要进一步的试验研究和论证。此外, 尽管两年的田间试验数据表明, 充分滴灌下秸秆覆盖并没有显著提升作物的产量和水分利用效率, 但长时间连续覆盖下秸秆腐化对土壤肥力的改善或许是作物潜在增产的积极因素, 这也是今后需要进一步跟踪和研究的内容。

表 5 2013—2015 年 TM 和 TN 处理冬小麦生育期土壤水分变化及总耗水量

Table 5 Change of soil moisture and total water consumption in growing season of winter wheat under TM and TN treatments during 2013—2015

处理 Treatment	灌溉定额/mm Irrigation norm	降雨 P/mm Precipitation	土壤水分变化 ΔS /mm Soil moisture change	水分渗漏量 D/mm Seepage water	生育期总耗水量 ET_a /mm Total water consumption in growing season
2013—10—2014—06					
TM	243	104	-61	33	375
TN	262	104	-51	33	384
2014—10—2015—06					
TM	249	111	-51	34	377
TN	294	111	-23	38	390

表 6 2014 和 2015 年 TM 和 TN 处理冬小麦水分利用效率和产量比较

Table 6 Comparison of water-use efficiency and yield of winter wheat under TM and TN treatments in 2014 and 2015

处理 Treatment	ET_a /mm			产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			水分利用效率 WUE/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)		
	2014	2015	平均值 Average	2014	2015	平均值 Average	2014	2015	平均值 Average
TM	375a	377a	376a	5589a	5899a	5744a	1.50a	1.56a	1.53a
TN	384a	390a	387a	5667a	6027a	5847a	1.48a	1.55a	1.52a

3 结 论

基于 2013—2015 田间冬小麦连续两年的试验, 研究了秸秆覆盖与不覆盖下充分滴灌对冬小麦棵间蒸发、耗水量、水分利用效率和产量的影响, 主要结论如下:

(1) 滴灌条件下秸秆覆盖显著抑制了日棵间蒸发量及其日变化波动幅度 ($P < 0.05$), 在冬小麦生育中后期秸秆覆盖滴灌处理下比不覆盖可减少棵间蒸发达 30% 以上。

(2) 基于田间冬小麦的气孔阻力系数实测值, 采用 P-M 公式直接计算冬小麦日耗水量具有较高的精度和可靠度, 与 FAO 单作物系数方法所获得值具有较高相关性 ($R^2 > 0.8$); 覆盖和不覆盖滴灌处

理间的冬小麦日耗水量不存在显著差异, 2014 和 2015 年 4—6 月份期间冬小麦平均日耗水量在 $4.0 \sim 4.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。

(3) 充分滴灌条件下, 相比滴灌不覆盖, 秸秆覆盖滴灌减少了 7% ~ 15% 的灌溉定额, 也减少冬小麦生育期总耗水量, 提高了水分利用效率, 但都没有达到统计意义上的显著水平 ($P > 0.05$)。

参 考 文 献:

- [1] Zhou J, Wang C, Zhang H, et al. Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat - summer maize cropping system[J]. Field Crops Research, 2011, 122(2): 157-163.
- [2] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6):

- 1149-1157.
- [3] 刘昌明,张喜英,由懋正.大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J].水利学报,1998,29(10):36-39.
- [4] 刘 钰,R M Fernando, L S Pereira. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J].水利学报,1999,21(6):36-41.
- [5] 孙宏勇,刘昌明,张永强,等.微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J].水利学报,2004,35(8):114-118.
- [6] Chen S Y, Zhang X Y, Pei D. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat; Field experiments on the North China Plain[J]. Ann Appl Biol, 2007,150:261-268.
- [7] Gajri P R, Arora V K, Chaudhary M R. Maize growth responses to deep tillage, straw mulching and farmyard manure in coarse textured soils of NW India[J]. Soil Use Manage, 1994,10:15-20.
- [8] Wang Jiandong, Gong Shihong, Xu Di. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain [J]. Irrigation Science, 2013,31:1025-1037.
- [9] 陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:359-363.
- [10] 史宝成.作物缺水诊断指标及灌溉控制指标的研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2006.
- [11] 张彦群,王建东,龚时宏,等.滴灌条件下冬小麦田间土壤蒸发的测定和模拟[J].农业工程学报,2014,30(7):91-98.
- [12] Zhang H, Oweis T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region [J]. Agric Water Manage, 1999,38:195-211.
- [13] Monteith J L. Evaporation and environment [C]//Fogg G E. The State and Movement of Water in Living Organisms. Symposium of the Society for Experimental Biology 19, 1965:205-234.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage No. 56[R]. Rome Italy: United Nations – Food and Agricultural Organization, 1998:300.
- [15] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agron J, 1989,81:650-662.
- [16] Plate E J. Aerodynamic characteristics of atmospheric boundary layers [M]. Washington D C: AEC Critical Review Series. Atomic Energy Commission, Div. Tech. Info. U.S.Gov. Print. Office, 1971.
- [17] Monteith J L. Evaporation and surface temperature[J]. Q. J. R. Meteorol Soc, 1981,107:1-27.
- [18] Brutsaert W H. Evaporation into the atmosphere; Theory, history and applications[M]. Boston, MA: D Reidel Publ Co., 1982.
- [19] Allen R G, Pruitt W O, Wright J L, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_o by the FAO56 Penman-Monteith method[J]. Agricultural Water Management, 2006,81:1-22.
- [20] Stewart J B. On the use of the Penman – Monteith equation for determining areal evapotranspiration[C]//Black T A, Spittlehouse D L, Novak M D. Estimation of Areal Evapotranspiration, IAHS Publisher, 1989:3-12.
- [21] Price D T, Black T A. Estimation of forest transpiration and CO_2 uptake using the Penman – Monteith equation and a physiological photosynthesis model[C]//Black T A, Spittlehouse D A, Novak M D. Estimation of Areal Evapotranspiration, IAHS Publisher, 1989:213-227.
- [22] Allen R G, Pruitt W O, Businger J A, et al. Evaporation and transpiration[C]//Wootton. ASCE Handbook of Hydrology, New York, NY. 1996:125-252.
- [23] Ben – Mehrez M, Taconet O, Vidal – Madjar D, et al. Estimation of stomatal resistance and canopy evaporation during the HAPEX – MOBILHY experiment[J]. Agric for Meteorol, 1992,58:285-313.
- [24] 刘 钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证 [J].农业工程学报,2000,16(5):91-98.
- [25] 刘海军,康跃虎.冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J].农业工程学报,2006,22(10):52-56.
- [26] 张宝忠.干旱荒漠绿洲葡萄园水热传输机制与蒸发蒸腾估算方法研究[D].北京:中国农业大学,2009.
- [27] Li S, Kang S Z, Zhang L, et al. A comparison of three methods for determining vineyard evapotranspiration in the arid desert regions of northwest China[J]. Hydrological Processes, 2008,22(23):4554-4564.