

滴灌条件下秸秆覆盖与施肥对夏玉米水肥利用效率的影响

张婉晴, 王秀茹, 周 杨

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为探索秸秆覆盖与滴灌施肥结合栽培模式下夏玉米水肥利用效率和增产效果, 于 2014—2015 年在北京市大兴区进行无施肥覆盖(T1)、无施肥不覆盖(T2)、中肥覆盖(T3)、中肥不覆盖(T4)、高肥覆盖(T5)和高肥不覆盖(T6) 6 种试验。结果表明: 表层土壤温度和气温具有高度线性相关关系, 秸秆覆盖可降低夏玉米生长季土壤温度的增温速率, T1、T3 和 T5 较 T2、T4 和 T6 处理的土壤增温速率分别降低 23.62%, 13.65% 和 11.47%, 全生育期秸秆覆盖较不覆盖日均土壤温度平均降低 1.75℃; 滴灌条件下秸秆覆盖影响 0—60 cm 土层的水分分布变化, 对 0—20 cm 土层土壤含水率保水效果明显, 2014 年秸秆覆盖较不覆盖土壤含水率平均提高 11.73%, 2015 年平均提高 9.56%; 秸秆覆盖下 E/ET 较不覆盖平均减少 6.99%, 生育期内抽雄—灌浆阶段夏玉米耗水强度最高; 2 年试验 T3 获得籽粒产量最高, 较 T2 提高 27.62%, 较 T6 提高 15.83%, 同时水分利用效率和肥料偏生产力表现最优, 分别为 23.73 kg/(hm²·mm) 和 40.33 kg/kg。本研究表明滴灌条件下中肥覆盖对表层土壤具有降低增温速率的效应, 起到增产的同时对提高水分利用效率和肥料偏生产力的作用较优。

关键词: 秸秆覆盖; 滴灌施肥; 土壤水分; 土壤温度; 产量

中图分类号: S513; S318 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)06-0139-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.06.025

Effects of Straw Mulching and Fertilization on Water and Nitrogen Use Efficiency of Summer Maize

ZHANG Wanqing, WANG Xiuru, ZHOU Yang

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Research on effects of fertilization with mulching on water and nitrogen use efficiency in the field and maize yield is of great significance to increasing crop yield. For better understanding the effects of drip fertigation with straw mulching on water and nitrogen use efficiency under heat conditions in the field and summer maize yield in semi-humid regions, field experiments were carried out in Daxing district of Beijing city, China, during the growing seasons of summer maize in 2014 and 2015. In the experiments, six treatments, including no fertilization with straw mulching (T1), no fertilization without straw mulching (T2), middle fertilization with straw mulching (T3), middle fertilization without straw mulching (T4), high fertilization with straw mulching (T5), and high fertilization without straw mulching (T6) were tested. The results showed that surface soil temperature and air temperature had a high linear correlation, and straw mulching could reduce soil warming rate during the growing season of summer maize. Compared with that in T2, T4 and T6, soil warming rate in T1, T3 and T5 decreased by 23.62%, 13.65% and 11.47%, respectively. During the whole growing season, average daily soil temperature in treatments with straw mulching was 1.75℃ lower than that in treatments without straw mulching. Under drip irrigation, straw mulching could affect the distribution of soil moisture in the 0—60 cm soil layer, especially for soil moisture content of the 0—20 cm soil layer. In 2014, average soil water content was increased by 11.73%, and the average increase was 9.56% in 2015. In treatments with straw mulching, E/ET was decreased by 6.99% on average when compared with treatments without straw mulching, and water consumption of summer maize was the highest from the heading to grain-filling stage. The results indicated that T3 had the highest grain yield, being 27.62% higher compared with that of T2, and 15.83% higher than that of T6, T3 also showed optimal water use efficiency

and fertilizer partial productivity, which was 23.73 kg/(hm² · mm) and 40.33 kg/kg, respectively. In conclusion, middle fertilization with straw mulching can reduce soil warming rate under drip irrigation, it can increase maize yield and at the same time show optimal water use efficiency and fertilizer partial productivity.

Keywords: straw mulching; drip fertigation; soil moisture; soil temperature; yield

秸秆覆盖是一种古老的耕作保墒措施,大量文献表明通过秸秆覆盖可改善土壤物理条件,阻断土壤蒸发面与土壤毛管的联通,发挥抑制蒸发的作用,增加降雨的入渗,达到蓄水保墒的效果^[1-3]。员学锋等^[4]对秸秆覆盖免耕条件下的农田效应研究中发现覆盖处理 0—50 cm 的土壤含水率要明显高于不覆盖,地表温度日变化趋于稳定,日温差最大值为 12.43 ℃,对照则为 50.03 ℃;Li 等^[5]在我国旱作地区进行的玉米大田试验研究发现秸秆覆盖和地膜覆盖比不覆盖平均减少土壤蒸发 10%~15%。

滴灌作为一种高效灌溉技术,可以将水、肥送到作物根部进行局部灌溉,为作物生长创造适宜的水分和养分条件,使作物充分吸收,提高水肥利用效率^[6],具有增产潜力^[7]。国内外关于滴灌增产效果的研究有很多,主要以棉花、油葵、果蔬等经济作物为研究对象^[2,8-10],对玉米等粮食作物采用滴灌技术进行节水增产的研究报道较少,特别是与在华北地区广泛采用的秸秆覆盖措施结合。本文通过在华北地区连续 2 年的田间试验的监测数据,分析研究了秸秆覆盖与滴灌施肥对土壤水热分布、夏玉米耗水规律以及产量的影响,并分析了秸秆覆盖与滴灌的节水增产机理的关系。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2014 年、2015 年 6—10 月,在北京市大兴区境内(39°39'N,116°15'E)进行。该区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,海拔 40.1 m,年均风速 1.4 m/s,年平均温度 11.5 ℃,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,多年

平均降雨量 568.9 mm,降雨主要集中在 6—9 月份;试验地土壤质地为壤土,土壤容重为 1.57 g/cm³,0—100 cm 土层的平均田间持水率为 33%(体积含水率)。

1.2 试验材料与设计

田间试验分别设置无施肥覆盖、无施肥不覆盖、中肥覆盖、中肥不覆盖、高肥覆盖和高肥不覆盖,共 6 种组合情况,每种情况重复 4 次,共 24 个小区,随机区组排列。试验小区长 6.3 m,宽 4.4 m,面积为 27.72 m²。全部采用滴灌灌溉方式,设置在试验小区的部首量水设备控制灌溉水量,每个小区铺设 4 条滴灌带,位于作物中间,为确保作物出苗率和正常生长,以田间持水量的 75%~100%作为灌水上下限控制灌水量及灌水时间,灌水时间及灌水量见表 1。

供试夏玉米品种为“联科 96”,播种量 50 kg/hm²,采取人工方式种植玉米按穴播种,株距 0.3 m,行距 0.6 m,试验小区定植 168 株。试验小区覆盖处理所用的秸秆为当年冬小麦收割后留存,覆盖量为 5 500 kg/hm²。为保证作物生长,施肥选用尿素(总含氮量≥46.4%),中施肥 100 kg/hm²,高施肥 200 kg/hm²。

1.3 试验内容与计算

1.3.1 土壤温度 2014 年生长季 10 cm 土壤温度由 TRM—ZS1 型农业气象生态环境检测系统测得,2015 年生长季 10 cm 土壤温度由 5TM 型土壤温度传感器测得,温度探头埋设在试验小区夏玉米行内株间,以地表面为土壤深度起始点,温度探头在试验开始前进行温度校正,确保温度误差在±0.1 ℃间,数据记录时间间隔 30 min,计算逐日的温度。

表 1 实际灌水时间及灌水量 mm

处理 编号	处理	2014 年			2015 年	
		第一次灌水	第二次灌水	第三次灌水	第一次灌水	第二次灌水
		(7 月 16 日)	(8 月 15 日)	(9 月 3 日)	(8 月 15 日)	(9 月 3 日)
T1	无施肥覆盖	32.0	42.1	32.9	45.5	50.1
T2	无施肥不覆盖	32.8	42.0	33.0	45.7	50.8
T3	中肥覆盖	32.5	43.0	32.6	44.9	51.0
T4	中肥不覆盖	32.5	41.2	33.0	45.0	50.5
T5	高肥覆盖	31.3	42.3	33.5	44.5	50.9
T6	高肥不覆盖	32.0	42.3	33.1	43.8	50.6

1.3.2 土壤含水率 试验采用滴灌,前人研究表明滴灌对土壤 60 cm 以下深度土壤水分影响较小,且玉米根系主要集中于 20—60 cm 土层^[11-12],因此分别测量 0—20,20—40,40—60 cm 土层土壤体积含水率,土壤含水率采用土壤水分传感器测定,每个处理选取 2 个小区,逐日测量,各土层土壤储水量计算为:

$$W_i = \sum (\Delta\theta_i \times Z_i)$$

式中: W_i 为土壤 i 层土壤储水量(mm); $\Delta\theta_i$ 为土壤 i 层体积含水率(%); Z_i 为土壤 i 层的厚度(mm); i 为土壤层次。

根据水量平衡原理,计算各生育期夏玉米土壤耗水量,计算公式为:

$$ET=I+P+U-R-D-\Delta W$$

式中:ET 为土壤耗水量(mm);I 为灌水量(mm);P 为实际降雨量(mm);U 为地下水补给量(mm);R 为径流量(mm);D 为深层渗漏量(mm);ΔW 为阶段内 0—60 cm 土壤水分变化量(mm)。由于地表未形成积水,径流量 R 和深层渗漏量 D 可忽略不计;由于本试验区域地下水埋藏较深,地下水补给量 U 影响很小,也可忽略不计。因此有:

$$ET=I+P-\Delta W$$

实际降雨量 P 数据来源于田间自动气象站,每 30 min 采集 1 次。灌水量根据试验小区部首的量水设备读数计取。

1.3.3 土壤蒸发量 土壤蒸发量用微型蒸发器(Micro-lysimeter,MLS)测定。MLS 由 PVC 管制成,内筒内径 11 cm,壁厚 0.30 cm,高 15 cm,用于取土,外筒内径 12 cm,高度与内筒相同,与田间土面持平。每日对内筒进行称量,各 MLS 内原状土每 5~7 d 或单次降雨量>5 mm 时和灌水后进行换土,以保证 MLS 内土壤含水率与田间持水率一致。前后两日称量差值为土壤蒸发损失,根据内筒面积换算求得逐日土壤蒸发量。

1.3.4 产量测定 在收获期,各试验小区计产量,测定其产量和百粒重并折合每公顷产量。

1.3.5 指标计算方法 耗水特征^[10]计算公式为:
耗水强度(CI)=生育阶段耗水量/生育阶段持续天数

水分利用效率计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$

肥料偏生产力^[9]计算公式为:

$$PFP=Y/F_T$$

式中:WUE 为水分利用效率(kg/(hm²·mm));Y 为作物籽粒产量(kg/hm²);PFP 为肥料偏生产力(kg/kg);F_T 为投入的肥料总量(kg/hm²)。

1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 22.0 统计分析软件进行数据处理和统计分析,对不同处理指标先取小区平均值,然后对重复值进行方差分析,如果差异显著(P<0.05),进行 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤温度动态变化

2.1.1 夏玉米生育期内土壤日温度变化 由图 1 可知,各处理 10 cm 土层土壤温度变化规律基本一致,全生育期土壤温度整体呈下降趋势。土壤温度受多种因素影响,其中气温变化是影响表层土壤温度的重要因子之一,土壤温度整体高于气温。受夏玉米生长影响,在灌浆(8 月 15 日)以前,根系尚不发达,叶面

积较小,土壤表层受太阳辐射影响较大,土壤温度较高,与气温的温差较小;进入灌浆阶段后,株高、叶面积指数达到最高,地表受太阳直接辐射面积减小,根系生长发达、分布广,土壤温度受气温影响变小,因此土壤温度与气温的温差变大。

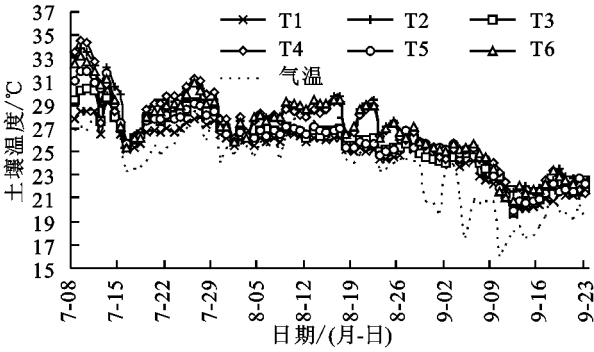


图 1 2015 年夏玉米全生育期 10 cm 深度土层日均土壤温度变化

在 10 cm 土层 T1~T6 条件下,秸秆覆盖全生育期土壤温度波动变化范围较不覆盖小,作物灌浆前,T1、T3 和 T5 土壤日均温度分别较 T2、T4 和 T6 降低 2.39,1.53,1.22 ℃,秸秆覆盖显著降低土壤日均温度;灌浆一成熟阶段,T1、T3 和 T5 土壤日均温度分别较 T2、T4 和 T6 降低 1.10,0.73,0.60 ℃,秸秆覆盖降低土壤温度效果减弱。全生育期温差最大达 5.5 ℃,温差最小为 0.2 ℃,秸秆覆盖较不覆盖平均降低 1.75 ℃,由此可见,秸秆覆盖可改善夏季高温对夏玉米生长的不利影响,为夏玉米生长提供更加稳定的温度环境。

2.1.2 夏玉米生育期内土壤温度与气温的动态变化 土壤温度的变化受气温、土壤贮水状况、作物密度等多种因素影响,其中土壤温度受气温影响的敏感程度较高。地表温度受环境影响较为复杂,深度大于 10 cm 土层温度变化幅度减小,受土壤水分影响增加。本文对 2014 年夏玉米全生育期各处理 10 cm 深度土壤温度进行研究,分析夏玉米生育期内 10 cm 土层温度与同时刻的气温(表 2),两者间存在线性关系:

$$T_s=kT_a+b$$

式中:T_s 为土壤温度(℃);T_a 为同时刻气温(℃);k、b 为拟合参数。

表 2 各处理 10 cm 地温与同时刻气温相关拟合参数

处理 编号	拟合系数		相关系数 R ²
	k	b	
T1	0.6242	10.0730	0.8355
T2	0.8173	7.6832	0.7989
T3	0.6890	9.3377	0.8435
T4	0.7979	8.1088	0.7450
T5	0.7185	8.7126	0.8312
T6	0.8116	7.7489	0.8348

由表 2 可知,T1~T6 处理 10 cm 土层温度与气温拟合的相关系数分别为 0.835 5,0.798 9,0.843 5,0.745 0,0.831 2 和 0.834 8。采用 2015 年夏玉米生育期实测气温和 10 cm 深度土壤温度检验拟合公式,夏玉米生育期各处理地温的实测值和模拟值比照结果见图 2,从图 2 中可知不同处理模拟值和实测值较为接近,拟合关系式具有一定实用性。

通过表 2 可知,对 T1~T6 的气温和土壤温度的线性关系有明显差异,这是因覆盖条件和施肥量受气温的影响导致土壤温度敏感度不同造成的差异。相

同施肥处理下,秸秆覆盖处理 T1、T3 和 T5 升温速率分别为 0.624 2,0.689 0 和 0.718 5,均显著低于不覆盖处理 T2、T4 和 T6 升温速率 0.817 3,0.797 9 和 0.811 6,可见秸秆覆盖具有缓解夏季高温引起的地温剧烈变化的作用。覆盖条件下,施肥量受气温的影响对土壤升温速率的影响有所差异,T5 较 T1 和 T3 升温速率分别提高 15.11%和 4.28%,说明秸秆覆盖条件下,施肥促进了地温的变化速率,且随着施肥量的增加,地温升温速率增大,但在不覆盖条件下,施肥对地温变化速率的影响不显著。

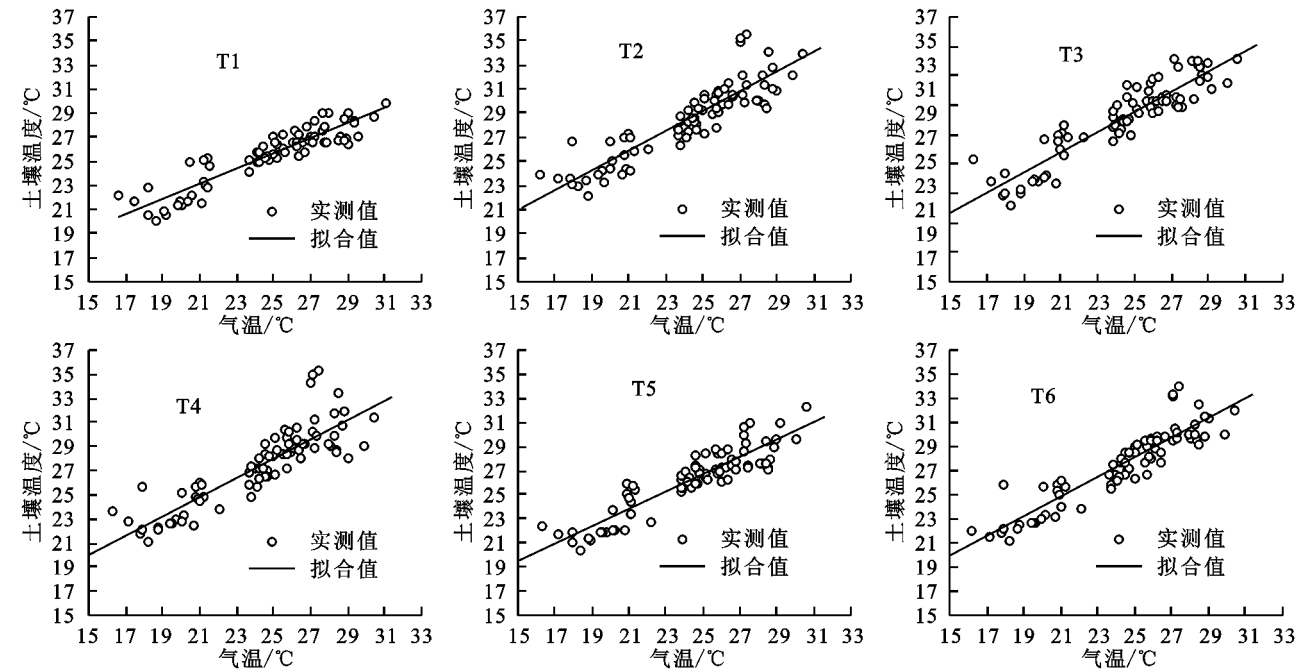


图 2 各处理生育期土壤 10 cm 深处地温与实测值关系对比

2.2 土壤含水量的时空变化

由图 3 可知,2 年各处理不同深度土层土壤含水率随时间的波动变化状况,各处理 0—60 cm 不同土层土壤水分变化趋势一致,由于灌水和降水,土壤含水率急剧升高形成峰值,随灌水或降水的结束,逐渐回落。含水率峰值出现的次数与灌水和显著降水出现的次数相一致,随灌水和显著降水($P>5\text{ mm}$)发生,含水率峰值陡一些,降水量较少时峰值较缓。

由图 3 可知,0—20 cm 土层土壤含水率随时间的波动幅度大,相同施肥条件下,秸秆覆盖处理生育期土壤含水率均大于不覆盖处理,2014 年秸秆覆盖较不覆盖土壤含水率平均提高 11.73%,2015 年平均提高 9.56%,作物拔节(7 月 12 日)前,土壤水分消耗主要为土壤蒸发,与不覆盖相比,各覆盖处理蓄水保墒效果十分显著,统计 2014 年和 2015 年覆盖处理土壤水分较不覆盖分别提高 17.38%和 13.56%。进入拔节期后,作物生长旺盛耗水量高,当降水量少时(2014 年 8 月 15 日至 9 月 1 日和 2015 年 8 月 1 日至 8 月 15 日)秸秆覆盖较不覆盖分别提高土壤水分 11.15%

和 14.53%,秸秆覆盖对 0—20 cm 土层土壤水分的保持作用极显著,说明秸秆覆盖可以抑制土壤蒸发,起到保持表层土壤水分的作用。

由图 3 可知,20—40 cm 土层土壤含水率较 0—20 cm 土层高,但随时间的波动变化幅度减小,2014 年平均提高 18.38%,2015 年平均提高 9.83%。相同施肥条件下(除 2015 年中肥处理外),拔节—灌浆阶段(2014 年 7 月 13 日至 8 月 14 日,2015 年 7 月 15 日至 8 月 18 日),各覆盖处理 20—40 cm 土层土壤含水率均低于不覆盖,2 年试验表明,T1、T3 和 T5 分别较 T2、T4 和 T6 降低 5.38%,5.27%和 3.53%,其中 T1 和 T2、T3 和 T4 两组处理差异达显著水平($P<0.05$),说明滴灌有利于土壤水分的下渗,秸秆覆盖不仅具有截流作用,同时起到了一定的保水性,使渗入至下层的水量相应的减少。

图 3 表明,40—60 cm 土层的土壤含水率的变化幅度较 20—40 cm 进一步减小,维持在一个较为稳定的范围之内,而且对于降水和灌水的响应具有一定的滞后性。进入拔节期后,同样在相同施肥条件下(除 2015 年

中肥处理), T1、T3 和 T5 分别较 T2、T4 和 T6 降低 10.37%, 2.48% 和 2.97%, T1 和 T2 处理差异达显著水

平($P<0.05$), 覆盖处理土壤含水率低于不覆盖, 进一步证明了秸秆覆盖对深层土壤水分分布的调控作用。

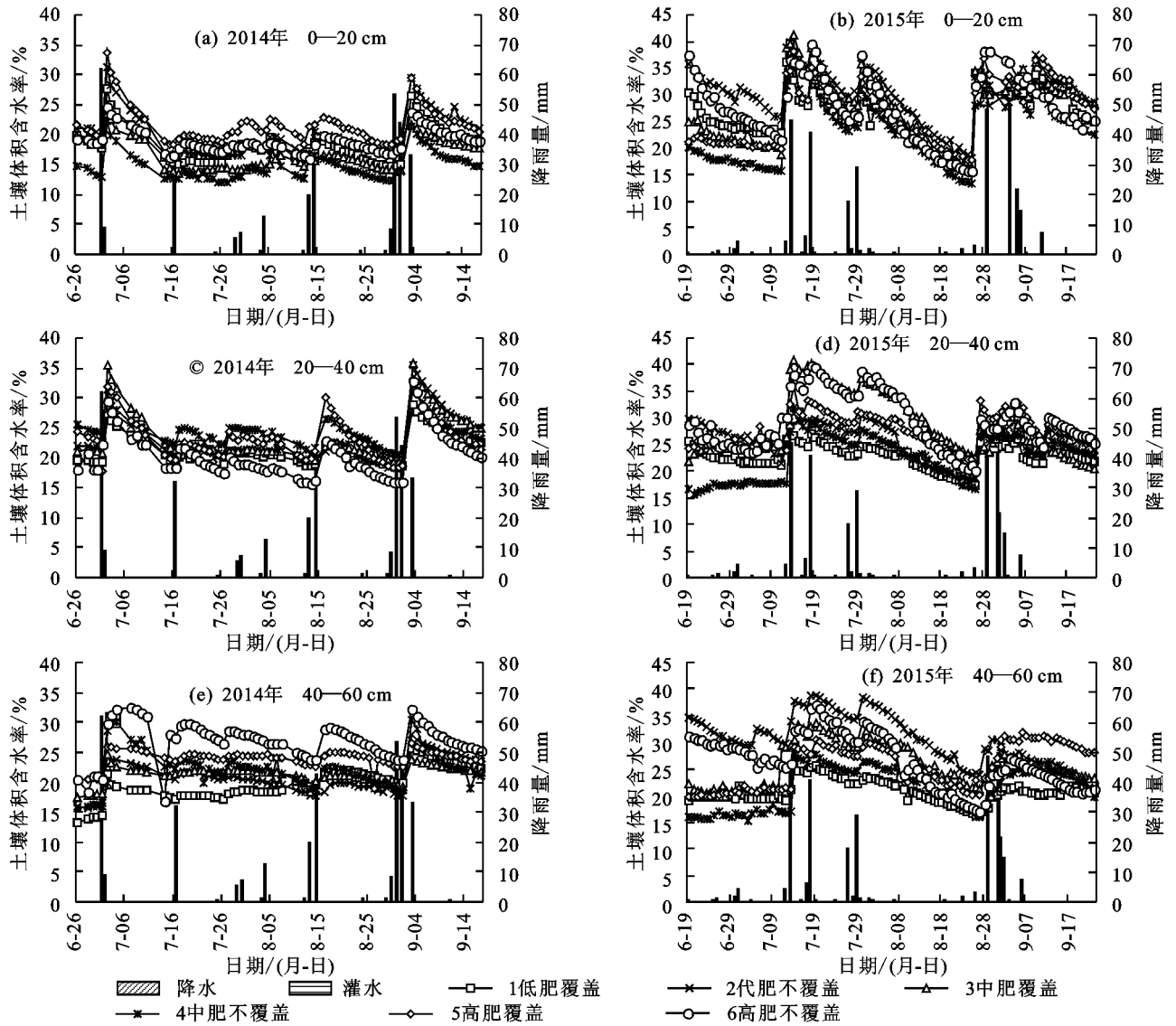


图3 夏玉米全生育期不同深度土壤含水率趋势变化

2.3 夏玉米耗水规律的变化

根据2年观测的各处理土壤蒸发及土壤水分变化过程, 计算出滴灌条件下夏玉米各生育阶段的耗水变化情况(表3)。2年研究表明, 秸秆覆盖可显著降低夏玉米生长过程的耗水量, 全生育期 T1、T3 和 T5 分别较 T2、T4 和 T6 降低 10.16%, 10.27% 和 5.12%; 秸秆覆盖下 E/ET 变化在 27.77%~31.25% 之间, 不覆盖条件下 E/ET 变化在 33.24%~40.03% 之间, 可见秸秆覆盖可以显著降低夏玉米生育期内因土壤蒸发散失的这部分无效耗水。秸秆覆盖条件下, 随施肥量的提高, 夏玉米耗水量随之提高, T5 分别较 T3 和 T1 提高 3.98% 和 12.79%, T3 较 T1 提高 9.75%, 可见, T5 和 T3 较 T1 均显著提高夏玉米耗水($P<0.05$), T5 较 T3 对夏玉米水分消耗的影响不显著; 不覆盖条件下, 随施肥量的增加, 夏玉米生育期耗水量呈现由高变低的变化趋势, 但差异变化不显著。

由表3可知, 夏玉米生育期内耗水强度(CI)具有先增大后降低的变化趋势。播种—拔节阶段, CI 较小, 且各处理 CI 相近, 2014 年平均为 2.96 mm/d, 2015 年平均为 2.76 mm/d; 拔节后, CI 逐步提高, 抽雄—灌浆阶段为作物产量的形成奠定基础, 该阶段夏玉米生长最为旺盛, 叶面积指数达到最大, 夏玉米进入旺盛的生殖生长, 作物需水量大, 因此 CI 达到最大; 灌浆—成熟阶段, 植株开始衰老, 叶片变黄, 叶面积指数减小, CI 减弱, 2014 年平均为 2.45 mm/d, 2015 年平均为 2.18 mm/d。2014 年秸秆覆盖下夏玉米 CI 较不覆盖降低 8.63%, 2015 年降低 8.23%。

夏玉米生育期 CI 受施肥影响, 随施肥量的增加, 各处理 CI 增强, 抽雄—灌浆阶段, 2014 年无施肥、中、高肥该阶段耗水强度平均分别为 5.76, 8.33, 6.44 mm/d, T3 此阶段 CI 最高, 2015 年无施肥、中、高肥该阶段耗水强度平均分别为 5.17, 6.88, 7.30

mm/d,T5 此阶段 CI 最高,由此可知随施肥量的提高,作物蒸腾消耗水分进一步增强,耗水强度增大,2014 年耗水强度最高为 T3,可能是因为施肥量超过当年作物需求最适范围,使得耗水量减小, CI 降低,效果减弱;灌浆后,耗水强度开始降低,施肥处理对耗水强度的影响不显著。

表 3 各处理夏玉米生育期不同阶段耗水变化

处理 编号	耗水参数	2014 年					2015 年				
		播种—拔节	拔节—抽雄	抽雄—灌浆	灌浆—成熟	全生育期	播种—拔节	拔节—抽雄	抽雄—灌浆	灌浆—成熟	全生育期
T1	E_s/mm	45.50	19.13	12.38	19.54	96.55	52.44	16.68	15.59	12.35	97.06
	ET/mm	58.69	74.76	68.73	106.57	308.75	69.88	72.88	85.73	82.06	310.55
	$CI/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	2.45	3.74	5.29	2.37	3.03	2.50	4.05	5.36	1.78	2.88
T2	E_s/mm	63.64	23.25	16.70	29.41	133.00	63.05	19.79	16.72	27.57	127.13
	ET/mm	78.27	80.20	80.85	112.16	351.48	76.71	77.36	79.66	104.15	337.88
	$CI/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	3.26	4.01	6.22	2.49	3.45	2.74	4.30	4.98	2.26	3.13
T3	E_s/mm	48.02	18.57	15.19	19.44	101.22	59.19	15.53	11.74	12.28	98.74
	ET/mm	65.54	80.03	95.59	93.09	334.25	71.01	75.08	113.02	86.34	345.45
	$CI/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	2.73	4.00	7.35	2.07	3.28	2.54	4.17	7.06	1.88	3.20
T4	E_s/mm	57.77	22.97	21.08	32.34	134.16	71.35	19.27	15.88	22.10	128.60
	ET/mm	69.78	74.59	108.04	118.23	370.64	89.91	83.34	107.19	106.39	386.83
	$CI/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	2.91	3.73	8.31	2.63	3.63	3.21	4.63	6.70	2.31	3.58
T5	E_s/mm	45.24	20.73	13.04	24.22	103.23	55.49	18.70	11.99	15.37	101.55
	ET/mm	62.93	69.15	87.73	119.19	339.00	75.97	69.99	118.22	101.53	365.71
	$CI/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	2.62	3.46	6.75	2.65	3.32	2.71	3.89	7.39	2.21	3.39
T6	E_s/mm	59.95	26.76	17.44	36.96	141.11	72.44	25.42	24.88	20.06	142.80
	ET/mm	92.12	68.04	79.53	112.81	352.50	79.51	77.51	115.38	117.82	390.22
	$CI/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	3.84	3.40	6.12	2.51	3.46	2.84	4.31	7.21	2.56	3.61

2.4 夏玉米产量和水分利用效率

由表 4 可知,2 年试验结果表明秸秆覆盖较不覆盖有明显增产的作用,2 年籽粒产量均值 T1 较 T2 增产 14.07%、T3 较 T4 增产 16.80%、T5 较 T6 增产 8.11%,秸秆覆盖对籽粒产量的增长具有显著作用($P<0.05$)。秸秆覆盖与否,施肥均提高了夏玉米籽粒产量,2014 年覆盖条件下,T3 获得最高籽粒产量,分别较 T1 和 T5 提高 15.14%和 14.79%;2015 年 T3 和 T5 获得籽粒产量相近,均高于 T1,分别较 T1 提高 8.67%和 8.90%。各处理生物产量的增幅高于籽粒产量的增幅,2 年生物产量均值 T1 较 T2 增产 14.11%、T3 较 T4 增产 18.92%、T5 较 T6 增产 23.94%。

不同处理导致土壤温度和水分状况不同,因此对

夏玉米的水分利用效率和肥料偏生产力也产生不同的影响(表 4)。2 年总体表现出秸秆覆盖条件下水分利用效率显著高于不覆盖处理($P<0.05$),覆盖条件下水分利用效率表现为 $T3>T1>T5$,T3 和 T1 水分利用效率相似,分别较 T5 高 10.95%和 8.79%($P<0.05$),不覆盖条件下不同施肥量对夏玉米水分利用效率影响不显著。肥料偏生产力是指施肥下的作物产量与施肥量的比值,它是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标,覆盖和施肥对夏玉米肥料偏生产力的影响有显著的交互作用($P<0.05$),施肥处理对肥料偏生产力有极显著的影响($P<0.01$),2 年研究结果表明 T3 最高,2014 年和 2015 年分别为 41.09 kg/kg 和 39.56 kg/kg。

表 4 各处理夏玉米产量、水分利用效率和肥料偏生产力

年份	处理 编号	生物产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	籽粒产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	耗水量/ mm	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{mm}^{-1}$)	肥料偏生产力/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2014	T1	15614.56±623.48c	7138.31±378.16c	308.75ac	23.11ace	—
	T2	13753.74±477.20b	6301.72±317.58a	351.48bcd	18.05bd	—
	T3	18678.66±513.66c	8218.73±402.33b	334.25ab	24.56ac	41.09b
	T4	15309.32±595.80a	7001.34±429.98c	370.64bcd	18.94bde	35.01c
	T5	17656.86±673.54c	7159.88±362.73c	339bcd	21.09ade	17.90a
	T6	14181.96±549.37b	6553.13±290.05a	352.5bcd	18.47bde	16.38a
2015	T1	13760.28±389.44b	7080.68±361.67ab	310.55a	22.08b	—
	T2	13009.82±502.39a	6338.83±309.88c	337.88a	18.76a	—
	T3	17211.79±390.07c	7911.60±374.81d	345.45ab	22.90b	39.56b
	T4	14871.95±594.66b	6808.66±407.60bc	386.83cd	17.60a	34.04b
	T5	17241.75±602.84c	7929.65±351.59d	365.71bc	21.68ab	19.82a
	T6	13975.34±443.50b	7405.06±302.27a	390.22d	18.98a	18.51a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

土壤温度受气温影响的敏感程度较高,铺设秸秆在地表形成覆盖层后,有效阻拦了太阳直射并吸收地面有效辐射,削弱了大气和土壤的水热交换作用,起到降低昼夜温差变化的作用^[13-16]。胡广荣等^[17]在半干旱地区垄沟种植技术表明,秸秆覆盖种植玉米和高粱的沟中表层土壤温度分别降低 1.1℃和 1.3℃,秸秆覆盖具有降温效果。本文对不同处理夏玉米全生育期 10 cm 深土壤温度与同时刻气温之间的关系进行研究,发现存在高度的线性相关关系,证明秸秆覆盖具有缓解夏季高温引起的地温剧烈变化的作用,为夏玉米的生长提供较为稳定的温度环境,这与前人研究结论基本一致。本研究进一步表明秸秆覆盖条件下,施肥影响土壤增温速率,随着施肥量的提高,增温速率加快,在本试验施肥量范围内,土壤增温速率随施肥量的提高而加快,但增温速率均低于不覆盖处理。

大量研究表明,秸秆覆盖可以保护表层土壤结构的同时涵养水分,起到保水保墒的作用,较不覆盖显著提高土壤储水量^[18-19]。毛妍婷等^[20]在干旱地区研究表明,免耕覆盖模式 0—10 cm 土壤含水率均高于无覆盖模式,差异显著。本研究在滴灌条件下进一步研究秸秆覆盖和施肥对土壤水分的影响,研究发现秸秆覆盖可增加夏玉米全生育期 0—20 cm 土壤含水率,2014 年秸秆覆盖较不覆盖土壤含水率平均提高 11.73%,2015 年平均提高 9.56%;20—40 cm 和 40—60 cm 土层的土壤含水率均高于 0—20 cm 土层,但拔节—灌浆阶段,表现为各覆盖处理土壤含水率低于不覆盖处理,这可能是由于秸秆覆盖处理下土壤温度条件较好,通过毛细管的作用,深层土壤水分向上层移动,同时在该生长阶段夏玉米生长旺盛,土壤根系更多集中于 20—60 cm 土层,秸秆覆盖处理夏玉米生长对土壤水分的需求量更高。

本研究表明,施肥促进了作物的生长,使得作物的耗水量在一定范围内有所提高,秸秆覆盖一方面可以提高表层土壤水分,同时降低土壤蒸发量,使得作物耗水更多用于作物蒸腾,提高水分利用效率。各处理生育期内耗水强度均表现出先增大后降低的趋势,抽雄—灌浆阶段耗水强度最大,夏玉米生长最为旺盛,为作物产量的形成奠定基础。

秸秆覆盖是否可以提高作物产量,各方学者对此研究结论不一^[21-24],不同秸秆覆盖量对提高水分利用效率的结果存在差异^[19,25]。2 年试验结果表明,施肥可增加夏玉米产量,秸秆覆盖较不覆盖对夏玉米的增产效果更为明显,2 年高肥覆盖较无施肥覆盖分别增产 0.31%和 11.99%,中肥覆盖较无施肥覆盖分别增产 15.13%和

11.76%;2 年中肥覆盖处理水分利用效率分别为 24.56 kg/(hm²·mm)和 22.90 kg/(hm²·mm),显著高于其他处理,且获得最优肥料偏生产力。

4 结论

(1)秸秆覆盖具有缓解夏季高温引起的地温剧烈变化的作用,全生育期内秸秆覆盖处理较不覆盖平均降低日均土壤温度 1.75℃;通过对土壤温度与气温的拟合发现两者相关性强,覆盖处理 T1、T3 和 T5 分别较不覆盖处理 T2、T4 和 T6 增温速率降低 23.62%,13.65%和 11.47%,在本试验施肥量范围内,土壤增温速率随施肥量的提高而加快,但增温速率均低于不覆盖处理。

(2)滴灌条件下秸秆覆盖处理对 0—60 cm 土层的水分变化影响显著,秸秆覆盖较不覆盖可显著提高 0—20 cm 土层土壤含水率,2014 年秸秆覆盖较不覆盖土壤含水率平均提高 11.73%,2015 年平均提高 9.56%;20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤含水率均高于 0—20 cm 土层,说明滴灌有利于水分在土壤中亚下渗,但 20—40 cm 和 40—60 cm 土层在拔节—灌浆阶段不覆盖处理土壤含水率大于覆盖处理,说明秸秆覆盖一方面对土壤水分的分布具有调控作用,另一方面秸秆覆盖条件为夏玉米生长提供良好环境,对土壤水分需求提高。

(3)2 年研究表明,生育期内,抽雄—灌浆阶段夏玉米耗水强度最高,秸秆覆盖可显著降低夏玉米耗水量,全生育期 T1、T3 和 T5 分别较 T2、T4 和 T6 降低 10.16%,10.27%和 5.12%,秸秆覆盖下 E/ET 较不覆盖降低 5.47%~8.78%,将耗水用于作物蒸腾,促进作物生长。

(4)2 种覆盖和 3 种施肥水平下,T3 处理综合表现较优,可得试验最佳水分利用效率和肥料偏生产力,2 年平均水分利用效率和肥料偏生产力分别为 23.73 kg/(hm²·mm)和 40.33 kg/kg。

参考文献:

- [1] 山仑,黄占斌,张岁歧.节水农业[M].北京:清华大学出版社,2000:88-89.
- [2] Tiwari K N, Singh Ajai, Mal P K. Effect of dirp irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata) under mulch and non-mulch conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 58(1): 19-28.
- [3] 张俊鹏,刘祖贵,孙景生,等.不同水分和覆盖处理对土壤水热和夏玉米生长的影响[J].灌溉排水学报, 2015, 34(2): 25-28.
- [4] 员学锋,吴普特,汪有科,等.免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究[J].农业工程学报, 2006, 22(7): 22-26.

- [5] Li S X, Wang Z H, Li S Q, et al. Effect of plastic sheet mulch, wheat straw mulch, and maize growth on water loss by evaporation in dryland areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(2): 39-49.
- [6] 陈剑, 张泽, John A Yungler, 等. 滴灌精准施肥装置棉田施氮配肥能力研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 62-68.
- [7] 杨晓宏, 严程明, 张江周, 等. 中国滴灌施肥技术优缺点分析与发展对策[J]. 农学学报, 2014, 4(1): 76-80.
- [8] 薛冯定, 张富仓, 索岩松, 等. 不同生育时期亏水对河西地区春玉米生长、产量和水分利用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 59-65.
- [9] 吴立峰, 张富仓, 周罕觅, 等. 不同滴灌施肥水平对北疆棉花水分利用率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 137-146.
- [10] 杨宏羽, 李欣, 王波, 等. 膜下滴灌油菜土壤水热高效利用及高产效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 82-88.
- [11] 曹玉军, 魏雯雯, 徐国安, 等. 半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(1): 107-113.
- [12] 王建有, 龚时宏, 隋娟, 等. 华北地区滴灌灌水频率对春玉米生长和农田土壤水热分布的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 39-45.
- [13] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [14] 脱云飞, 费良军, 杨路华, 等. 秸秆覆盖对夏玉米农田土壤水分与热量影响的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 27-32.
- [15] 蔡太义, 陈志超, 黄会娟, 等. 不同秸秆覆盖模式下农田土壤水温效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1396-1404.
- [16] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 不同施肥方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 195-200.
- [17] 胡广荣, 王琦, 宋兴阳, 等. 沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 590-599.
- [18] 侯连涛, 焦念元, 韩宾, 等. 不同覆盖方式对土壤水分分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(1): 47-50.
- [19] 蔡太义, 贾志宽, 孟蕾, 等. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 43-48.
- [20] 毛妍婷, 雷宝坤, 陈安强, 等. 不同免耕覆盖栽培模式下耕层土壤水热变化对小麦产量的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(4): 1553-1558.
- [21] Cook H, Valdes G, Lee H. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under zea mays[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 91(1/2): 227-235.
- [22] 卜玉山, 苗果园, 邵海林, 等. 对地膜和秸秆覆盖玉米生长发育与产量的分析[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 1090-1093.
- [23] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15-19.
- [24] 王昕, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区秸秆覆盖量对土壤水分保蓄及作物水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 196-202.
- [25] 解文艳, 樊贵盛, 周怀平, 等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 60-67.

(上接第 138 页)

- [10] 符素华, 王红叶, 王向亮, 等. 北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J]. 地理研究, 2013, 32(5): 797-807.
- [11] 陈正维, 刘兴年, 朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 72-81.
- [12] 周淑梅, 雷廷武. 黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS-CN 方法初损率取值研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4240-4247.
- [13] 符素华, 王向亮, 王红叶, 等. SCS-CN 径流模型中 CN 值确定方法研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 415-421.
- [14] 谢长坤, 蔡永立, 左俊杰. 基于 SCS 法模拟的上海郊区农田地表产流特征及原因[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(1): 44-51.
- [15] Taher T M. Integration of GIS database and SCS-CN method to estimate runoff volume of wadis of intermittent flow[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 40(3): 685-692.
- [16] Woodward D E, Hawkins R H, Jiang R, et al. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio [C]. World Water and Environmental Resources Congress. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2003: 1-10.
- [17] Lim K J, Engel B A, Muthukrishnan S, et al. Effects of initial abstraction and urbanization on estimated runoff using CN technology[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(3): 629-643.
- [18] Baltas E A, Dervos N A, Mimikou M A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(6): 1825-1829.
- [19] 王晓燕, 毕华兴, 高路博, 等. 晋西黄土区不同空间尺度径流影响因子的辨析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 159-166.
- [20] 李子君, 于兴修. 冀北土石山区坡面尺度径流特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 109-116.