

不同灌溉模式下夏玉米产量形成特点

吕丽华 董志强 梁双波 张经廷 张丽华 贾秀领

(农业部华北地区作物栽培科学观测实验站, 河北省农林科学院粮油作物研究所, 河北 石家庄 050035)

摘要:为了筛选限水灌溉条件下较优的灌溉集成模式, 挖掘夏玉米高产潜力, 明确其高产的生理特性, 2015—2016年在河北藁城采用灌溉施肥方式(微喷灌和管灌)×密度(6.3×10^4 、 7.8×10^4 株·hm⁻²)×收获期(9月25日和10月3日)再裂区试验, 研究了微喷灌和管灌为主的两种集成模式对夏玉米郑单958产量形成的影响。结果表明:微喷灌水肥一体化三次灌水施肥技术, 改善了浅层土壤水分状况, 土壤水分含量较管灌模式高5.9%~20.2%; 其拔节期叶面积指数(LAI)较管灌高30.2%~44.2%, 生育后期SPAD值降低缓慢, 较管灌高4.9%~5.9%, 且作物生长速率(CGR)高9.0%~26.3%, 这是其提高玉米千粒重和产量的主要原因, 并且收获越晚玉米微喷灌模式的增产效应越大, 早收和晚收分别增产5.1%~6.0%和7.2%~10.8%。微喷灌模式高密度处理基部茎节抗倒伏指数、叶片SPAD值和CGR大多优于管灌低密度处理或与之相当, 三者分别较管灌高4.0%~27.3%、-1.0%~3.7%和24.3%~37.7%。说明微喷灌模式优于管灌模式, 且在此模式下增加种植密度是可行的。研究结果表明, 微喷灌+增密+推迟收获时间3种技术综合应用可充分发挥玉米的增产潜力, 实现增产23.3%。

关键词:夏玉米; 微喷灌; 管灌; 集成模式; 产量

中图分类号:S513; S274 **文献标志码:**A

Characteristics of yield formation of summer maize under different irrigation modes

LU Li-hua, DONG Zhi-qiang, LIANG Shuang-bo, ZHANG Jing-ting, ZHANG Li-hua, JIA Xiu-ling

(Scientific Observation and Experimental Station of Crop Cultivation in Northern China, Ministry of Agriculture,

P. R. China/Institute of Cereal and Oil Crops, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050035)

Abstract: The objective of this study was to explore the optimization of the integration mode of irrigation under limited water condition, the high yield potential, and physiological characteristics of high yield for summer maize. A field experiment was carried out with re-split plot design (main plot of irrigation mode, split plot of density and re-split plot of harvest time) in Gaocheng of Hebei province from 2015 to 2016 to study the effects of two types of integrated irrigation modes on the grain yield formation of summer maize for Zhengdan 958 under two density conditions. The two irrigation methods were micro sprinkler irrigation (micro-irrigation) and pipe irrigation, with two planting densities of 6.3×10^4 and 7.8×10^4 plants·ha⁻¹, and two harvest dates on Sep. 25 and Oct. 3. The results showed that soil moisture content in the top layer (0~60 cm) for micro-irrigation mode was 5.9%~20.2% higher due to 3X integration fertilization and irrigation. So, compared with pipe-irrigation, micro-irrigation mode increased maize plant growth due to sufficient shallow soil water conditions, and the LAI of jointing stage was 30.2%~44.2% higher, SPAD of late growth stage slowly decreased to just 4.9%~5.9% higher, and CGR was 9.0%~26.3% higher than that of pipe irrigation. So, the 1000-grain weight and yield of maize were increased, especially for micro-irrigation mode when harvest time was delayed, the increasing yield effect was more obvious with 5.1%~6.0% and 7.2%~10.8% increase in yield for early and late harvests than that of pipe irrigation, respectively. Basal stem lodging index, leaf SPAD values, and CGR of micro irrigation mode in high density condition were better than or equivalent

收稿日期:2017-12-12

修回日期:2018-03-12

基金项目:“十三五”国家重点研发项目(2016YFD0300106-5)

作者简介:吕丽华(1977-),女,河北衡水人,博士,副研究员,主要从事小麦玉米微灌节水高产技术研究。E-mail: nkylhh@163.com

通信作者:贾秀领(1964-),女,河北正定人,博士,研究员,主要从事作物高产与资源高效利用研究。E-mail: jiaxiuling@aliyun.com

to those indexes of pipe irrigation in low density, 4.0%~27.3%, -1.0%~3.7%, and 24.3%~37.7%, respectively. It showed that the micro-irrigation mode is better than the pipe-irrigation mode, and when planting density with micro-irrigation mode was increased, these indicators would not be worse. The potential increase of maize yield could be exploited when comprehensive application of the three technologies (micro irrigation + high density + delaying harvest time) that resulted in 23.3% increase in yield. This study provided a technical support for water-saving and high-yield cultivation of maize.

Keyword: summer maize; micro sprinkler irrigation; pipe irrigation; integration mode; grain yield

华北平原夏玉米产量在 10 500~12 000 kg·hm⁻²时,需水量在 350~400 mm^[1-3],而同期河北山前平原平水年型降水量仅为 277 mm,缺水 100 mm 左右^[2],并且该区降水与作物需水存在一定的时空差异,一般需要灌溉。而当前水资源供需矛盾日益紧张的情况下,如何高效利用有限水资源,采用何种灌溉技术是一个广受关注的课题^[4]。

崔远来^[5]认为综合集成单项技术是新的农业科技革命的一个重要特点,现有技术的集成,有利于创新,有利于技术的进步。本研究组自 2012 年开始进行了玉米管灌和微喷灌水肥运筹、密度、播期收获期搭配等试验的对比研究,研究集成了夏玉米管灌和微喷灌技术模式。微灌水肥一体化作为一种高效节水灌溉技术,与传统的灌溉方式相比,能有效控制灌水定额,降低表层土壤容重,抑制土壤养分下渗,改善作物的生长环境^[6-8];还可提高叶面积指数和光合强度^[9],提高籽粒的灌浆速率^[10],从而提高籽粒产量和水分利用效率^[11-12]。

目前,玉米栽培方向主要集中于单项技术的研究,包括播期^[13]、密度^[14]、水肥耦合^[15]等方向,关于微灌水分试验主要集中于灌水量在冠层的空间分布^[16-17]、微灌不同灌水量对产量形成和水分利用效率的影响等方面^[18-20],但把灌溉与其他栽培技术集成,对微喷灌和管灌两种优化的集成模式综合分析的研究鲜有报道。本文重点分析了 2 个密度下微喷灌和管灌 2 种集成模式的产量性状以及相关生理生态指标的变化,以期明确不同灌溉集成模式下玉米增产潜力及有关生理特性,为玉米节水高产栽培实践提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

自 2015—2016 年在河北省农林科学院粮油作物研究所藁城堤上试验站进行田间试验。该区属华北太行山山前平原区(38°41'N, 116°85'E),年均降雨量 484 mm。0~20 cm 土壤含全氮含量 0.97 g·kg⁻¹、有机质 15.5 g·kg⁻¹、全磷 2.2 g·kg⁻¹、有

效磷 19.5 mg·kg⁻¹、碱解氮 72.7 mg·kg⁻¹、有效钾 91.0 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用灌溉及施肥方式、密度、收获期再裂区设计,灌溉方式为主区,密度裂区,收获时间为再裂区,3 次重复,随机排列,小区面积 8.4 m×5.9 m=49.56 m²,行距 60 cm,玉米品种为郑单 958。设置 2 种集成灌溉模式,微喷灌溉和管灌;设置 2 个种植密度,6.3 万株·hm⁻² 和 7.8 万株·hm⁻²;设置 2 个收获时间,9 月 25 日和 10 月 3 日。冬小麦收获后,夏玉米免耕播种,播后灌溉,生育期灌水量、灌水时期见表 1,降水量见表 2。施肥量 N:P₂O₅:K₂O=12:2.9:5.8,施入沃夫特水溶性复合肥 720 kg·hm⁻²(含 N 25%、P₂O₅ 6%、K₂O 5%)、硫酸钾 100.8 kg·hm⁻²(含 K₂O 50%)。管灌处理于出苗期一次性开沟施入,生育期间不进行追肥;微喷灌处理沃夫特复合肥于出苗期、11 展叶期和吐丝期按 35%、45% 和 20% 施入,硫酸钾出苗期和 11 展叶期按 67% 和 33% 施入。微喷带为并列斜 5 孔、孔径 0.8 mm,喷射角范围 45°~70°,带宽 40 mm,微喷带铺设间距 1.8 m;管灌模式采用 PE 软管灌溉,即每个小区用 2 根直径为 63 mm 软管(软管间隔 2.5 m)输送至小区中部。处理间设 1.0 m 宽隔离带。管灌模式灌水量以小区自然灌满为标准。2015 年和 2016 年分别为 6 月 18 日和 6 月 15 日播种。

1.3 测定方法

叶面积指数:在拔节期、12 展叶期、吐丝后 5~7 d、灌浆中期和成熟期,分别选择有代表性的植株 4 株,测定叶片长和宽。根据公式计算叶面积和叶面积指数(LAI):单叶叶面积=叶宽×叶长×系数,系数为 0.5~0.75,即未展开叶片数量为 n,则展开叶(m)系数为 a=0.75,未展开叶(m+1)系数为 b=a-(0.75-0.5)/n,未展开叶(m+2)系数为 c=b-(0.75-0.5)/n,依次类推;LAI=单位土地面积内株数×单株叶面积/单位土地面积。

穗位叶 SPAD:采用 SPAD-502 叶绿素仪于吐丝

表 1 2个灌溉模式灌水时期及灌水量/mm
Table 1 Irrigation quantity and time of two irrigation modes

| 年份 Year | 管灌 Seedling stage | 灌溉 Irrigation | | 微喷灌 Sprinkler irrigation | | |
|------------|----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| | | 总量 Total amount | 出苗期 Seedling stage | 11 展叶 11-leaf | 吐丝期 Silking stage | |
| 2015 | 94.5 | 94.9 | 45.0 | 20.0 | 29.9 | |
| 2016 | 96.0 | 79.5 | 54.0 | 13.5 | 12.0 | |

表 2 夏玉米生育期间降水量/mm
Table 2 Precipitation during summer maize growing period

| 年份 Year | 6月 June | 7月 July | 8月 August | 9月 September | 10月 October | 合计 Total |
|------------|------------|------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|
| | | | | | | |
| 2015 | 17.7 | 31.3 | 120 | 41.6 | 1.4 | 212.0 |
| 2016 | 19.3 | 198.0 | 59.8 | 0.2 | 0.0 | 277.3 |

后 5~7 d、灌浆中期和成熟期分别测定穗位叶 SPAD 值, 每个小区测定 6 株。

作物生长速率 ($CGR, g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) = $(W_2 - W_1)/A(t_2 - t_1)$, W_1 和 W_2 分别表示时间 t_1 和 t_2 时单位面积的干物重, A 表示土地面积^[21]。

抗倒伏指数、穿刺强度: 在灌浆中期每小区选取 5 株代表性样株, 采用 YYD-1 微电脑茎秆强度测定仪测定基部 2~5 节长度、穿刺强度和机械强度, 同时测定植株重心高度, 记录数值。穿刺强度和机械强度单位为 N。抗倒伏指数 = 机械强度/重心高度。

土壤含水量: 于 2015 年 7 月 13 日和 2016 年 8 月 12 日取土, 测定 0~120 cm 土层土壤水分含量, 以 20 cm 为一个土壤层次。测定湿重后烘干称重。土壤含水量 (%) = (湿重-干重)/干重×100。

产量及产量构成: 每小区收获玉米 3 行(每行 5.9 m), 称所有果穗总鲜重, 按平均鲜穗重从所收果穗中随机选取 20 穗, 风干后测定穗粒数, 脱粒, 称重, 测定千粒重和籽粒产量, 同时采用谷物水分测定仪测定含水率, 计算实际产量和千粒重(按 14% 折算含水率)。

经济系数 = 成熟期籽粒产量/生物产量

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 处理数据, DPS 7.05 统计分析软件对试验数据进行方差分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉模式下玉米植株抗倒伏指数和穿刺强度

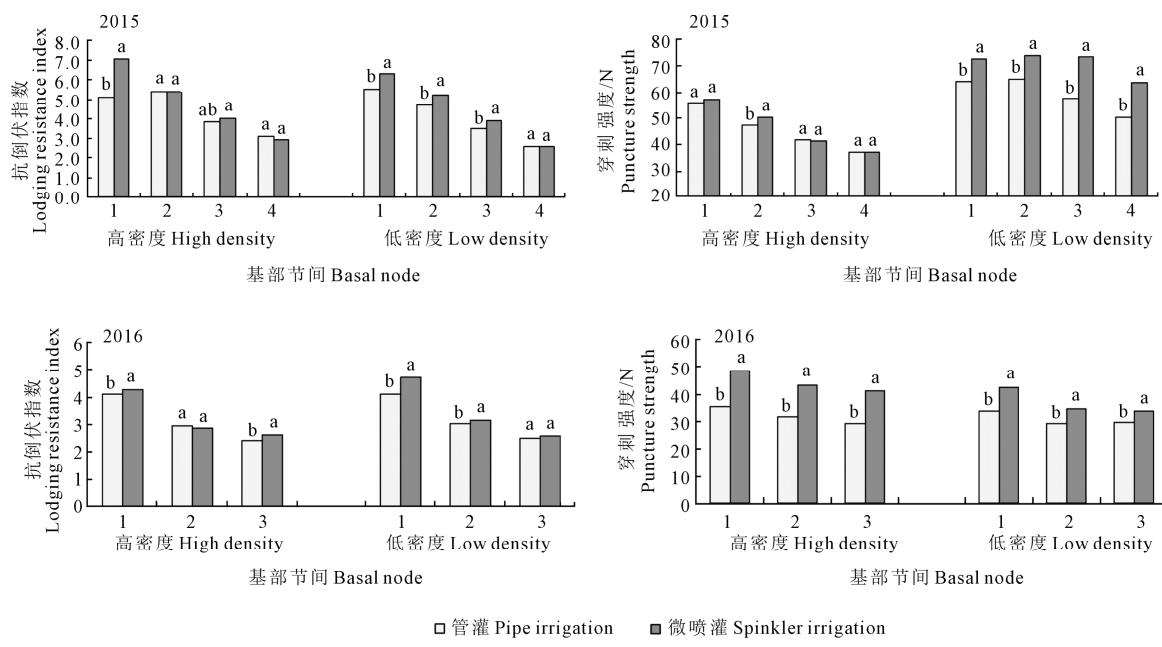
通过测定基部茎节的穿刺强度和抗倒伏指数可知(图 1), 微喷灌水肥一体少量多次的施肥灌溉能明显增加茎秆的强度和韧度, 茎秆质量得到提高, 其穿刺强度和抗倒伏指数大多高于管灌。2015

年结果表明, 高密度条件下微喷灌处理基部第二节抗倒伏指数显著高于管灌, 较管灌高 24.3%, 其他几节与管灌差异不显著。低密度下基部第二至第四节抗倒伏指数均显著高于管灌, 较管灌处理平均高 11.6%。穿刺强度同样表现为低密度处理差异较明显, 基部第二至第五节微喷灌较管灌平均高 20.2%, 而高密度下仅基部第三节表现为微喷灌处理较高。2016 年高密度条件下微喷灌处理第二和第四茎节、低密度下第二和第三茎节的抗倒伏指数显著高于管灌, 分别较管灌处理高 5.9% 和 9.7%; 穿刺强度 2 种灌溉方式差异较大, 高密度和低密度条件下微喷灌较管灌分别高 38.0% 和 19.3%。

另外, 微喷灌模式高密度处理基部茎节的抗倒伏指数高于管灌低密度处理或与之相当, 2015 年基部第二至第五茎节抗倒伏指数分别较管灌低密度处理高 27.3%、14.9%、14.3% 和 11.5%, 2016 年基部第二和第四茎节分别高 4.9%、4.0%。说明微喷灌模式下可适当增加种植密度, 而其茎秆质量不会受到明显影响。

2.2 不同灌溉模式对玉米叶面积指数(LAI)的影响

LAI 受灌溉方式影响明显(图 2)。2015 年高密度下除 9 月 25 日外、低密度下除 9 月 3 日和 25 日外, 微喷灌处理 LAI 均显著高于管灌, 高密度和低密度分别平均高 13.8% 和 14.6%。2016 年微喷灌 LAI 显著高于管灌, 高密度和低密度分别平均高 23.1% 和 28.8%。不同生育阶段存在差异, 拔节期(2015 年 7 月 17 日和 2016 年 7 月 16 日)微喷灌较管灌 LAI 增加明显, 2015 年和 2016 年分别增加了 30.2% 和 44.2%, 但随生育进程的推进, 微喷灌和管灌 LAI 差距缩小, 2015 年 9 月 25 日微喷灌和管灌 LAI 相当, 2016 年 9 月 25 日微喷灌较管灌 LAI 高 22.1%。可见, 微喷灌 LAI 高于管灌, 差别较大的时期主要是拔节期, 且大多随生育期的推进 LAI 差距缩小。



注:1—第二节;2—第三节;3—第四节;4—第五节。不同字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。下同。

Note: 1—second node; 2—third node; 3—fourth node; 4—fifth node. Different letters mean significant differences among treatments at $P<0.05$ level. The same below.

图1 不同灌溉模式对玉米植株抗倒伏指数和穿刺强度的影响

Fig.1 Effects of different irrigation modes on plant lodging resistance index and puncture strength

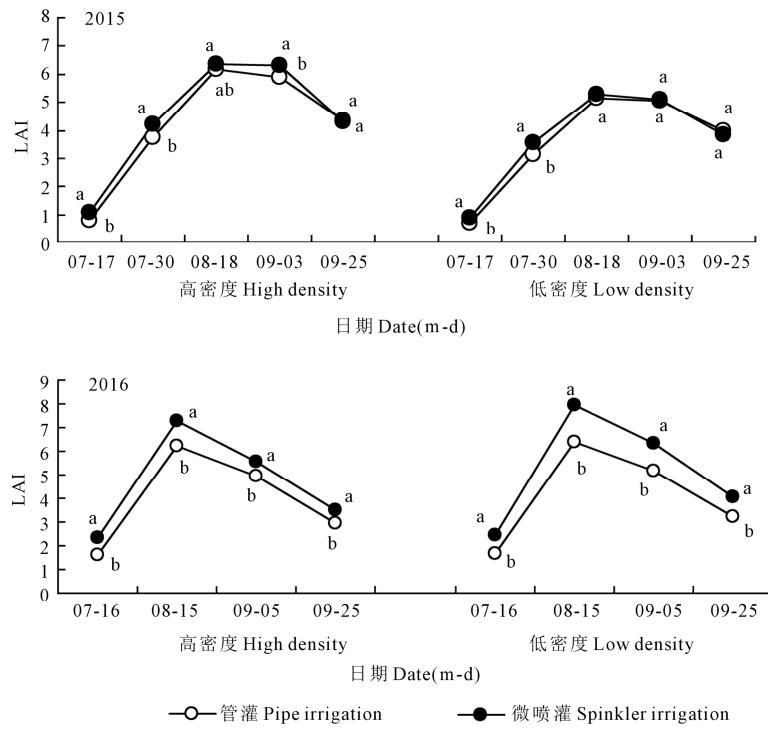


图2 不同灌溉模式对玉米 LAI 的影响

Fig.2 Effects of different irrigation modes on LAI

2.3 不同灌溉模式对玉米穗位叶叶绿素含量 (SPAD 值) 的影响 灌溉方式对穗位叶 SPAD 值的影响 2 年变化趋

势不同。2015 年高密度条件下, 8 月 14 日至 9 月 18 日穗位叶 SPAD 值微喷灌与管灌相当, 但成熟期表现为管灌处理叶片 SPAD 值降低较快, 微喷灌穗

位叶 SPAD 值较管灌高 4.9%;低密度条件下 9 月 3 日至 9 月 18 日均表现为微喷灌穗位叶 SPAD 值显著低于管灌,平均低 6.0%,但 8 月 14 日和 9 月 25 日穗位叶 SPAD 值差别不明显。说明微喷灌处理生育后期优势较为明显,叶片 SPAD 值降低较慢,明显缓解了叶片衰老,使后期叶片的光合活性高于管灌。2016 年趋势不同,高密度条件下微喷灌 SPAD 值显著高于管灌,较管灌平均高 5.3%~5.9%,而低密度条件下二者相当(图 3)。

各时期穗位叶 SPAD 值平均,微喷灌模式高密度处理与管灌低密度处理相当,尤其是 2015 年 8 月 14 日至 9 月 18 日较管灌低密度处理仅平均低 1.6%,而 9 月 25 日成熟期高出 3.7%;2016 年 8 月 13 日较管灌低密度处理高 1.2%,9 月 22 日仅低 1.0%,差异不大。

2.4 不同灌溉模式对玉米作物生长速率(CGR)的影响

微喷灌处理 CGR 大多显著高于管灌处理(图 4)。2015 年高密度条件下微喷灌处理各生育阶段 CGR 均显著高于管灌,平均高 10.1%;低密度条件下除 12 叶展至吐丝期外,其余时期微喷灌 CGR 明显高于管灌,平均高 26.3%,差别最大的时期出现在 6~12 展叶期,相差 28.2%。2016 年 CGR 变化趋势稍有差异,高密度条件下除吐丝-灌浆中期外,

其他生育阶段微喷灌 CGR 均显著高于管灌,平均高 9.0%;低密度下各生育阶段微喷灌 CGR 均高于管灌,平均高 25.6%,差别较大的时期出现在播种~12 叶期和灌浆中期~成熟期,分别相差 31.7% 和 39.4%。说明,微喷灌处理 CGR 较高,尤其是生育后期其植株生长较快,干物质积累速率较快。

另外,微喷灌模式高密度处理 CGR 明显高于管灌低密度处理,2015 年除 12 展叶~吐丝期外,其他生育阶段 CGR 分别较管灌低密度处理高 79.6% 和 29.0%;2016 年 4 个生育阶段 CGR 较管灌低密度处理分别高 37.7%、24.5%、25.7% 和 24.3%。

2.5 不同灌溉模式对土壤水分含量的影响

2015、2016 年开花期灌水前均进行了土壤干旱程度调查。由图 5 可见,2015 年不同密度条件下管灌和微喷灌处理土壤含水量变化大致相同,高密度条件下 0~40 cm 浅层土壤含水量为微喷灌显著高于管灌,平均高 5.9%,而 40~100 cm 土层正好相反,微喷灌显著低于管灌,平均低 14.9%;低密度下浅层 0~20 cm 土壤含水量为微喷灌显著高于管灌,20~40 cm 差别不大,而 40~100 cm 则表现为微喷灌低于管灌,平均低 10.6%。2016 年高密度和低密度条件下 0~60 cm 土壤含水量均表现为微喷灌高于管灌,分别高 12.5% 和 20.2%,而 60~100 cm 2 种灌溉方式相当。可见,微喷灌水肥一体主要改善

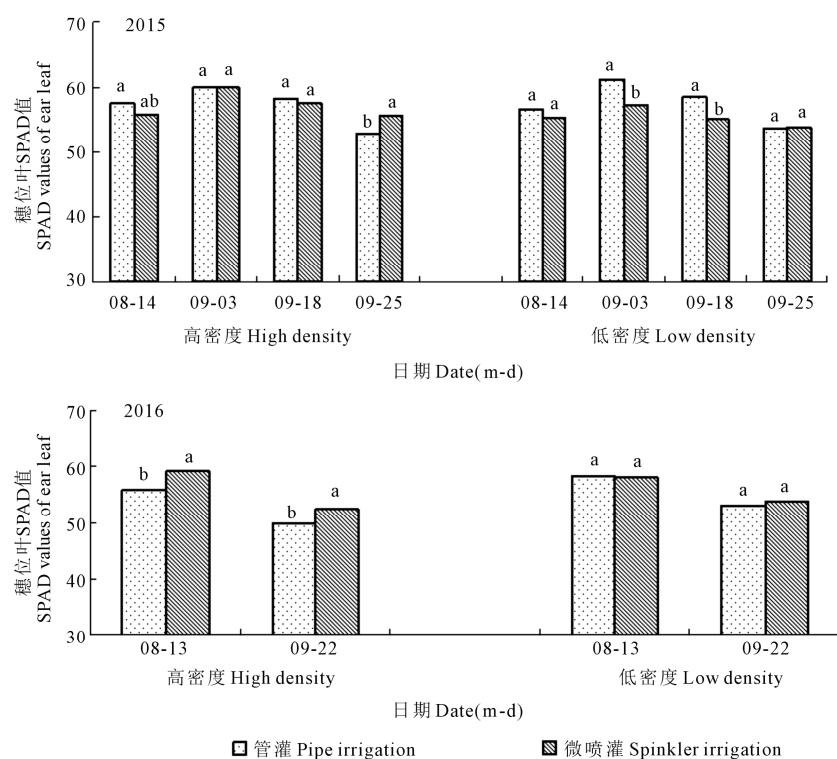
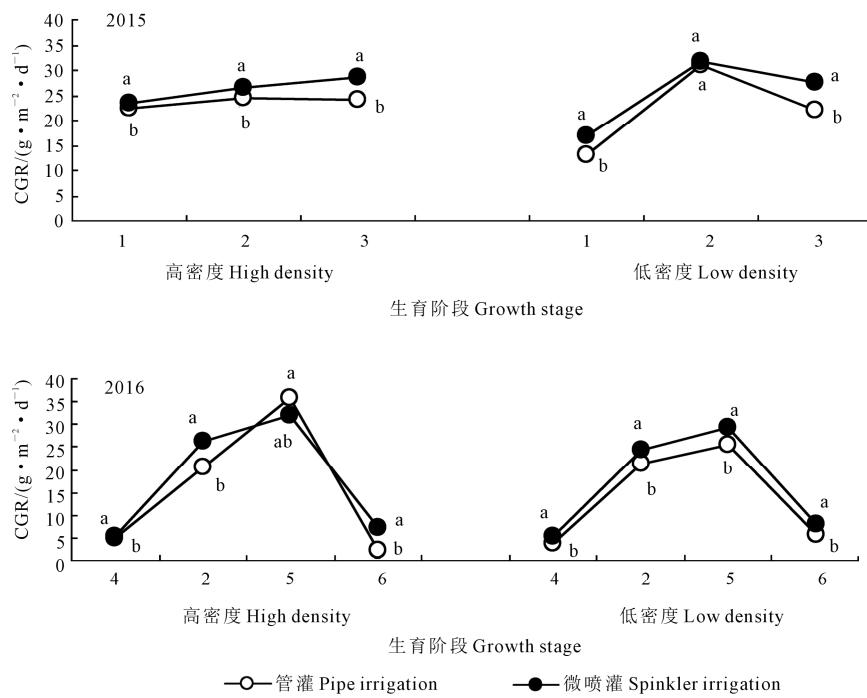


图 3 不同灌溉模式对穗位叶 SPAD 值的影响

Fig.3 Effects of different irrigation modes on SPAD values of ear leaf



注:1—6叶~12叶;2—12叶~吐丝;3—吐丝~成熟期;4—播种~12叶;5—吐丝~灌浆中期;6—灌浆中期~成熟。

Note: 1—6 leaf ~ 12 leaf; 2—12 leaf ~ silking; 3—silking ~ mature; 4—sowing ~ 12 leaf; 5—silking ~ filling; 6—filling ~ mature.

图4 不同灌溉模式对玉米作物生长速率(CGR)的影响

Fig.4 Effects of different irrigation modes on CGR

了上层土壤的水分状况,土壤含水量高于管灌,而下层土壤水分低于管灌或与管灌相当,可能是其在一定程度上增加了对深层土壤水的利用,尤其在降水较少的2015年趋势更为明显。

2.6 不同灌溉模式对产量及产量构成的影响

不同灌溉方式比较,2015年微喷灌和管灌处理间产量差异不显著(表3),但微喷灌模式低密度处理增产效果更大,其中早收和晚收处理分别较管灌模式高5.1%和7.2%(表3);而2016年微喷灌模式产量显著高于管灌模式(表3),且该模式高密度处理增产效果更好,早收和晚收处理分别较管灌模式高6.0%和10.8%,微喷灌模式产量较高主要由于其千粒重显著较高。推迟收获期有显著的增产效果,2015年微喷灌和管灌晚收获处理较相应的早收处理平均分别增产12.6%和9.7%,且该年份灌溉方式和收获时间表现出更为明显的互作效果(表4);2016年高密度下微喷灌和管灌晚收处理较相应的高密度早收处理分别增产6.9%和2.3%,说明玉米收获越晚,玉米微喷灌模式的增产效应更能充分发挥,该模式产量较高同样由于其千粒重显著较高。增加密度提高玉米产量效果显著,总体2015年和2016年平均通过增加密度实现增产分别为11.0%

和5.2%,增产因素来自群体的增加,穗粒数与千粒重有所下降。

采用水肥一体化灌溉技术、增加密度以及延迟收获时间对玉米有较明显的增产效果(表3)。2年数据平均,以管灌方式下低密度早收获处理为对照,通过水肥一体化灌溉技术可实现5.8%的增产,在此基础上通过增加种植密度可实现4.7%的增产,再加上推迟收获时间又可实现11.2%的增产;三种技术综合应用可实现增产23.3%。说明通过采用微喷灌+高密度+延迟收获时间的集成技术,可充分发挥玉米的增产潜力。

3 讨 论

土壤含水量直接影响作物的生长状况^[22]。李英等^[23]研究表明喷灌处理玉米土壤各层水分分布较为均匀,本研究结果2016年土壤含水量变化趋势与其研究结果一致,但在严重干旱的2015年,表现为微喷灌处理各土层含水量变化幅度较大;并且2015年0~40 cm土层、2016年0~60 cm土层微喷灌模式土壤含水量高于管灌模式,而下层正好相反,可见,微喷灌水肥一体化技术主要改善了根系活动层土壤的水分状况,而下层土壤水分低于管灌

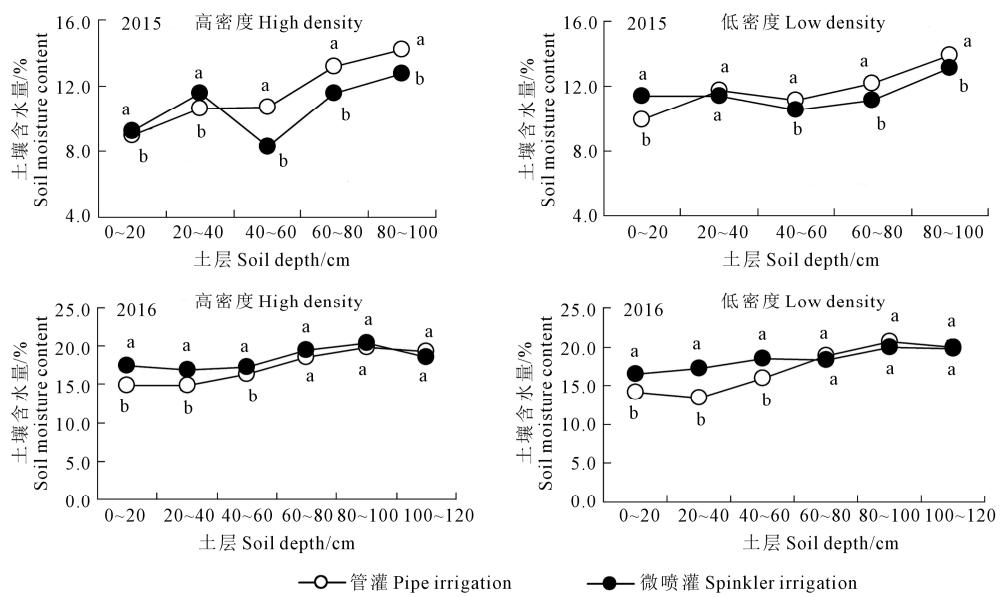


图5 不同灌溉模式对土壤含水量的影响

Fig.5 Effects of different irrigation modes on soil moisture content

表3 不同灌溉模式对玉米产量及产量构成因素的影响

Table 3 Effects of different irrigation modes on yield and yield components

| 年份 Year | 灌溉方式 Irrigation method | 密度/(10 ⁴ hm ⁻²) Density | 收获方式 Harvesting method | 穗粒数 Grain number per ear | 千粒重/g 1000 grain weight | 产量/(kg·hm ⁻²) Grain yield |
|------------|--------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| 2015 | 管灌 Pipe irrigation | 6.3 | 晚收 Later harvest | 457.2 b | 301.9 b | 9115.1 cd |
| | | 6.3 | 早收 Early harvest | 482.2 a | 274.8 cd | 8451.5 e |
| | | 7.8 | 晚收 Later harvest | 433.0 d | 301.6 b | 10553.0 a |
| | | 7.8 | 早收 Early harvest | 431.5 d | 263.4 e | 9466.6 bc |
| | 微喷灌 Sprinkler irrigation | 6.3 | 晚收 Later harvest | 465.3 ab | 311.3 a | 9772.9 b |
| | | 6.3 | 早收 Early harvest | 473.6 a | 282.7 c | 8884.6 de |
| | | 7.8 | 晚收 Later harvest | 420.4 de | 292.1 bc | 10789.1 a |
| | | 7.8 | 早收 Early harvest | 442.4 c | 258.7 d | 9367.7 cd |
| 2016 | 管灌 Pipe irrigation | 6.3 | 晚收 Later harvest | 434.9 b | 309.8 ab | 8113.3 c |
| | | 6.3 | 早收 Early harvest | 430.3 b | 285.5 cd | 7738.0 d |
| | | 7.8 | 晚收 Later harvest | 368.0 d | 290.5 b | 8275.3 bc |
| | | 7.8 | 早收 Early harvest | 370.2 d | 277.7 cd | 8092.6 c |
| | 微喷灌 Sprinkler irrigation | 6.3 | 晚收 Later harvest | 433.5 b | 316.9 a | 8325.8 bc |
| | | 6.3 | 早收 Early harvest | 467.9 a | 291.1 c | 8246.4 bc |
| | | 7.8 | 晚收 Later harvest | 400.4 c | 304.5 ab | 9169.8 a |
| | | 7.8 | 早收 Early harvest | 392.4 c | 281.5 cd | 8574.4 b |

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: different small letters in the same column mean significant differences among treatments at $P<0.05$ level.

或与管灌相当,一定程度增加了对深层土壤水的利用,与白玲晓^[24]研究结果一致。

玉米要获得稳产高产就必须依靠灌溉^[25~26]。灌溉可减轻由于降水时间分布不均造成的作物阶段干旱,低量和中量灌溉可明显提高玉米产量和水分利用效率,并且有限的灌水用在水分最敏感的时期是获得高产高效的有效途径^[27]。前人研究表明,在玉米整个生育期内,有2次需水高峰期,即拔节

至大喇叭口期和抽雄至吐丝期^[3,28]。本研究中管灌采用农民常规的一次性施肥方式,而微喷灌采用水肥一体化三次灌水施肥(播后+大喇叭口期+吐丝期),后者使玉米植株生长较快,LAI明显高于管灌,尤其是生育前期和中期LAI差别较大;并且生育后期微喷灌模式叶片SPAD值降低较慢,其叶片的光合活性高于管灌,因此生育后期该模式仍保持较高的CGR,增加玉米生物量,提高玉米千粒重,实

表4 裂区试验产量方差分析
Table 4 Variance analysis table of yield in split zone test

| 变异来源 Source of variation | 2015 | | | | | 2016 | | | | |
|-----------------------------|----------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| | 平方和 Quadratic sum | 自由度 Freedom | 均方 Mean square | F 值 F value | P 值 P value | 平方和 Quadratic sum | 自由度 Freedom | 均方 Mean square | F 值 F value | P 值 P value |
| 区组 Block | 865.4 | 2 | 432.7 | | | 135.5 | 2 | 67.7 | | |
| 处理 A Treatment A | 2513.8 | 1 | 2513.8 | 9.4 | 0.092 | 7330.4 | 1 | 7330.4 | 214.5 | 0.005 |
| 误差 a Error value a | 533.5 | 2 | 266.7 | | | 68.3 | 2 | 34.2 | | |
| 主区 Main plot | 3912.7 | 5 | | | | 7534.2 | 5 | | | |
| 处理 B Treatment B | 26034.7 | 1 | 26034.7 | 95.6 | 0.001 | 4752.2 | 1 | 4752.2 | 42.8 | 0.003 |
| A×B | 1516.2 | 1 | 1516.2 | 5.6 | 0.078 | 715.6 | 1 | 715.6 | 6.4 | 0.064 |
| 误差 b Error value b | 1088.9 | 4 | 272.2 | | | 444.5 | 4 | 111.1 | | |
| 裂区 Split plot | 32552.5 | 11 | | | | 13446.6 | 11 | | | |
| 处理 C Treatment C | 27469.6 | 1 | 27469.6 | 122.9 | 0.000 | 2532.9 | 1 | 2532.9 | 57.4 | 0.000 |
| A×C | 522.4 | 1 | 522.4 | 2.3 | 0.165 | 22.8 | 1 | 22.8 | 0.5 | 0.493 |
| B×C | 1522.9 | 1 | 1522.9 | 6.8 | 0.031 | 174.2 | 1 | 174.2 | 3.9 | 0.082 |
| A×B×C | 20.3 | 1 | 20.3 | 0.1 | 0.771 | 836.9 | 1 | 836.9 | 19.0 | 0.002 |
| 误差 c Error value c | 1788.1 | 8 | 223.5 | | | 353.1 | 8 | 44.1 | | |
| 再裂区 Re-split plot | 63875.8 | 23 | | | | 17366.5 | 23 | | | |

注: 处理 A-灌溉方式; 处理 B-密度; 处理 C-收获时间。Note: A-irrigation mode; B-density; C-harvest time.

现玉米增产,且收获越晚,玉米微喷灌模式的增产效应越大,与任丽雯等^[29]的研究结果一致。另外微喷灌模式高密度处理基部茎节抗倒伏指数、叶片SPAD值和CGR大多优于管灌低密度处理或与之相当,说明微喷灌溉方式下可适当增加种植密度,且密度的增加不会使茎秆质量、叶片SPAD值和CGR等指标变差。

本课题组经3年的研究,形成了玉米微喷灌集成技术模式,主体技术包括3方面(微喷灌水肥一体化技术+增加密度+延迟收获时间),该技术模式对玉米有较明显的增产效果。以管灌低密度早收获处理为对照,水肥一体化灌溉技术可实现5.8%的增产;采用该技术后显著提高了玉米的抗倒伏能力,降低了高密群体玉米的倒伏风险,使微喷灌模式下增加种植密度成为增产的另一个技术途径,本研究通过增加种植密度又可实现4.7%的增产;另外本课题组2016年底曾对该区7村140户进行入户调查,农户平均玉米收获时间为9月22日,收获时间较早,而在前两项技术的基础上再推迟收获时间至10月3日又可实现11.2%的增产;3种技术综合应用可实现增产23.3%。说明采用微喷灌+高密度+延迟收获时间的集成技术,可充分发挥玉米的增产潜力。

4 结 论

玉米微喷灌集成技术模式包括微喷灌水肥一体化技术、增密技术和延迟收获期技术,3种技术综合应用可实现增产23.3%,其中增加密度和延迟收获时间对产量贡献较大,紧凑型玉米品种密度可设

置7.8万株·hm⁻²左右,收获日期可推迟至10月3日以后。该技术模式较微喷灌技术、增密技术、延迟收获期等单项技术增产优势更为明显,可充分发挥玉米的增产潜力。该模式的优点:改善了根层土壤的水分状况,使玉米生育前中期LAI较高,生育中后期绿叶持续期较长,CGR较高;增加了高密度下茎秆强度,提高了玉米抗倒伏能力。该模式的缺点:当前该区域农民习惯的玉米收获时间为9月22日左右,较早的收获习惯使该技术模式的推广还存在一定的难度;当前微喷灌系统配套农机设备较少,并且田间微灌系统安装、运行、保养的技术要点尚不明确,这些问题的解决是该项技术模式推广应用的前提。

参 考 文 献:

- [1] 肖俊夫,刘战东.中国玉米需水量与需水规律研究[J].玉米科学,2008,16(4):21-25.
- [2] 张正斌,崔玉亭,陈兆波,等.华北平原水资源平衡和节水农业发展的若干问题探讨[J].中国农业科技导报,2003,5(4):42-47.
- [3] 曹云者,宇振荣,赵同科.夏玉米需水及耗水规律的研究[J].华北农学报,2003,18(2):47-50.
- [4] Jiang Y. China's water scarcity[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90: 3185-3196.
- [5] 崔远来.非充分灌溉优化配水技术研究综述[J].灌溉排水,2000,19(1):66-70.
- [6] 周斌,封俊,张学军,等.微喷带单孔喷水量分布的基本特征研究[J].农业工程学报,2003,19(4):101-103.
- [7] Home P G, Panda R K, Kar S. Effect of method and scheduling of irrigation on water and nitrogen use efficiencies of Okra(*Abelmoschus esculentus*) [J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(2):159-170.
- [8] Sun Z Q, Kang Y H, Jiang S F. Effect of sprinkler and border irrigation on topsoil structure in winter wheat [J]. Pedosphere, 2010, 20(4):419-416.

- [9] 崔吉晓,檀海斌,吴佳迪,等.微喷灌水肥一体化对河北夏玉米生长及产量的影响[J].玉米科学,2017,25(3):105-110.
- [10] 魏子涵,魏占民,李春强,等.不同灌溉方式对玉米植株生长参数及产量的影响[J].水土保持研究,2017,24(3):183-187.
- [11] Kang Y H, Chen M, Wan S Q. Effects of drip irrigation with saline water on waxy maize (*Zea mays* L. var. *ceratina* Kulesh) in North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97 (9): 1303-1309.
- [12] 王勇,白玲晓,赵举,等.喷灌条件下玉米地土壤水分动态与水分利用效率[J].农业工程学报,2012,28(增刊):92-97.
- [13] 吕丽华,董志强,曹洁璇,等.播期、收获期对玉米物质生产及光能利用的调控效应[J].华北农学报,2013,28(增刊):177-183.
- [14] 耿广涛,宋桂成,董文庆,等.种植密度对不同叶位玉米叶片光合特性的影响[J].核农学报,2015,29(8):1589-1595.
- [15] 杨蕊菊,柴守玺,马忠明,等.水肥耦合对小麦玉米带田产量效应及土壤水分动态研究[J].核农学报,2011,25(5):1004-1009.
- [16] 李王成,黄修桥,龚时宏,等.玉米冠层对喷灌水量空间分布的影响[J].农业工程学报,2003,19(3):59-62.
- [17] 郝芝建,范兴科,吴普特,等.喷灌条件下夏玉米冠层对水量截留试验研究[J].灌溉排水学报,2008,27(1):25-27.
- [18] 张明智,牛文全,许健,等.微灌与播前深松对根际土壤酶活性和夏玉米产量的影响[J].应用生态学报,2016,27(6):1925-1934.
- [19] 王海瑞,吕志远,汤鹏程,等.喷灌条件下不同灌溉施肥对玉米耗水和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(3):72-78.
- [20] 郭丙玉,高慧,唐诚,等.水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(12):3679-3686.
- [21] 曹卫星.作物栽培学总论[M].北京:科学出版社,2006.
- [22] 钟兆站,赵聚宝,郁小川,等.中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析[J].中国农业气象,2000,21(2):1-4.
- [23] 李英,赵福年,丁文魁,等.灌溉方式和播期对玉米水分动态与水分利用效率的影响[J].中国农学通报,2015,31(6):62-67.
- [24] 白玲晓.鄂尔多斯高原玉米喷灌灌水技术模式试验研究—以鄂托克旗喷灌区为例[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2011.
- [25] 毛建昌,李向拓,李发民,等.玉米苗期抗旱性评价方法研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):155-158.
- [26] 姚素梅,康跃虎,刘海军,等.喷灌和地面灌溉条件下冬小麦的生长过程差异分析[J].干旱地区农业研究,2005,23(5):143-147.
- [27] 孙振山,刘昌明,张喜英,等.太行山前平原区作物-水分模型[J].干旱地区农业研究,2006,23(6):154-157.
- [28] Hu W, Shao M A, Reichardt K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 762-773.
- [29] 任丽雯,马兴祥,丁文魁.干旱区不同灌溉模式和播期对玉米干物质积累分配的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):147-153.

(上接第122页)

- [4] 苏松锦,刘金福,何中声,等.格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J].生态学报,2012,32(18):5673-5682.
- [5] 杨秀清,韩有志,李乐,等.华北山地典型天然次生林土壤氮素空间异质性对落叶松幼苗更新的影响[J].生态学报,2009,29(9):4656-4664.
- [6] 季荣,李典漠,谢宝瑜,等.基于沿海蝗区飞蝗卵块分布格局的土壤空间异质性[J].生态学报,2007,27(3):1019-1025.
- [7] 何艳芬,马超群.东北黑土资源及其农业可持续利用研究[J].干旱区资源与环境,2003,17(4):24-28.
- [8] 刘璐,曾馥平,宋同清,等.喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J].应用生态学报,2010,21(7):1667-1673.
- [9] 司建华,冯起,鱼腾飞,等.额济纳绿洲土壤养分的空间异质性[J].生态学杂志,2009,28(12):2600-2606.
- [10] 王秀虹,于东升,潘月,等.单种复合类型单元土壤全量元素空间变异的幅度效应[J].土壤学报,2017,54(4):864-873.
- [11] 刘付程,史学正,于东升,等.太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征[J].地理研究,2004,23(1):63-70.
- [12] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z , et al. Effect of sampling classification patterns on SOC variability in the red soil region, China [J]. Soil & Tillage Research, 2010 , 110(1):2-7.
- [13] 曹祥会,龙怀玉,周脚根,等.中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性——以河北省为例[J].生态学报,2017,37(18):6053-6063.
- [14] 王维奇,曾从盛,钟春棋,等.人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J].环境科学,2010,31(10):2411-2416.
- [15] 秦山,潮洛蒙.人为干扰对乌海市四合木小灌木景观的影响[J].生态学报,2014,34(21):6346-6354.
- [16] 于洋.新疆阜康煤田瓦斯渗流性的数学模型研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2013.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所.中国土壤数据库.[DB/OL].[2017-11-03],<http://vdb3.soil.csdb.ac.cn/>.
- [18] 张金池,李海东,林杰,等.基于小流域尺度的土壤可蚀性K值空间变异[J].生态学报,2008,28(5):2199-2206.
- [19] 田野,郭子祺,乔彦超,等.基于遥感的官厅水库水质监测研究[J].生态学报,2015,35(7):2217-2226.
- [20] 全国土壤普查办公室.中国土壤[M].北京:中国农业出版社,1998:356.
- [21] 王小艳,冯跃华,李云,等.黔中喀斯特山区村域稻田土壤理化特性的空间变异特征及空间自相关性[J].生态学报,2015,35(9):2926-2936.
- [22] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:150-156.
- [23] 白军红,邓伟,张玉霞,等.洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征[J].环境科学,2002,23(2):77-81.
- [24] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:192-208.
- [25] 徐晓燕,马毅杰,张瑞平.土壤中钾的转化及其与外源钾的相互关系的研究进展[J].土壤通报,2003,34(5):489-492.
- [26] 张希彪,上官周平.人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J].生态学报,2006,26(11):3685-3695.
- [27] 沈雅飞,王娜,刘泽彬,等.三峡库区消落带土壤化学性质变化[J].水土保持学报,2016,30(3):190-195.