

不同种植制度与土下微膜覆盖的小麦玉米水分利用效果

杜雄¹, 张永升¹, 王磊¹, 张立峰¹, 崔彦宏¹, 党红凯², 李科江²

(1. 河北农业大学农学院, 河北省作物生长调控重点实验室, 河北保定 071001;

2. 河北省农林科学院旱作农业研究所, 河北衡水 053000)

摘要: 针对华北平原北部水资源极度稀缺与小麦—玉米一年两熟生产水资源高耗的矛盾, 在河北省平原代表性区域采用大田试验方法, 在常规露地(-PM)和土下微膜覆盖(+PM)条件下设置冬小麦—夏玉米一年两熟(W-M)、冬小麦—夏玉米—春玉米两年三熟(W-M-M)2种植制度, 分析了不同种植模式的产量、水资源利用效果与土壤水分的时空变化动态。结果表明: 土下微膜覆盖的冬小麦平均产量较露地降低3.9%~4.8%, 夏玉米产量提高5.1%~6.0%, 覆盖与露地的周年产量无显著差异; 春玉米较夏玉米产量提高16.9%~24.6%, 但两年三熟较一年两熟产量在2年周期内平均降低了13.4%。常规一年两熟平均年耗水量859.9 mm, 两年三熟周年比一年两熟平均减少耗水15.5%, 因产量降低水分利用效率(WUE)未能显著提高; 土下微膜覆盖可减少周年耗水200 mm, WUE提高28.4%~36.0%, 覆盖的节水效果冬小麦季好于夏玉米季, 两年三熟下减少非生育期(上年夏玉米收获至翌年春玉米播种)耗水是节水的所在。常规露地条件下一年两熟农田水分亏损两年累计616.6~799.0 mm, 两年三熟比一年两熟可减少农田水分亏损38.6%~55.8%, 覆盖比露地减少56.8%~73.5%, 在年均降水560 mm条件下土下微膜覆盖结合两年三熟基本可实现地下水和农田水分的平衡。土下微膜覆盖和减少熟制可有效平衡土壤水分垂直分布、减少土壤表层水分损失。实施周年农田土下微膜覆盖结合小麦玉米两年三熟种植, 是有效缓解华北水资源危机与稳定粮食生产的新型实践方法。

关键词: 小麦; 玉米; 种植制度; 土下微膜覆盖; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S318; S512; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0226-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.03.035

Yield and Water Use Efficiency of Maize and Wheat Under Two Different Cropping Systems and Soil-Coated Ultra-Thin Plastic-Film Mulching

DU Xiong¹, ZHANG Yongsheng¹, WANG Lei¹, ZHANG Lifeng¹,

CUI Yanhong¹, DANG Hongkai², LI Kejiang²

(1. College of Agronomy, Hebei Agricultural University, Hebei Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Baoding, Hebei 071001; 2. Institute of Dryland Farming, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Hengshui, Hebei 053000)

Abstract: To relieve the characteristic conflict that the extremely scarce water resource cannot satisfy the large water requirement for wheat and maize double cropping production in the North China Plain (NCP), a field experiment was conducted in Xinji County and Shenzhou County which are located in Hebei Plain and represent the northern part of the NCP. Under conventional (-PM) and SUPM (+PM) conditions, two cropping systems were set, which were a conventional annual winter wheat-summer maize double cropping system (W-M) and a winter wheat-summer maize-spring maize triple-cropping system over 2 years (W-M-M), respectively. The results indicated that under SUPM the average wheat grain yield decreased by 3.9%~4.8%, and that of summer maize increased by 5.1%~6.0% compared with un-mulching treatment. There was no significant difference between SUPM and no mulching in total yield in the 1st year. Compared with summer maize, the spring maize yield increased by 16.9%~24.6%. However, in a 2-year cycle the triple cropping system sacrificed 13.4% of grain yield compared with the double cropping system. The average annual evapotranspiration (ET) of the conventional double cropping was 859.9 mm. Under the triple crop-

收稿日期: 2017-12-21

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300908); 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B05); 河北省现代农业产业技术体系玉米创新团队专项(HBCT2013020203, HBCT2013020206); 河北省青年优秀拔尖人才专项; 河北农业大学作物学科梯队建设基金项目(TD2016C204)

第一作者: 杜雄(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事作物丰产与资源高效利用工程研究。E-mail: duxiong2002@163.com

通信作者: 崔彦宏(1962—)男, 教授, 博士, 主要从事玉米高产高效研究。E-mail: cyh@hebau.edu.cn

ping system over 2 years, the ET was decreased by 15.5% and the water use efficiency (WUE) was not increased significantly due to its lower yield compared with the conventional double cropping. SUPM led to an annual ET decrease of 200 mm, and the WUE increased by 28.4%~36.0%. The results also demonstrated that SUPM was better at water saving in the winter wheat season than in the summer maize season. Reduced ET in the non-growing period (the gap from the previous summer maize harvest to subsequent spring maize sowing) was also the key factor for water saving under the triple cropping system. The field water deficit was 616.6~799.0 mm in the conventional double cropping over a 2-year cycle, and it was decreased by 38.6%~55.8% in the triple cropping without SUPM. Under SUPM the field water deficit was 56.8%~73.5% lower than that under non-SUPM treatments. In the triple cropping system under SUPM, both groundwater and field water balance were almost achieved with an average annual precipitation of over 560 mm. SUPM and reducing harvest frequency could balance the vertical distribution of soil water and reduce water loss near the soil surface. The triple cropping system under SUPM over 2 years could be regarded as a new method for sustainable agricultural water utilization and food production in NCP.

Keywords: wheat; maize; cropping system; soil-coated ultrathin plastic film mulching; grain yield; water use efficiency

华北平原北部水资源极度稀缺是冬小麦—夏玉米两熟生产的特征性制约因素,两熟生产对水的总量刚性需求与水资源日趋匮乏的态势存在着特征性的供需矛盾^[1-2]。区域的季风气候,决定了冬小麦生育需水通过抽取地下水来满足,而7—9月占全年总量80%以上的降水加之灌溉的“蒙头水”,夏玉米季水分数量甚或供过于求。降水与用水的特征性时序错位以及长期深井抽水灌溉导致地下水位以每年1 m的速度下降^[3],业已造成区域空前的水生态危机^[4]。因此在大田条件下探索缓解水资源供应与作物需求之间矛盾的有效途径,高效利用有限的水资源具有特殊意义。华北平原北部粮食生产在先天降水禀赋不足和后天亦无客水补给条件下,土壤水分有效保蓄和自然降水高效利用是减少地下水过度开采的必然选择,前人以小麦生产用水提“质”和耗水减“量”为核心做了大量工作。利用作物适度胁迫下的超补偿对策和正负效应互补创建了“春季一水超高产”技术^[5],随后秸秆覆盖减蒸^[6]、时量运筹降耗^[7]、调亏灌溉节水^[8]、土壤耕作保水^[9]和作物群体空间配置^[10]等高效用水研究相继展开,节水理论与实践取得了重要进展。但值得指出的是,节水研究主要集中在冬小麦上,而很少考虑玉米季农田水分在周年生产中的系统利用。与两熟生产伴生的小麦季大量灌溉、玉米收获后相对充足的土壤贮水无法实现春季调用、田间蒸发剧烈和水分周年供需总量严重失衡的矛盾至今无法有效缓解。地膜覆盖是凉爽干旱区节水和提高作物产量的有效方法^[11-13]。但对于小麦密植、温度相对较高的华北平原,传统地膜覆盖方式对区域节水生产并不适宜。依据前人“春玉米与华北平原降水的时空耦合度好且生产潜力优于夏玉米”的结果^[14-15],将不同熟制

下两年作为一个系统周期、通过引入春玉米来优化现有两熟种植制度。同时改进的“而土下微膜覆盖”方法实现了农田相对无隙覆盖有效控制了水分蒸发,小麦季可减少农田耗水100 mm以上^[16]。而土下微膜覆盖方法在周年以及不同种植制度间的节水效果也有待进一步明确。本研究将土下微膜覆盖与小麦、玉米不同种植制度相结合,探明不同种植模式的周年产量与用水效果,以求当前粮食生产有效突破水资源的刚性限制,实现高效用水和稳定粮食产量的目的。为华北平原有效缓解水资源供应与作物需求之间的特征性矛盾,解决农业生产水分高耗问题、恢复京畿水资源环境和保障国家粮食安全提供新的实践方法和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

田间试验于2009年10月至2013年10月在河北农业大学辛集试验站和河北省农林科学院深州试验站进行。辛集试验站位于河北省山前平原和黑龙港平原的过渡地带(37°47′58.30″ N, 115°17′53.23″ E, 海拔32 m),试验地土壤类型为壤质潮土,有机质13.50 g/kg,碱解氮72.6 mg/kg,速效磷15.7 mg/kg,速效钾134.5 mg/kg;深州试验站位于黑龙港平原区(37°54′12.50″ N, 115°42′10.94″ E, 海拔20 m),试验地土壤类型为黏壤质潮土,有机质12.53 g/kg,碱解氮65.8 mg/kg,速效磷15.3 mg/kg,速效钾121.9 mg/kg。试验站间直线距离37.1 km,年降水量500 mm,年平均气温12.7℃,地下水埋深10 m以下。每个试验站灌水均能实现定量,两试验地的2 m土层性状见表1。试验期2009—2010年度降水量474.8 mm,2010—2011年度降水量427.2 mm,属于降水偏少年型;2011—2012年度降水量

493.8 mm, 2012—2013 年度降水量 628.1 mm, 属于 平水至丰水年型。降水主要集中在 7—9 月。

表 1 试验地土壤性状

土层 深度/cm	辛集			深州		
	容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水量/%	凋萎 含水量/%	容重/ (g·cm ⁻³)	田间 持水量/%	凋萎 含水量/%
0—20	1.34	36.1	11.6	1.38	37.2	10.5
20—40	1.43	34.7	12.2	1.49	34.8	11.5
40—60	1.39	35.7	13.3	1.42	34.3	12.2
60—80	1.49	33.8	12.9	1.45	34.8	12.2
80—100	1.39	34.3	13.9	1.51	33.6	11.5
100—130	1.38	34.7	12.8	1.31	35.1	13.6
130—160	1.36	35.3	13.5	1.44	34.0	13.3
160—200	1.45	38.6	14.2	1.39	34.9	12.6

注:田间持水量和凋萎含水量用土壤体积含水量表示(%),下同。

1.2 试验设计

2009—2011 年在辛集、2011—2013 在深州各实施 2 个试验年度,设置常规露地条件下冬小麦—夏玉米一年两熟[W—M(-PM)](对照),土下微膜覆盖下冬小麦—夏玉米一年两熟[W—M(+PM)]、常规露地下冬小麦—夏玉米—春玉米两年三熟[W—M—M(-PM)]和土下微膜覆盖下冬小麦—夏玉米—春玉米两年三熟[W—M—M(+PM)]等 4 个处理。采用随机区组排列,3 次重复,共 12 个小区。不同处理之间有 1 m 宽的隔离带,正常种植作物。

辛集试验冬小麦采用石麦 15,夏玉米、春玉米均以郑单 958 作为供试品种;深州试验供试品种冬小麦采用石优 20、夏玉米采用郑单 958、春玉米为登海 661。4 个年度的冬小麦在 10 月 12—18 日播种,冬小麦收获后当天或次日播种夏玉米,时间在 6 月 13—21 日;春玉米在 5 月 15 日(辛集)和 18 日(深州)播种,2 种植制度的玉米均在 10 月 5 日收获。辛集和深州冬小麦播种量分别为 270,300 kg/hm²,15 cm 等行距种植;玉米采用 60 cm 等行距种植,留苗密度辛集为 75 000 株/hm²、深州为 82 500 株/hm²。每地试验在实施的第 1 年度,于小麦播种前 10 天(上茬玉米灌浆后期)对全部试验地灌水 100 mm

以平衡试验地土壤水分含量,因试验从小麦开始,故该灌溉量不计入试验的耗水量。

辛集试验中,常规条件下冬小麦在拔节、抽穗和灌浆(5 月 20—25 日)等时期灌水 3 次,每次灌水 75 mm,微膜覆盖下小麦整个生育期不灌水;夏玉米播种后和收获前 1 周分别灌水 75,60 mm,收获前的灌水为下茬冬小麦播种造墒。春玉米露地种植的播后降水 57.4 mm,免灌“蒙头水”,在 7 月上旬大口期灌水 75 mm。土下微膜覆盖的春玉米整个生育期无灌水。

深州试验中,常规露地条件下,冬小麦灌水时间与数量同辛集试验,夏玉米仅灌溉 75 mm“蒙头水”后无其他灌溉;春玉米仅在播后灌溉 75 mm 的“蒙头水”。微膜覆盖下在小麦拔节后扬花前灌水 75 mm,春玉米整个生育期无灌水。

冬小麦按 N 270 kg/hm²、P₂O₅ 135 kg/hm²、K₂O 180 kg/hm²,玉米按 N 300 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 180 kg/hm² 施肥,各处理的灌水量见表 2。肥料使用尿素、磷酸二铵和氯化钾,在小麦播种时全部的氮磷钾肥底施,玉米播种时占总量 30%的氮肥和全部的磷钾肥作为底肥或种肥施用,其余 70%的氮肥在玉米 12 片展开叶(大喇叭口期)趁雨追施。

表 2 试验处理的灌水量

单位:mm

试验地	处理	第 1 年度				第 2 年度				2 年总和
		作物	灌水量	作物	灌水量	作物	灌水量	作物	灌水量	
辛集	W—M(-PM)	冬小麦	225	夏玉米	135	冬小麦	225	夏玉米	75	660
	W—M(+PM)	冬小麦	0	夏玉米	135	冬小麦	0	夏玉米	75	210
	W—M—M(-PM)	冬小麦	225	夏玉米	75	春玉米	75	—	—	375
	W—M—M(+PM)	冬小麦	0	夏玉米	75	春玉米	0	—	—	75
深州	W—M(-PM)	冬小麦	225	夏玉米	75	冬小麦	225	夏玉米	75	600
	W—M(+PM)	冬小麦	75	夏玉米	75	冬小麦	75	夏玉米	75	300
	W—M—M(-PM)	冬小麦	225	夏玉米	75	春玉米	75	—	—	375
	W—M—M(+PM)	冬小麦	75	夏玉米	75	春玉米	0	—	—	150

注:辛集试验点为 2009—2010 年度(第 1 年度)和 2010—2011 年度(第 2 年度);深州试验点为 2011—2012 年度(第 1 年度)和 2012—2013 年度(第 2 年度)。下同。

田间作业程序为:夏玉米收获后将秸秆清走,均匀撒施肥料后旋耕 2 遍,清理玉米根茬后镇压,播种

冬小麦并耧平田面。实施土下微膜覆盖的处理,播种耧平田面后用幅宽 2 m、厚度 0.004 mm 的聚乙烯吹

塑微膜覆盖地面,覆膜时将膜拉紧,膜面平展无皱褶,其上覆土1~2 cm,以全部覆盖地膜为标准,以此实现小麦自动破膜出苗和麦田的无缝隙覆盖,隔绝田间水分蒸发。小麦收获后,微膜继续覆盖田面并人工微膜破孔点种夏玉米,施用的肥料用“蒙头水”溶解渗入土壤。夏玉米收后将秸秆清理出试验田后保持原样,土下微膜覆盖至翌年春季,春玉米播种前将微膜和上年的残茬捡出,试验地施肥旋耕耧地后播种春玉米,播后实施覆膜盖土作业,程序与冬小麦一致,为保证春玉米生育前期的土壤能够获得足够降水,地膜采用厚度为0.004 mm的微孔渗水地膜。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分含量的测定和田间耗水量的计算

在冬小麦、夏玉米、春玉米播种、收获(夏玉米播种即冬小麦收获)时,冬小麦灌水前,玉米拔节时和以后每10~15天、单次降水量超过50 mm和连续1周累积降水超过100 mm时的2天内,用土钻钻取0~200 cm土层土样,每层20 cm,采用烘干法测定土壤含水量。在本研究中,如果监测到作物根层2 m土壤实际贮水量超过田间持水量即为发生土壤水分深层渗漏。试验周期内用自动气象站跟踪监测降水量。试验观察表明,各年度每次降水和灌水均未形成径流。计算公式为^[17]:

$$\text{土壤贮水量(mm)} = \text{土层厚度(cm)} \times \text{土壤容重(g/cm}^3\text{)} \times \text{水重/干土重} \times 10$$

$$\text{土壤贮水变化量(mm)} = \text{阶段初土壤贮水量(mm)} - \text{阶段末土壤贮水量(mm)}$$

$$\text{生育期耗水量(mm)} = \text{当季作物播种时土壤贮水量(mm)} - \text{当季作物收获时土壤贮水量(mm)} + \text{生长期降水量(mm)} + \text{灌水量(mm)}$$

(注:本算式适用于土体未发生渗漏田间耗水量的计算;若土体发生渗漏,田间耗水量则使用相同处理未发生渗漏时的数据)

$$\text{非生育期耗水量(mm)} = \text{上季(茬)作物收获时土壤贮水量} - \text{下季(茬)作物播种时土壤贮水量(mm)} + \text{期间降水量(mm)}$$

(注:非生育期无灌水)

$$\text{全年耗水量(mm)} = \text{生育期耗水量(mm)} + \text{非生育期耗水量(mm)}$$

$$\text{土壤水深层渗漏量(mm)} = \text{土壤贮水量(mm)} + \text{降水量(mm)} + \text{灌水量(mm)} - \text{同一试验处理往年未发生渗漏时的田间耗水量(mm)} - \text{田间持水量(mm)}$$

$$\text{地下水消耗量(mm)} = \text{灌水量(mm)} - \text{土壤水渗漏量(mm)}$$

$$\text{农田水平衡(mm)} = \text{地下水消耗量(mm)} + \text{土壤贮水消耗量(mm)}$$

因2个试验地点的地下水埋深均在10 m以下,计算公式中的地下水补给量、径流量在此均以0计

算,小麦生长季的灌水和降水累加在1周内未超过100 mm,且灌水与灌水前土壤贮水累加未超过田间持水量,土壤水渗漏量以0计算。

1.3.2 产量的测定和耗水效果的计算

小麦成熟后在各小区中心区域选取2 m×2 m的面积,从地面处收获后并脱粒,称重并用PM-8188谷物水分测定仪测定籽粒水分含量,再按含水量13%折合单位面积产量。玉米收获时,在每小区中间收获3.5 m长×4行的果穗,晒干后进行脱粒称重,测定含水量并按14%商品含水量折合单位面积产量。

水分利用效率计算公式为:

$$\text{生育期水分利用效率[kg/(hm}^2 \cdot \text{mm)}] = \frac{\text{籽粒产量(kg/hm}^2\text{)}}{\text{生育期耗水量(mm)}}$$

$$\text{全年水分利用效率[kg/(hm}^2 \cdot \text{mm)}] = \frac{\text{籽粒产量(kg/hm}^2\text{)}}{\text{周年耗水量(mm)}}$$

采用Excel 2003整理数据和绘图;用SAS 8.12软件统计数据,并用Duncan's新复极差法比较差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同处理下小麦、玉米产量

由表3可知,试验的第1个年度,全部处理均为一年两熟,覆盖下因基本苗数减少,冬小麦平均产量较露地降低3.9%~4.8%,但土下微膜覆盖平衡了土壤贮水在时间序列上的数量分布,夏玉米产量提高5.1%~6.0%,结果是覆盖与露地的周年产量不具有显著差异。第2个年度成为一年两熟和一年一熟的种植模式,两熟制下产量结果与上年一致,而春玉米较夏玉米露地下产量提高20.5%~24.6%,覆盖下提高16.9%~21.0%,覆盖也使得春玉米产量较露地提高3.5%~6.1%,但对于周年产量而言,春玉米一熟较冬小麦一夏玉米两熟平均减产28.6%。在2年的实施周期内,一年两熟较两年三熟具有显著的产量优势,两年三熟两地平均则减产13.4%。2种植制度下,覆盖比常规露地玉米产量均有不同程度的提升,而因小麦减产导致一年两熟的最终产量在露地与覆盖间无显著差异。

2.2 不同处理下耗水和水分利用效率

由表4可知,常规露地一年两熟平均全年耗水量859.9 mm,小麦季耗水高于夏玉米季。覆盖后冬小麦和夏玉米的耗水量平均分别降至露地的73.2%和81.8%,覆盖的节水效果冬小麦季好于夏玉米季。两熟条件下土下微膜覆盖可平均减少周年耗水近200 mm,生育期WUE在冬小麦季和夏玉米季分别提高了24.3%~41.0%和20.6%~30.8%,全年WUE平均提高28.6%~35.0%。第2年度春玉米一熟较冬小麦一夏玉米两熟生育期内耗水露地和覆盖下分别降低365.2,267.5 mm。但特别需要说明的是,一

年两熟仅存在夏玉米与冬小麦接茬时的 6.8~13.1 mm 非生育期耗水,两年三熟非生育期(从上年夏玉米收获至翌年春玉米播种)耗水露地和覆盖下分别为 122.3~138.4,52.8~60.2 mm,导致春玉米一熟全年耗水露地和覆盖条件下分别攀升至两熟的 70.0%~72.8%,64.1%~69.7%,因而也导致 2 种熟制间的全年 WUE 无显著差异。综合 2 地 2 年结果表明,周

年耗水量两年三熟比一年两熟减少 15.5%、WUE 未显著提高;覆盖比露地周年耗水降低 23.3%,WUE 提高 33.9%。由此可见,覆盖的节水效果显著好于种植制度的改变,其节水不仅在于有效降低生育期的无效蒸发,还在于有效减少两年三熟下非生育期的水分消耗,土下微膜覆盖较高的 WUE 是水分跨季节跨年度高效调用的体现。

表 3 不同处理下的小麦玉米产量

试验地	作物	第 1 年度				第 2 年度				2 年总和			
		W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M
		(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)
辛集	小麦	8185a	7875ab	8087a	7611b	8585a	7970b			16770a	15845b	8087c	7611d
	玉米	9681b	10332a	9794ab	10129ab	10258d	11225c	12361b	13118a	19939c	21557b	22155b	23247a
	小计	17866a	18208a	17881a	17740a	18843a	19194a	12361c	13118b	36709a	37402a	30243b	30858b
深州	小麦	8163a	7910ab	8075a	7702b	7076a	6669b			15239a	14579a	8075b	7702b
	玉米	10691b	11198a	10517b	11291a	10813c	11521b	13470a	13938a	21504d	22719c	23987b	25228a
	小计	18854a	19108a	18591a	18992a	17889a	18190a	13470b	13938b	36743a	37297a	32062b	32930b

注:每行数据后不同字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下同。

表 4 不同处理下的小麦、玉米耗水量和水分利用效率

试验地	指标	第 1 年度				第 2 年度				2 年总和			
		W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M
		(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)
辛集	小麦生育期耗水量	464.6a	326.3b	455.2a	314.7b	444.3a	306.1b			908.9	632.4	455.2	314.7
	玉米生育期耗水量	394.6a	322.8b	377.4a	323.7b	379.2b	315.1c	468.3a	381.8b	773.8	637.9	845.7	705.5
	非生育期耗水量	7.9a	11.4a	6.8a	9.2a	10.4b	13.1b	138.4a	60.2b	18.3	24.5	145.2	69.4
	全年耗水量	867.1a	660.5b	839.4a	647.6b	833.9a	634.3b	606.7b	442.0c	1701.0a	1294.8c	1446.1b	1089.6d
	小麦生育期水分利用效率	17.6b	24.1a	17.8b	24.2a	19.3b	26.0a			18.5	25.1	17.8	24.2
	玉米生育期水分利用效率	24.5b	32.0a	26.0b	31.3a	27.1b	35.6a	26.4b	34.4a	25.8	33.8	26.2	33.0
	全年水分利用效率	20.6b	27.6a	21.3b	27.4a	22.6b	30.3a	20.4b	29.7a	21.4b	29.1a	20.9b	28.3a
	小麦生育期耗水量	441.1a	335.4b	459.6a	328.2b	452.1a	351.3b			893.2	686.7	459.6	328.2
	玉米生育期耗水量	406.3a	330.7b	411.8a	348.9b	417.4a	337.5b	494.3a	393.2b	823.7	668.2	906.1	742.1
	非生育期耗水量	10.3a	12.1a	7.2b	9.4b	11.3a	7.1b	122.3a	52.8b	21.6	19.2	129.5	62.2
深州	全年耗水量	857.7a	678.2b	878.6a	686.5b	880.8a	695.9b	616.6c	446.0d	1738.5a	1374.1c	1495.2b	1132.5d
	小麦生育期水分利用效率	18.5b	23.6a	17.6b	23.5a	15.6b	19.0a			17.1	21.2	17.6	23.5
	玉米生育期水分利用效率	26.3b	33.9a	25.5b	32.1a	25.9b	34.1a	27.3b	35.4a	26.1	34.0	26.5	34.0
	全年水分利用效率	22.0b	28.2a	21.2b	27.7a	20.3c	26.1b	21.8c	31.3a	21.1c	27.1a	21.4c	29.1a

注:耗水量单位为 mm;水分利用单位为 kg/(hm²·mm)。

2.3 不同处理下水分消耗与平衡

2009—2011 年度属于降水较少甚或缺水年型。在辛集试验的灌水条件下,4 个处理均未发生水分渗漏而且出现了土壤贮水的消耗(表 5),2 年试验周期内一年两熟条件下,露地种植有近 800 mm 的农田水分亏损,覆盖则比露地减少水分亏损 406.2 mm;两年三熟种植与一年两熟相比,农田水分亏损露地条件下降低 31.9%,而覆盖下则不足 200 mm。

在 2011—2012 年度平水年型下,两熟种植依然存在土壤贮水和农田水分的净亏损。而在 2012—2013 丰水年型下,各处理出现了水分深层渗漏,最大 166.2 mm 的渗漏量出现在覆盖两年三熟[W-M-M(+PM)]处理,其他为覆盖一年两熟[W-M(+PM)]>露地两年三熟[W-M-M(-PM)]>常规一年两熟[W-M(-PM)],土壤贮水量除覆盖一年

两熟[W-M(+PM)]外,其他处理较上一年度同期增长 5.4~33.9 mm,农田水分净消耗较上年度显著降低,两年三熟下农田水分还得到回补,回补量覆盖高于露地 170.6 mm。2 个年度下来覆盖两年三熟[W-M-M(+PM)]的地下水得到 16.2 mm 的补充,农田水分亏损仅 10.6 mm。整个试验的土壤贮水在丰水年的回补量小于上年的消耗量,表现为净亏损 26.8~58.5 mm。

综上所述,露地下一年两熟两年农田水分亏损 616.6~799.0 mm,两年三熟比一年两熟平均可减少农田水分亏损 38.6%~55.8%,覆盖比露地减少 56.8%~73.5%,在年度平均降水 560 mm 条件下覆盖与两年三熟相结合基本实现了地下水和农田水分的平衡,在常年降水条件下可将年度农田水分亏损从常规一年两熟 354 mm 降至 50 mm。华北平原减少熟制和实施土下微

膜覆盖可有效降低地下水消耗,促进农田水分平衡,且土下微膜覆盖效果好于熟制的改变。

表5 不同处理下的水分消耗与平衡

单位:mm

试验地	指标	第1年度				第2年度				2年总和			
		W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M
		(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)
辛集	降水	474.8	474.8	474.8	474.8	427.2	427.2	427.2	427.2	902	902	902	902
	灌水	360	135	300	75	300	75	75	0	660	210	375	75
	渗漏	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	地下水变化	360	135	300	75	300	75	75	0	660	210	375	75
	土壤贮水变化	32.3c	50.7bc	64.6b	97.8a	106.7b	132.1a	104.5b	14.8c	139.0bc	182.8a	169.1ab	112.6c
	农田水分平衡	392.3a	185.7b	364.6a	172.8b	406.7a	207.1b	179.5c	14.8d	799.0a	392.8c	544.1d	187.6d
	降水	493.8	493.8	493.8	493.8	628.1	628.1	628.1	628.1	1122	1122	1122	1122
深州	灌水	300	150	300	150	300	150	75	0	600	300	375	150
	渗漏	0	0	0	0	41.9c	85.4b	52.6c	166.2a	41.9c	85.4b	52.6c	166.2a
	地下水变化	300	150	300	150	258.1a	64.6b	22.4c	-166.2d	558.1a	214.6c	322.4b	-16.2d
	土壤贮水变化	63.9b	34.4c	84.8a	42.7c	-5.4b	3.2b	-33.9a	-15.9b	58.5a	37.6ab	50.9a	26.8b
	农田水分平衡	363.9a	184.4b	384.8a	192.7b	252.7a	67.8b	-11.5d	-182.1c	616.6a	252.2b	373.3b	10.6d

2.4 不同处理下土壤贮水量变化

由表6可知,在第1个年度,2地小麦播种时2m土体贮水在各处理间不存在显著差异,辛集试验小麦成熟时,覆盖下因少灌水225mm,土壤贮水比露地多消耗76.0~82.8mm;深州小麦拔节期灌水75mm,收获时覆膜下的土壤贮水消耗比辛集平均少44.8mm。辛集一年两熟露地条件下夏玉米后期灌溉60mm,收获时获得了与覆盖相当的土壤贮水;而两年三熟处理仅在夏玉米播种时灌水75mm,收获时的土壤贮水显著低于一年两熟,深州覆盖2个处理的土壤贮水显著高于露地。在第2个年度,辛集一年两熟下,土壤贮水在小麦和玉米收获

时比上年同期继续减少,覆盖比露地减少量更大;春玉米一熟时的土壤贮水,播种和收获时露地显著低于覆盖处理,收获时2年灌水75mm的覆盖两年三熟[W-M-M(+PM)]与灌水660mm常规一年两熟[W-M(-PM)]无显著差异,灌水210mm的覆膜一年两熟[W-M(+PM)]与灌水375mm的露地两年三熟[W-M-M(-PM)]无显著差异。深州因小麦季降水总量较多,小麦收获时相同处理2年度间土壤贮水无差异;春玉米播种时露地下较上年夏玉米收获时减少44.0mm,覆盖下则增加25.5mm,收获时土壤贮水较上年同期增加15.9~33.9mm。

表6 不同处理不同时期的2m土壤贮水量

单位:mm

试验地	时期	第1年度				第2年度			
		W-M	W-M	W-M-M	W-M-M	W-M	W-M	W-M-M	W-M-M
		(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)	(-PM)	(+PM)
辛集	小麦播种	646.3a	657.0a	635.6a	637.3a	611.5a	604.6a		
	小麦收获	502.1a	426.1b	500.8a	418.0b	488.3a	394.6b		
	玉米播种	502.1a	426.1b	500.8a	418.0b	488.3b	394.6d	533.7b	582.8a
	玉米收获	621.9a	617.7a	577.8b	548.7b	515.2a	485.6b	473.3b	533.9a
	小麦播种	671.3a	681.3a	686.8a	677.4a	606.4b	651.9a		
深州	小麦收获	518.0a	483.7b	515.0a	480.0b	501.5a	497.8a		
	玉米播种	518.0a	483.7b	515.0a	480.0b	501.5c	497.8c	565.2b	669.6a
	玉米收获	617.7b	659.0a	609.2b	644.1a	623.1b	655.8a	643.1ab	660.0a

2.5 不同处理下土体各层次的贮水变化

以深州为例(图1),在2011—2012年露地种植的冬小麦消耗土壤贮水主要在0—120cm土层,覆盖下耗水层比露地深40cm,60—160cm土层贮水较露地相同层次平均少2.5~11.2mm,覆盖下因灌水较少,冬小麦增加了对土壤水的吸收深度和强度。夏玉米收获时各层次土壤贮水得到恢复,但露地种植0—120cm土层贮水较上年小麦播种时少3.8~13.0mm/层(每层20cm),覆盖下相同层次贮水差距较小,因9月降水较多,玉米收获时的2m土体各层次贮水较为一致。

2012—2013年度,小麦收获时覆盖处理各层土壤贮水与上年同期基本持平,而露地60—140cm土

层则比上年同期降低4.1~4.8mm/层,说明小麦耗水深度在继续加大。对于春玉米一熟来说,播种时露地的0—60cm土层贮水较上年夏玉米收获时显著降低,越往上层失水越多,以至于20cm土层相对含水量仅为58.6%;而覆盖的土壤各层贮水与2011年小麦播种时相当。玉米收获时,因9月的降水量较少,覆盖下以60cm、露地以80cm为界,以下土层贮水达到或超过2011年同期数量,以上距地面越近则贮水越低,表层土壤失水表现出两熟且露地种植趋多、春玉米一熟且微膜覆盖显著趋少的特点,覆盖和降低熟制可有效平衡土体水分垂直分布、减少土壤表层水分损失。

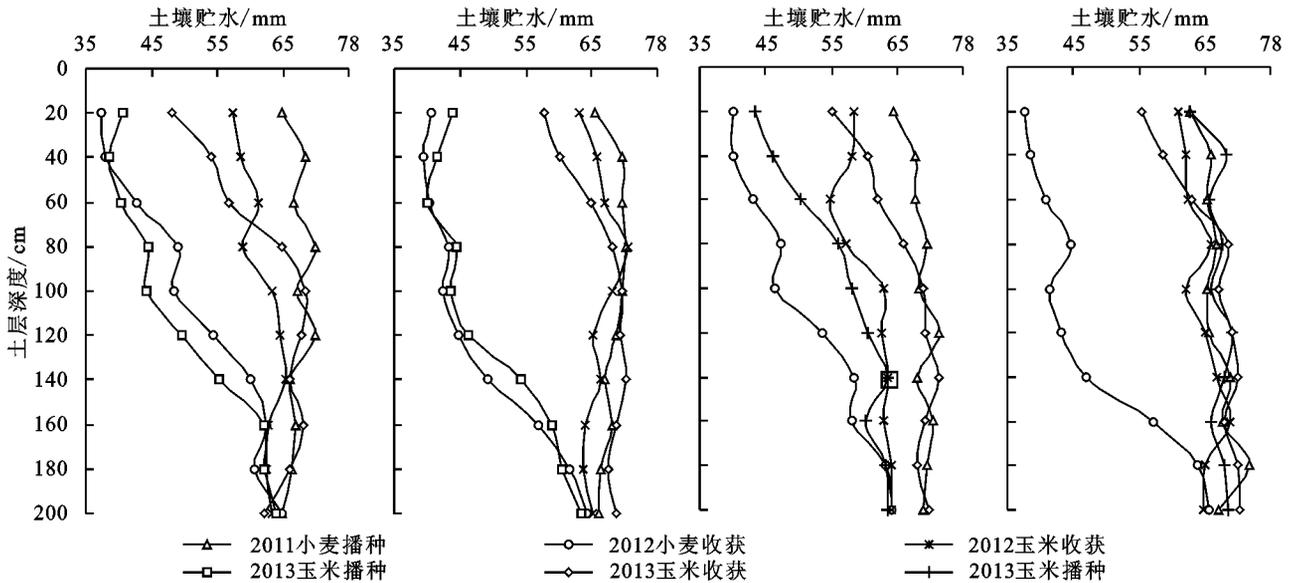


图 1 深州试验不同熟制和土下微膜覆盖下 2 m 土体各层次的贮水量

3 讨论

华北平原北部粮食生产集食物保障、生态保育、经济发展三大功能与矛盾为一体。小麦—玉米两熟种植的增产作用,为保障国家粮食安全做出了重要贡献,也由此造成地下水资源日趋匮乏的态势^[18],继续延续传统的小麦—玉米两熟种植会进一步加剧区域水资源环境的脆弱性^[19]。改革现行种植模式,减少地下水消耗、提高水资源利用效率已成为目前亟需。本研究采用的土下微膜无隙覆盖种植新方法,解决了传统技术中地膜裸露造成土壤升温,导致小麦早衰而减产、土壤水分快速蒸发而不能有效节水等问题,同时平衡了玉米季因降水不均导致的土壤水分在时序上的剧烈变化而提高了玉米产量。

试验期间的气象数据表明,小麦季多为<5 mm 的无效降水,因冠层和地表对降水的滞留,有效降水渗至深处土层的比例也会大幅减少,因此有效储蓄夏秋土壤水并实现跨年度调用比利用春季降水更有实际意义。笔者认为,农田节水的根本在于“有水时蓄水保水”和“无水时供水用水”,实现水分在时间和数量的供需平衡,“节水的关键在有水,节水的目的在用水,有水时不保则干旱时无水可用”。土下微膜覆盖为夏秋汛期恢复土壤库水、降低夏玉米耗水、实现降水的“秋贮春用”提供了条件。汛期降水与玉米耗水具有总量协调而时序供求不平衡的特征^[17,20],土下微膜覆盖下减少小麦季灌水和增加深层吸水,扩大了夏玉米季土壤水分库容^[17],同时储蓄土壤水并降低蒸发,缓解了水分时序供求失衡的矛盾,丰水年发生的渗漏又可补充地下水。

农田水分存在着资源化蒸腾与环境化蒸发两种途径,在降水很难发生径流的情况下,有效遏制蒸发是农田节水的核心。研究表明,一年两熟仅存在

6.8~13.1 mm 的接茬耗水,露地两年三熟的非生育期耗水多达 122.3~138.4 mm,同两熟相比春玉米一熟较高的生育期 WUE 和无差异全年 WUE 的结果,说明有效降低非生育期环境蒸发耗水的重要性,土下微膜覆盖结合两年三熟的种植制度则是实现水分利用“数量上节省、质量上高效、环境变资源”的有效手段。同时夏玉米收后土壤贮水较播前大幅增加,此时土壤贮水的储蓄是保障下季作物节水生产的关键节点,土壤水分的“夏秋蓄存、冬季保贮、春季供应”对于小麦和春玉米节水高产或稳产具有特别意义,全田土下微膜覆盖则是一种实现土壤水分跨季节、跨作物调度的高效用水方法。

本研究中露地条件下出现的玉米收后土体表层贮水少、深层贮水多的原因在于玉米浅层土壤根系吸水较多且贮水蒸发较为剧烈,以及玉米季的降水量及其前期多、后期少的时序分布,这也是生产上两熟种植经常出现造墒或抢墒种麦的原因。而土下微膜覆盖减少浅层土壤贮水消耗的效果可平衡土壤贮水在垂直方向上的分布。研究表明,采用土下微膜覆盖可有效减少周年耗水 200 mm,周年平均降水在不低于 560 mm 实施两年三熟还可实现地下水和农田水分的采补平衡。而前人^[17,21]在河北吴桥的研究结果表明,在一年两熟种植制度下,农田经过汛期水分在玉米收获时可恢复至同期的状态。这与本研究的结果不同,原因在于常年条件下辛集和深州全年尤其是夏玉米季降水较吴桥显著偏少。

本研究条件下,常规小麦—玉米一年两熟随种植时间的延续,农田土体贮水呈现出下降的趋势,灌溉是维持当前产量的必要条件。若不考虑土壤储水能力与数量、单次灌水量、降水量及其时序分布与作物生育需水的吻合性等条件,实现小麦“一水产千斤”的

结果^[22-23]是很困难的,连续多年稳定重现则难度更大。本研究中,虽然春玉米产量最高达到了 13 938 kg/hm²,但两年三熟仍比一年两熟产量降低了 13.4%。通过合理密植,我国春玉米获得了 19 133 kg/hm² 的高产^[24],美国玉米雨养条件下产量也达到 27 743 kg/hm²^[24],据此培育高密抗倒高产品种,可视为弥补两年三熟产量劣势并进一步提高 WUE 的有效途径。华北平原北部地处一年一熟和两熟的过渡地带,春播玉米品种也需具有生育期长、耐高温性能好、籽粒脱水快、收前抗倒性强的特点,以充分适应和利用区域水热资源条件,并满足种植制度变化后玉米机械化直接收粒、降低成本和提高生产效率的社会需求。

本研究采用的“土下微膜覆盖种植”方法,固然存在着残膜回收增加生产成本的不足,同时两熟生产也导致河北平原地下水严重超采的问题。若不及时有效遏制地下水连年超采的态势,势必会造成京津周边地下水甚或枯竭并引发如地面下沉或局部塌陷的次生地质灾害。因此在农业节水增加经济成本和地下水过量开采导致灾难之间存在着一种博弈。笔者认为用一种“显性地膜污染”或增加残膜回收成本去替代“隐性地质灾难”,采用优效替代的系统学策略,防范未来水资源环境问题具有重大现实意义,这也是学术界长期在节水与污染(增加成本)进行“取舍”的科学争论中需要注意的问题。

对于残膜在农田中的污染,从农艺方法上可以通过增加地膜使用频次间接加以减轻。土下微膜覆盖下小麦收获后打孔破膜种植夏玉米、翌年在夏玉米行间种植春玉米,本研究还可建立起“一膜、两年、三用”的小麦、玉米种植模式,采用两季玉米免耕种植、提高地膜使用效率和减少农田污染。在第 1 季种植小麦前,若在农田中施入足量有机肥或长效缓释肥,不但可以增加土壤水分库容,还可以弥补作物生长期不追肥所带来的不足。本试验的盖膜和覆土过程由人工实施,如何在实际生产中进行应用,覆膜、盖土单项或一体化机械研发与配套应是下一步需要解决的技术问题。当然,借鉴甘肃目前的“全膜覆土穴播小麦技术”^[25]还可以实现盖膜、覆土、播种以及残膜回收的机械化作业,又可从机械化角度直接提高作业效率和减少地膜在农田中的残留。

4 结论

(1)土下微膜覆盖的冬小麦平均产量较露地降低 3.9%~4.8%,夏玉米产量提高 5.1%~6.0%,覆盖与露地的周年产量无显著差异;春玉米较夏玉米露地下产量提高 16.9%~24.6%,但两年三熟较一年两熟产量在两年的研究周期内平均降低了 13.4%。

(2)常规一年两熟年耗水量 859.9 mm,土下微膜覆

盖减少年耗水量 200 mm,WUE 提高 28.4%~36.0%;减少熟制在露地和覆盖下分别降低生育期内耗水量 175.6~190.9,125.1~142.3 mm,因两熟三熟存在较大的非生育期耗水,2 种熟制的全年 WUE 无显著差异。土下微膜覆盖的节水效果显著优于熟制减少,可减少两年三熟非生育期耗水 69.5~78.2 mm。

(3)露地下一年两熟 2 年内农田水分亏损 616.6~799.0 mm。两年三熟比一年两熟可减少农田水分亏损 38.6%~55.8%,覆盖比露地减少 56.8%~73.5%。土下微膜覆盖结合两年三熟,在年平均降水 560 mm 条件下可基本实现地下水和农田水分的平衡,在常年降水年型可将年度农田水分亏损从常规两熟种植的 354 mm 降至 50 mm。

(4)土壤贮水和水分在土层内的分布变化与年度降水总量及其时间分布有关,全年降水较少而夏玉米后期降水多表现为通体贮水少而表层较多,反之出现水分深层渗漏而表层干旱的矛盾。土下微膜覆盖和减少熟制可有效平衡土体水分垂直分布、减少土壤表层水分损失。

参考文献:

- [1] Liu C M, Yu J J, Eloise K. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain [J]. *Water International*, 2001, 26(2): 265-272.
- [2] 孙爽,杨晓光,李克南,等. 中国冬小麦需水量时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 72-82.
- [3] Yuan Z J, Shen Y J. Estimation of agricultural water consumption from meteorological and yield data: A case study of Hebei, North China [J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): e58685.
- [4] 杨贵羽,汪林,王浩. 基于水土资源状况的中国粮食安全思考[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 1-5.
- [5] 王树安,兰林旺,周殿玺,等. 冬小麦节水高产技术体系研究[J]. *中国农业大学学报*, 2007, 12(6): 44.
- [6] He J, Wang Q J, Li H W, et al. Effect of alternative tillage and residue cover on yield and water use efficiency in annual double cropping system in North China Plain [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 198-205.
- [7] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat [J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1-10.
- [8] Zhang X Y, Wang Y A, Sun H Y, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1103-1112.
- [9] 吕美蓉,李增嘉,张涛,等. 少免耕与秸秆还田对极端土

- 壤水分及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1):41-46.
- [10] Chen S Y, Zhang X Y, Sun H Y, et al. Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1126-1132.
- [11] Dong B D, Liu M Y, Jiang J W, et al. Growth, grain yield, and water use efficiency of rain-fed spring hybrid millet (*Setaria italica*) in plastic-mulched and unmulched fields [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 143(9): 93-101.
- [12] Liu C A, Zhou L M, Jia J J, et al. Maize yield and water balance is affected by nitrogen application in a film-mulching ridge-furrow system in a semiarid region of China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52(1): 103-111.
- [13] Zhu L, Liu J L, Luo S S, et al. Soil mulching can mitigate soil water deficiency impacts on rainfed maize production in semiarid environment [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 58-66.
- [14] Sun Q P, Roland K, Torsten M, et al. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(5): 808-814.
- [15] Meng Q F, Sun Q P, Chen X P, et al. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 46(1): 93-102.
- [16] 何立谦, 张维宏, 张永升, 等. 土下微膜覆盖与灌水管理对冬小麦水分利用与物质生产效果的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(11):1980-1989.
- [17] 秦欣, 刘克, 周丽丽, 等. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作节水体系周年水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(19):4014-4024.
- [18] Hu C, Delgado J A, Zhang X, et al. Assessment of groundwater use by wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Luancheng Xian Region and potential implications for water conservation in the Northwestern North China Plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 60(2): 80-88.
- [19] 刘明, 陶洪斌, 王璞, 等. 华北平原水氮优化条件下不同种植制度的水分效应研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 20(2):116-120.
- [20] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, et al. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1139-1145.
- [21] Liu K, Zhang Y H, Wang Z M, et al. Characteristics of water consumption in water-saving winter wheat and effects on the utilization of subsequent summer rainfall in the North China Plain [J]. *International Journal of Plant Production*, 2011, 5(2): 167-180.
- [22] 赵红梅. 新品种衡观 35 创河北节水小麦亩产新纪录, 只浇一水 [EB/OL]. [2014-06-14]. http://hebei.hebnews.cn/2014-06/14/content_3987563.htm.
- [23] 王晓. 辛集: 麦子根深两米半不浇一水产千斤 [EB/OL]. [2015-6-19]. http://www.he.xinhuanet.com/news/2015-06-19/c_1115666215.htm.
- [24] 陈国平, 高聚林, 赵明, 等. 近年我国玉米超高产田的分布、产量构成及关键技术[J]. *作物学报*, 2012, 38(1): 80-85.
- [25] 张淑芳, 柴守玺, 蔺艳春, 等. 冬小麦地膜覆盖的水分效应[J]. *甘肃农业大学学报*, 2011, 46(2):45-52.

(上接第 225 页)

- [14] Berger T W, Neubauer C, Glatzel G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 159(1/2):3-14.
- [15] 王岩, 杨振明, 沈其荣. 土壤不同粒级中 C、N、P、K 的分配及 N 的有效性研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1):85-94.
- [16] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及有机碳分布变化[J]. *土壤通报*, 2000, 31(5):193-195.
- [17] Bajacharya R M, Lal R, Kimble J M. Erosion phase effects on CO₂ concentration and CO₂ flux from an Alfisol [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2):694-700.
- [18] Gregorich E G, Beare M H, Stoklas U, et al. Biodegradability of soluble organic matter in maize-cropped soils [J]. *Geoderma*, 2003, 113(3/4):237-252.
- [19] 王阳, 章明奎. 不同类型林地土壤颗粒态有机碳和黑碳的分布特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2011, 37(2):193-202.
- [20] Gregorich E G, Ellert B H. Light fraction and macro-organic matter in mineral soils. Soil sampling and methods of analysis [M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, Canadian Society of Soil Science, 1993.
- [21] Rosell R A, Galantini J A, Suner L G. Long-term crop-rotation effect on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in Haplustoll soil fraction [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(4):309-315.