排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 12 月 Dec. 2014 | 第 32 卷 第 12 期 Vol. 32 No. 12
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0065

涝渍胁迫对冬小麦净光合速率变化的影响


肖梦华

肖梦华[1]，胡秀君[2]，房凯[3]，缪子梅[1]
（1.江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；2.浙江水利水电学院水利与环境工程学院，浙江 杭州 310018；3.宿迁市水务局，江苏 宿迁 223800）

摘要：在水位调控技术的基础上，采用田间试验研究了麦田水位调控下，冬小麦不同生育期、不同农田水层深度、地下水埋深下净光合速率变化规律.研究结果表明，淹水水位较浅且历时适中对冬小麦的净光合速率影响最小，相同水位、相同淹水历时条件下，水位回落速度越快净光合速率越大；不同控水条件下，冬小麦各生育期净光合速率日变化曲线呈“M”形.上午随光合有效辐射增强和温度的升高急剧增大，下午随有效辐射减弱和温度的降低大幅度下降，中午变化较缓，净光合速率峰值出现在11:00和13:00左右，12:00左右有明显的下降，即出现“午休”现象；此外，小麦净光合速率与光合有效辐射、太阳总辐射、大气温度、空气相对湿度和风速存在一定的相关性，其中净光合速率与太阳总辐射、光合有效辐射、空气温度有较强的相关性，与空气湿度和风速相关性较弱.

关键词：冬小麦；农田水位；涝渍胁迫；净光合速率；生育期；水层深度
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2014)12-1079-06

肖梦华，胡秀君，房凯，等.涝渍胁迫对冬小麦净光合速率变化的影响[J].排灌机械工程学报，2014，32(12)：1079-1084.
Xiao Menghua，Hu Xiujun，Fang Kai，et al. Effects of water-logging stress on net photosynthetic rate changes of winter wheat[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2014，32(12)：1079-1084.(in Chinese)

Effects of water-logging stress on net photosynthetic rate changes of winter wheat

Xiao Menghua[1]，*Hu Xiujun*[2]，*Fang Kai*[3]，*Miao Zimei*[1]
(1. National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China；2. Institute of Hydraulic & Environmental Engineering，Zhejiang University of Water Resources and Electric Power，Hangzhou，Zhejiang 310018，China；3. Water Conservancy Bureau of Suqian，Suqian，Jiangsu 223800，China)

Abstract：Based on the water level control technology，a field experiment was conducted to study the water level regulation and control on variation of net photosynthetic rate，at different growth stages，water depth and deep groundwater of winter wheat farmland. The experimental results showed that：flooding depth shallow and moderate duration on winter wheat had minimal impact on photosynthetic rate，with the same water level and water-logging duration，the faster water felled the larger net photosynthetic rate increased；under different water control conditions，variation curves of each growth stage of winter wheat in net photosynthetic rate was appeared "M" shape. With the increase of photosynthetic active radiation enhancement and temperature increases rapidly in the morning，with the effect of radiation attenuation and temperature decreased greatly decreased at afternoon，but the change was slow at

收稿日期：2014-05-08；**网络出版时间**：2014-12-26
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20141226.1117.011.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51409124)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20140564)；水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2013490711)
作者简介：肖梦华(1983—)，女，黑龙江佳木斯人，助理研究员，博士(menghuaxiao@aliyun.com)，主要从事灌排理论和节水灌溉研究.
胡秀君(1986—)，女，安徽黄山人，讲师(huxiujun@sina.com)，主要从事灌排理论和节水灌溉研究.

noon. The net photosynthesis rate peak value appeared in 11:00 and 13:00, decreased significantly in 12:00, namely "noon break" phenomenon; lastly, wheat net photosynthetic rate had a certain correlation with photosynthetic active radiation, solar radiation, air temperature, air relative humidity and wind speed. The net photosynthetic rate had strong correlation between total solar radiation and photosynthetic active radiation, but weak correlation between air temperature, air humidity and wind speed.

Key words: winter wheat; water level; water-logging stress; net photosynthetic rate; growth stages; water depth

我国南方地处亚热带或热带季风气候区,雨量丰沛,降雨次数多且强度大[1]. 在作物生长期经常发生因多次连续降雨造成地表或地下水持续高水位,如果排水系统不完善或管理运行不当,会使作物遭受涝渍胁迫,严重影响作物的优质、高产和稳产[2-5]. 一般情况下,农田受涝时必有渍害,而受渍不一定有涝灾,作物涝渍相随与只受渍对作物的影响是不一样的. 评价一个排水系统,除了考虑它能抵御何种频率的降雨外,还要考虑地表水排除后农田降渍的能力. 长江中下游麦区是我国的主产麦区之一,播种面积占全国小麦总面积的15%左右,而涝渍胁迫是该地区常见自然灾害,严重限制小麦的高产和稳产[6-8]. 涝渍胁迫导致小麦根层缺氧,抑制作物生长,受涝渍胁迫的小麦多表现为光合和叶绿素含量下降,光反应中心遭到破坏,植株干物质积累量降低,籽粒灌浆速率下降以及籽粒干物质积累量减少[9-10]. 目前国内外对水分逆境下小麦干物质的形成和生理机制方面研究颇多,且重点集中在干旱胁迫下,而对涝渍逆境的研究主要集中在小麦的需水临界期[11-12]. 有关不同生育阶段涝渍胁迫对小麦生理指标和产量的影响及其农田水位优化调控方面研究较少[13],因此系统研究不同生育阶段单个和多个涝渍过程连续作用下作物净光合效率变化,提出涝渍综合胁迫下作物的排水控制指标,对缓解麦田涝渍危害,实现农田水位的有效调控具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验于2009年11月—2010年6月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室的野外试验场进行,该试验场位于河海大学江宁校区内,北纬31°86′,东经118°60′,属于亚热带湿润气候,冬冷夏热、四季分明. 年均降雨量为1 021.3 mm,多年平均水面蒸发量为900 mm左右,绝对最高温度为43 ℃,年均气温为15.7 ℃,绝对最低温度为-14 ℃,最热月平均温度为28.1 ℃,最冷月平均温度为-2.1 ℃,最大平均湿度为81%,无霜期为237 d,年均日照量为2 212.8 h,日照时数百分率约为50%.

试验场共有32个固定式蒸渗仪(有底28个,无底4个),分2组布置,每组16个(每个蒸渗仪的规格为长×宽×深=2.5 m×2 m×2 m),中间设地下廊道及地下设备间,地上有长18.0 m、宽7.0 m、高3.0 m的2节大型电动活动雨棚. 经测定,蒸渗仪内0~30 cm土壤田间持水率为25.28%,土壤容重为1.46 g/cm^3,总孔隙度为44.97%,pH值为6.97,土壤有机质质量比为21.880 g/kg、全氮质量比为0.905 g/kg、速效氮质量比为0.028 g/kg、土壤全磷质量比为0.320 g/kg,土壤速效磷质量比为0.013 g/kg.

1.2 试验设计

供试小麦品种均为扬麦14,将冬小麦试验划分为6个生育阶段,分别为出苗越冬期、返青分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期. 由于冬小麦在出苗越冬期生长缓慢,植株较小,生理生长指标不易测量,黄熟期对水分反应不明显,上述2个生育期不作试验观测. 涝渍处理试验共设计33个处理,处理L1-L8在测桶内进行,每个处理2个重复;其余处理在测坑内进行,每个处理1个重复. 涝渍处理试验方案以水位调控为控制指标,处理见表1. 按试验方案在测坑廊道内调整水位,每隔0.5 h测1次,直至达到控制水位. 以处理L1为例,在分蘖期进行控水处理,控制农田水位50 mm(1 d),控水结束后,水位在3 d内逐渐降至-200 mm,每天下调水位分别为-100,-150,-200 mm;处理结束后水位调整到对照处理(CK),返青分蘖期处理结束后各处理水位调整到-600 mm,拔节孕穗期处理结束后各处理水位调整到-1 000 mm,抽穗开花期和乳熟期处理结束后各处理水位调整到-1 200 mm. 根据农田水位调控试验方案,各生育阶段控水时间见表2.

表 1　农田水位控制试验方案(2009—2010 年)
Tab. 1　Water control programs in year of 2009 and 2010　　mm

处理	分蘖返青期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
1	50(1 d)(3 d-200)	<-800	<-1 000	<-1 000
2	50(1 d)(3 d-400)	<-800	<-1 000	<-1 000
3	50(3 d)(3 d-200)	<-800	<-1 000	<-1 000
4	50(3 d)(3 d-400)	<-800	<-1 000	<-1 000
5	-100(5 d)(3 d-200)	<-800	<-1 000	<-1 000
6	-100(5 d)(3 d-400)	<-800	<-1 000	<-1 000
7	-100(7 d)(3 d-200)	<-800	<-1 000	<-1 000
8	-100(7 d)(3 d-400)	<-800	<-1 000	<-1 000
9	<-600	100(1 d)(3 d-400)	<-1 000	<-1 000
10	<-600	100(1 d)(3 d-800)	<-1 000	<-1 000
11	<-600	100(3 d)(3 d-400)	<-1 000	<-1 000
12	<-600	100(3 d)(3 d-800)	<-1 000	<-1 000
13	<-600	-200(3 d)(3 d-600)	<-1 000	<-1 000
14	<-600	-200(3 d)(3 d-800)	<-1 000	<-1 000
15	<-600	-200(5 d)(3 d-600)	<-1 000	<-1 000
16	<-600	-200(5 d)(3 d-800)	<-1 000	<-1 000
17	<-600	<-800	100(1 d)(3 d-400)	<-1 000
18	<-600	<-800	100(1 d)(3 d-800)	<-1 000
19	<-600	<-800	100(3 d)(3 d-400)	<-1 000
20	<-600	<-800	100(3 d)(3 d-800)	<-1 000
21	<-600	<-800	-200(3 d)(3 d-600)	<-1 000
22	<-600	<-800	-200(3 d)(3 d-800)	<-1 000
23	<-600	<-800	-200(5 d)(3 d-600)	<-1 000
24	<-600	<-800	-200(5 d)(3 d-800)	<-1 000
25	<-600	<-800	<-1 000	100(1 d)(3 d-400)
26	<-600	<-800	<-1 000	100(1 d)(3 d-800)
27	<-600	<-800	<-1 000	100(3 d)(3 d-400)
28	<-600	<-800	<-1 000	100(3 d)(3 d-800)
29	<-600	<-800	<-1 000	-200(3 d)(3 d-600)
30	<-600	<-800	<-1 000	-200(3 d)(3 d-800)
31	<-600	<-800	<-1 000	-200(5 d)(3 d-600)
32	<-600	<-800	<-1 000	-200(5 d)(3 d-800)
CK	<-600	<-800	<-1 000	<-1 000

注:各处理水深为田面相对值,正值表示为田间水深,负值为地下水位相对田面的距离.

表 2　冬小麦各生育期控水时间表(2010 年)
Tab. 2　Time of water control programs in year of 2010

年份	生育阶段	返青分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
2010	起时	3 月 5 日	4 月 3 日	4 月 21 日	5 月 12 日
	止时	3 月 14 日	4 月 10 日	4 月 28 日	5 月 19 日

1.3　观测指标及分析方法

用 LI-6400P 光合作用测定系统测定小麦叶片光合速率 *Pn*,选择典型阶段和典型时间通过控光进行测定,设定光强为 600 μmol/(m^2·s),在作物生长期间选择晴朗无云的天气对各处理的光合速率进行日变化测定. 利用安装在试验区的自动气象站(型号为 HL20)收集风速 *W*、风向 *WD*、空气温度值 *TP*、太阳总辐射值 *E*20、光和有效辐射值 *E*90、土壤温度值 *ST*、土壤水分相对含量值 *TDR* 以及雨量值 *RG* 等指标.

2　结果分析

2.1　涝渍条件下净光合速率动态变化

冬小麦各生育期控水不同处理净光合速率 *Pn* 变化见图 1. 分蘖期根据气象资料,3 月 11 日全天平均温度为 13.9 ℃、相对湿度为 92.72%、9:00 测定时光合有效辐射强度为 105.3 μmol/(m^2·s),3 月 14 日全天平均温度为 13.5 ℃、相对湿度为 70.1%、9:00 测定时光合有效辐射强度为 123.9 μmol/(m^2·s),3 月 28 日全天平均温度为 11.2 ℃、相对湿度为 76.85%、9:00 测定时光合有效辐射强度为 141.6 μmol/(m^2·s). 控水中(控水第 7 天),淹水历时较短的处理 1,2 基本恢复到与对照处理相当的水平,处理 3,4 虽然恢复正常水位,但是因淹水较深,淹水历时适中,所以并未恢复到正常水平,处理 5-8 因渍水历时较长,净光合速率依然较低. 控水末(控水第 10 天),各淹水处理出现补偿效应,相对于正常处理的净光合速率有所提升,淹水历时较短的处理 1-4 经过一段时间的恢复,都超过了正常处理,这表明恢复正常水位后,各控水处理净光合速率逐渐得到不同程度的恢复. 控水结束后,淹水深度较深、淹水历时较短、水位回落速度较快的处理 2 净光合速率值最大,比对照处理(CK)高 11%;淹水深度较深、

淹水历时适中、水位回落速度较快的处理4净光合速率值比对照处理(CK)高3%;渍水历时较长的处理7,8净光合速率均低于其他处理.说明小麦在分蘖期,较长时间的淹水或渍水抑制了小麦的净光合速率,淹水时间相对较短且水位回落速度较快的处理对小麦的净光合速率影响最小.拔节孕穗期根据气象资料,4月4日全天平均温度为16.4 ℃、相对湿度为58.1%、9:00测定时光合有效辐射强度为334.9 μmol/(m^2·s),4月10日全天平均温度为16.9 ℃、相对湿度为58.9%、9:00测定时光合有效辐射强度为571.9 μmol/(m^2·s),4月17日全天平均温度为15.68 ℃、相对湿度为82.73%、9:00测定时光合有效辐射强度为519.4 μmol/(m^2·s).控水中(控水第2天),受淹水影响,各淹水处理的净光合速率低于正常处理.控水末(控水第8天),各淹水处理恢复正常水位后出现补偿效应,相对于正常处理的净光合速率有所提升,淹水深度较深、淹水历时较长的处理11,12净光合速率较低,说明淹水对这2个处理的净光合速率影响较大,短期内不能恢复.控水结束后,各处理净光合速率相差不大,说明在拔节孕穗期控水不会对小麦净光合速率造成不可恢复伤害.渍水深度较浅、渍水历时较短的处理13,14净光合速率值较大,分别比对照处理(CK)高5%和2%;渍水历时较长、水位回落速度较慢的处理15净光合速率值比其他各处理低,比对照处理(CK)低6%.说明小麦在拔节孕穗期,水位较浅且历时较短的淹(渍)水对小麦的净光合速率影响最小,涝渍历时较长、水位回落速度较慢的淹水抑制了小麦的净光合速率.

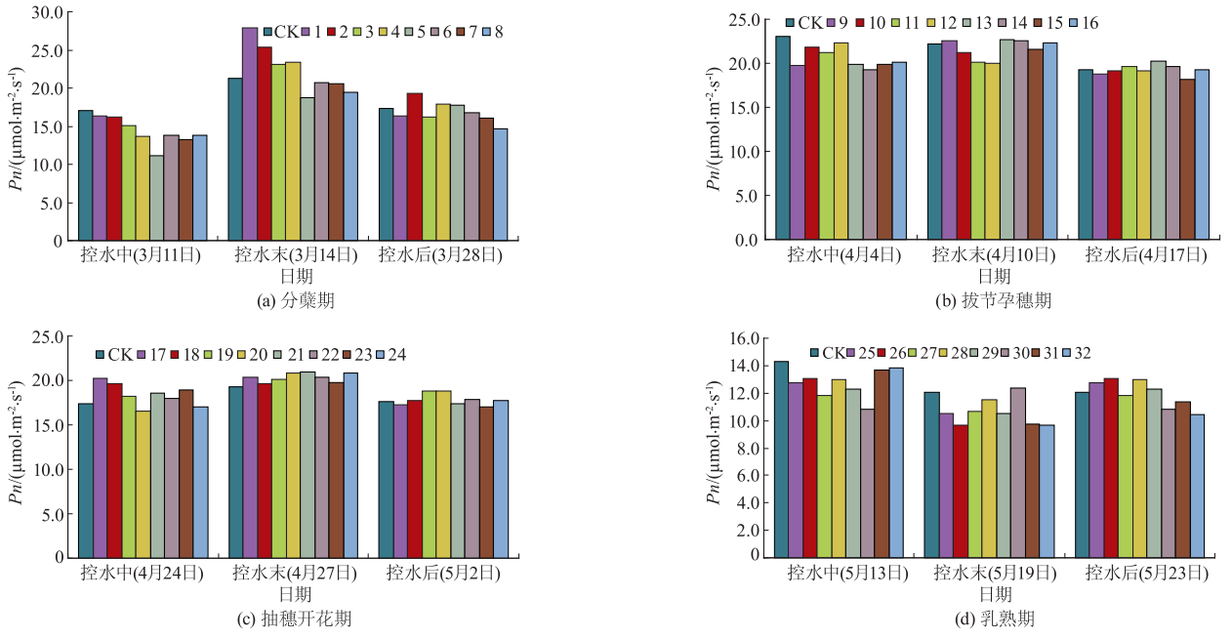


图1 冬小麦各生育期控水不同处理净光合速率变化

Fig. 1 Net photosynthetic rate changes in different growth stages of winter wheat under water level control

2.2 涝渍条件下净光合速率日变化规律

冬小麦各生育期控水不同处理净光合速率日变化见图2.分蘖期选取3月11日小麦净光合速率的日变化曲线,拔节孕穗期选取4月17日小麦净光合速率日变化曲线,乳熟期选取5月2日小麦净光合速率的日变化曲线.可以看出,小麦在分蘖期、拔节孕穗期和抽穗开花期,各控水处理的净光合速率日变化曲线均呈"M"型走势.上午,各控水处理的净光合速率随着温度和光合有效辐射强度的增高而急速上升,在11:00左右达到了第1个峰值,12:00左右由于温度过高和光合有效辐射过强,为了防止小麦叶片过分失水,小麦出现"午休"现象,气孔导度减小,净光合速率降到低谷,到13:00左右达到第2个峰值.经过峰值后,CK和各控水处理的净光合速率随着温度和光合有效辐射强度的降低而急速下降.CK和各控水处理的净光合速率都表现为9:00—13:00时段大小差异较明显,13:00—17:00时段差异较小,这说明小麦在9:00—13:00时段净光合速率受控水影响较大,在13:00—17:00时段受控水影响较小.12:00左右CK值高于各控水处理,说明小麦控水处理比正常处理"午休"现象明显.分蘖期淹水历时较短的处理2,3,4净光合速率在全天

均高于其他控水处理,说明小麦在分蘖期,较短时间的淹水对小麦的光合作用有一定促进作用. 拔节孕穗期、抽穗开花期对照处理(CK)和各控水处理的净光合速率在全天不同时刻高低不一,说明在该生育期控水小麦净光合速率影响较大. 拔节孕穗期处理 13,14 净光合速率在全天均高于其他控水处理,说明小麦在拔节孕穗期,淹水时间适中且淹水深度较浅,有效促进了小麦的光合作用. 抽穗开花期处理 18,19 净光合速率在全天表现高于其他控水处理,说明小麦在抽穗开花期淹水历时较短或适中对小麦的光合作用影响较小.

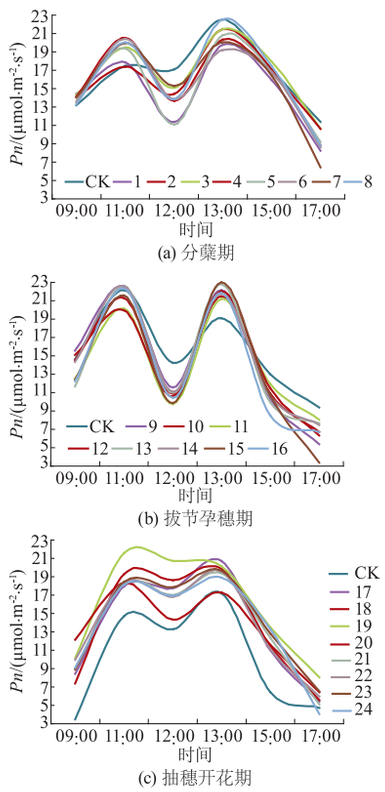


图 2　冬小麦各生育期控水不同处理净光合速率日变化

Fig. 2　Net photosynthetic rate daily variation in different growth stages of winter wheat under water level control

2.3　净光合速率与环境因子相关分析

影响小麦净光合速率的主要环境因素为太阳总辐射 E、光合有效辐射 $E90$、大气温度 T、空气相对湿度 RH 等. 对小麦净光合速率与各主要环境因子之间进行相关分析. 不同控水条件下小麦净光合速率 Pn 与环境因素的相关系数见表 3. 可以看出,对照处理(CK)、受涝处理、受渍处理 3 种水位条件下的净光合速率均与风速、气温、太阳总辐射、光合有效辐射正相关;与空气相对湿度负相关. 小麦净光合速率都与气温、太阳总辐射、光合有效辐射有较强的相关性,与空气湿度和风速的相关性较弱. 5 个不同的环境因素中,太阳总辐射和光合有效辐射对净光合速率的影响性最强,其次是大气温度,风速对小麦的净光合速率影响最小. 各处理中对照处理和受渍处理的净光合速率受环境因素影响较受涝处理显著,说明水位高的处理相对水位低的处理净光合速率受环境因素影响小.

表 3　不同控水条件下小麦净光合速率与环境因素的相关系数

Tab. 3　Correlation coefficient of wheat between net photosynthetic rate and environmental factors in different water level control conditions

处理	W/(m·s^{-1})	T/℃	RH/%	E/(W·m^{-2})	$E90$/(μmol·m^{-2}·s^{-1})
对照处理	0.543 250	0.851 787	−0.852 49	0.853 377	0.853 242 549
受涝处理	0.119 635	0.596 602	−0.565 71	0.782 485	0.767 688 361
受渍处理	0.178 313	0.785 657	−0.783 41	0.820 837	0.816 410 049

3　结　论

1) 分蘖期较长时间淹水抑制小麦的净光合速率,淹水时间相对较短且水位回落速度较快对小麦的净光合速率影响不大;拔节孕穗期各淹水处理的净光合速率均低于正常水位,控水后各处理的净光合速率逐渐回升,淹水历时较长且水位回落速度较慢会抑制小麦的净光合速率;抽穗开花期控水对小麦的净光合速率影响不大,相同水位、相同淹水历时条件下,水位回落速度越快净光合速率越大;乳熟期淹水处理净光合速率略低于对照处理,控水结束后,淹水历时较长的处理不能恢复到正常水平,淹水历时较短对小麦的净光合速率影响最小.

2) 不同控水条件下,小麦各生育期净光合速率日变化曲线呈“M”形. 上午随光合有效辐射增强和温度的升高而急剧增大,下午随有效辐射减弱和温度的降低而大幅度下降,中午变化较缓. 净光合速率峰值出现在 11:00 和 13:00 左右,12:00 左右有明显的下降,出现“午休”现象,抽穗开花期“午休”现象不明显.

3) 不同控水条件下,小麦净光合速率均与光合有效辐射 $E90$、太阳总辐射 E、大气温度 T、空气相对湿度 RH 和风速 W 存在一定的相关性,其中:对照处理(CK)、受涝处理、受渍处理 3 种水位条件下净光合速率均与 W,T,E,$E90$ 正相关,与 RH 负相关. 对照处理和受渍处理净光合速率受环境因素影响较大,受涝处理受其影响相对较小.

参考文献(References)

[1] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58 a演变特征[J]. 农业工程学报, 2010,26(7): 50-59.
Huang Wanhua, Yang Xiaoguang, Li Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(7): 50-59. (in Chinese)

[2] 景卫华,罗纨,温季, 等. 农田控制排水与补充灌溉对作物产量和排水量影响的模拟分析[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1140-1146.
Jing Weihua, Luo Wan, Wen Ji, et al. Analysis on the effect of controlled drainage and supplemental irrigation on crop yield and drainage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1140-1146. (in Chinese)

[3] 王矿,潘强,汤广民, 等. 灌浆期小麦排水指标的试验研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(8): 59-62.
Wang Kuang, Pan Qiang, Tang Guangmin, et al. Experimental study on drainage index during wheat filling period[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(8): 59-62. (in Chinese)

[4] 张瑜芳,毛志荣. 以小麦生长受抑制的天数为指标的排水标准试验研究[J]. 灌溉排水, 1997, 16(3): 1-6.
Zhang Yufang, Mao Zhirong. A study of the drainage criteria of relationship between the relative yield of winter wheat and stress day index[J]. Irrigation and Drainage, 1997, 16(3): 1-6. (in Chinese)

[5] Asseng S, Dunin F X, Fillery I R P, et al. Potential deep drainage under wheat crops in a Mediterranean climate. II: Management opportunities to control drainage [J]. Crop and Pasture Science, 2000, 52(1): 57-66.

[6] 盛绍学,霍治国,石磊. 江淮地区小麦涝渍灾害风险评估与区划[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 985-990.
Sheng Shaoxue, Huo Zhiguo, Shi Lei. Risk assessment and regionalization of waterlogging disaster for wheat in Jianghuai Region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(5): 985-990. (in Chinese)

[7] 杜文勇, 何雄奎,胡振方. 不同灌溉技术条件对冬小麦生产的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 170-174.
Du Wenyong, He Xiongkui, Hu Zhenfang. Effect of different irrigation technology on production of winter wheat [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 170-174. (in Chinese)

[8] 王少丽,许迪,陈皓锐,等. 农田除涝排水技术研究综述[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(4): 343-349.
Wang Shaoli, Xu Di, Chen Haorui, et al. Review on research of farmland drainage technology[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(4): 343-349. (in Chinese)

[9] 王三根,何立人,李正玮,等. 淹水对大麦与小麦若干生理生化特性影响的比较研究[J]. 作物学报, 1996, 22(2): 228-232.
Wang Sangen, He Liren, Li Zhengwei, et al. A comparative study on the resistance of barley and wheat to waterlogging[J]. Acta Agronomica Sinica, 1996, 22(2): 228-232. (in Chinese)

[10] 邵光成,俞双恩,刘娜,等. 以涝渍连续抑制天数为冬小麦排水指标的试验[J]. 农业工程学报, 2010,26(8): 56-60.
Shao Guangcheng, Yu Shuangen, Liu Na, et al. Study on continuous days of water logging and excessive soil water as drainage index of wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(8): 56-60. (in Chinese)

[11] 王晨阳,付雪丽,郭天财,等. 花后干旱胁迫对两种筋力型小麦品种旗叶光合特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(6): 115-119.
Wang Chenyang, Fu Xueli, Guo Tiancai, et al. Effects of post-anthesis drought stress on photosynthetic characters in flag leaves of two wheat cultivars with different gluten strength[J]. Journal of Triticeae Crops, 2006, 26(6): 115-119. (in Chinese)

[12] 邵光成,俞双恩,刘娜,等. 通径分析在冬小麦受渍胁迫诊断指标敏感性分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(4): 527-534.
Shao Guangcheng, Yu Shuangen, Liu Na, et al. Application of path analysis in sensitivity analysis on stress indicator from subsurface water logging of winter wheat[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(4): 527-534. (in Chinese)

[13] 缪子梅,俞双恩,卢斌,等. 基于结构方程模型的控水稻“需水量-光合量-产量”关系研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 91-98.
Miao Zimei, Yu Shuangen, Lu Bin, et al. Relationships of "water requirement - photosynthesis - production" for paddy rice using structural equation modeling[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(6): 91-98. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)