

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

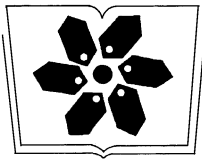
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒径浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110121503

王唯逍, 刘小军, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响. 生态学报, 2012, 32(22): 7053-7060.

Wang W X, Liu X J, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhu Y. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7053-7060.

不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响

王唯逍, 刘小军, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 朱艳*

(南京农业大学/国家信息农业工程技术中心、江苏省信息农业高新技术研究重点实验室, 南京 210095)

摘要: 为探明土壤水分对水稻生长发育的影响机理, 以武香粳 14 和两优培九为试验材料, 分析了不同土壤水分处理下 (W1、W2、W3 和 CK 分别表示土壤体积含水量为 20%、30%、40% 和 5cm 水层灌溉) 的水稻光合特性、产量及水分生产率等。结果表明, 轻度水分胁迫 (W3) 具有处理间最大的叶片气孔导度、蒸腾速率和净光合速率, 其他处理规律不显著。灌浆初期各水分处理下叶位间光合指标均表现为: 剑叶 > 顶 2 叶 > 顶 3 叶 > 顶 4 叶, 其他生育期规律不显著。与对照处理 (CK) 相比, 武香粳 14 的 W1、W2 和 W3 处理的产量分别减少 61.14% 和 29.13%、增加 0.96%, 水分生产率分别减少 10.69%、增加 1.53% 和 20.61%; 两优培九的产量分别减少 64.11% 和 28.76%、增加 2.08%, 水分生产率分别减少 16.39%、增加 2.46% 和 22.13%。研究结果为水稻精确灌溉和节水生产提供了技术支撑。

关键词: 水稻; 土壤水分; 光合特性; 产量; 水分生产率

Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice

WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, YAO Xia, CAO Weixing, ZHU Yan*

National Engineering and Technology Center for Information Agriculture, Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing Agricultural University, Jiangsu 210095, China

Abstract: In order to ascertain the resistance mechanism of soil water stress on the growth of rice, explore the potential of rice production fully and improve the water productivity, it is quite necessary to carry out the research about the effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice. Thus a series of water gradient experiments were carried out on the basis of two different rice cultivars, involving Wuxiangjing14 (*Japonica Rice*) and Liangyoupeijiu (*Hybrid Rice*). Four particular configured water supply levels, including continuous flooding irrigation (CK), 20% soil water content (W1), 30% soil water content (W2) and 40% soil water content (W3), were designed to analysis and investigate the photosynthetic characteristics, grain yield and its components, water productivity in rice. The research results showed that the two experimental cultivars had similar distributions of leaf stomatic conductance in the flag leaves under the four soil water treatments during the different rice critical growth stages, which were W3 > CK > W2 > W1. In addition, the photosynthetic rates in the upper four leaves were the highest under low-grade soil dry stress treatment for it delayed aging of leaf, the distributions of photosynthetic rate under the four treatments were all represented as W3 > CK/W2 > W1, but the variations of transpiration rate were not significant. Besides, at the early filling stage, the distributions of leaf stomatic conductance, transpiration rate and photosynthetic rate at different leaf positions under four treatments were all represented as flag leaf > upper second leaf > upper third leaf > upper fourth leaf. Moreover, the observations found that

基金项目: 国家 863 计划项目 (2012AA101906, 2011AA100703); 国家自然科学基金 (31201130); 江苏省自然科学基金 (BK2012361)

收稿日期: 2011-10-12; **修订日期:** 2012-07-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanzhu@njau.edu.cn

the transpiration rates of flag leaf were significantly higher than the others. Furthermore, the difference values between upper leaf and lower leaf in the cultivar of Liangyoupeijiu were greater than the difference values of Wuxiangjing14. Further comparing with the continuous flooding irrigation (CK), the grain yields of Wuxiangjing14 under the treatments of W1, W2 and W3 were decreased by 61.14%, 29.13%, and increased by 0.96%, while for the experimental cultivar of Liangyoupeijiu, the grain yields were decreased by 64.11%, 28.76%, and increased by 2.08%, respectively. Continuous flooding irrigation increased the dry matter, spike number and spikelet number per panicle, but low-grade soil dry stress treatment increased the seed setting rate and 1000-grain weight. In the other hand, the water productivities of Wuxiangjing14 and Liangyoupeijiu were also observed and measured under the different soil water treatments. The experimental results indicated that the water productivities of both two cultivars had overall trends of $W3 > CK / W2 > W1$, where the highest values were appeared in the treatment of W3 with the values were 1.58 kg/m^3 and 1.49 kg/m^3 , respectively. Further comparing with the continuous flooding irrigation (CK), the water productivities of Wuxiangjing14 under the treatments of W1, W2 and W3 were decreased by 10.69%, and increased by 1.53%, 20.61%, respectively; while the water productivities of Liangyoupeijiu under the treatments of W1, W2 and W3 were decreased by 16.39%, and increased by 2.46%, 22.13%, respectively. This research work would provide a technical support for precise irrigation management and water-saving production in rice.

Key Words: rice; soil water; photosynthetic characteristic; yield; water productivity

土壤水分是水稻生长的主要供水源,开展土壤水分胁迫对水稻光合特性和产量的影响研究,有助于深入了解水稻对水分逆境的抗性机理,充分挖掘水稻生产潜能,提高水分生产效率。近年来关于调控灌溉、节水栽培等的研究表明,适度干旱胁迫有助构建适宜株型结构^[1-2],提高叶片活力和净光合速率^[3-6],为优质高产和高水分生产效率奠定基础^[7-11]。而较重的干旱胁迫和淹水灌溉均会降低叶片光合能力。不同生育期水稻受水分胁迫的影响机理和减产程度也不同,若短期受旱,产量不会显著下降,而在孕穗灌浆等关键生育期受旱将直接导致颖花退化,穗粒数、千粒重和产量降低^[12-18];但也有研究认为间隙灌溉等方式反而有利于夺取最后的优质高产^[19-20]。由于试验方法和水分处理等方面存在差异,已有相关研究结论尚不完全一致^[19-22],尤其缺少在严格可控的池栽环境及长期土壤水分胁迫条件下的研究结果。因此本研究以不同品种类型和土壤水分处理下不同年份的水稻池栽试验为基础,探讨长期土壤水分胁迫对水稻光合特性、产量形成及水分生产效率等的影响,以期为水稻精确灌溉和节水生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验点基本概况

试验于2009—2010年在南京农业大学牌楼试验站进行($32^{\circ}1'23.31''\text{N}$, $118^{\circ}51'7.91''\text{E}$)。试验点水稻生长季内的两年平均气温为 26.1°C ,最高日平均气温 30.1°C ,最低日平均气温 16.8°C ,平均累计降雨量 742.2 mm ,平均累计日照时数 647.8 h 。

1.2 试验设计

供试水稻品种为武香粳14(V1)和两优培九(V2),共设W1(重度水分胁迫)、W2(中度水分胁迫)、W3(轻度水分胁迫)和CK4个水分处理(土壤体积含水量分别为20%、30%、40%和5cm水层灌溉),试验采用随机区组设计,3次重复,小区面积为 10 m^2 。栽培土为黄棕壤性土,前茬为小麦,土壤有机质含量为 29.0 g/kg ,全氮为 1.69 g/kg ,速效磷为 12.89 mg/kg ,速效钾为 167.62 mg/kg 。施氮量为 225 kg/hm^2 (基肥:蘖肥:促花肥:保花肥为5:1:2:2)。磷肥和钾肥(P_2O_5 135 kg/hm^2 , K_2O 203 kg/hm^2)作基肥一次性施入。株行距为 $15 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,武香粳14采用双本移栽,两优培九为单本移栽。水稻种植于水泥池内,池上设有活动防雨棚,下雨天盖上防雨棚,病虫害防治及杂草清理等管理措施同当地水稻高产田。

各水分处理开始于有效分蘖临界叶龄期,持续到成熟期结束,分蘖期不进行搁田处理。于每天16:00用

德国 IMKO 公司生产的 TRIME-PICO 型便携式土壤水分速测计测定各小区土壤含水量,每小区随机测定 5 个样点,以其平均值代表小区土壤含水量,若低于处理设定的土壤含水量时则及时补水,并精确记录日灌溉量,各小区土壤含水量的变化幅度控制在 $\pm 10\%$ 以内。

1.3 研究方法

(1)气象资料获取 由设立在池区西侧 20 m 处的 ECOA-H1J1 型自动气象站观测记录,记录时间间隔为 5 min,记录指标包括大气温度和降雨量等。

(2)耗水量计算 准确测量并计算出每个池区内移栽前的土壤含水量(Q_1)和收获时的土壤含水量(Q_2),并由气象资料换算出每个小区从移栽到水分处理前的总降雨量(R_1)和从水分处理开始到收获时的总降雨量(R_2),由日灌溉量求得总灌溉量(I_n):

$$\text{耗水量}(W) = Q_1 + R_1 + I_n + R_2 - Q_2$$

(3)叶片光合特性和考种 于拔节、抽穗和灌浆期选择在晴天的 09:00—11:30 之间,对不同处理下主茎不同叶位叶片光合特性进行测定(包括气孔导度、蒸腾速率、净光合速率等),考种取样于成熟期进行,方法见参考文献^[19]。

因 2010 年的试验为 2009 年的重复,且试验数据在两年间的差异不显著,因此本文采用两年试验数据的平均值进行不同品种、不同生育期、不同土壤水分处理间的结果分析。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水分处理对水稻叶片气孔导度的影响

在土壤水分胁迫下,叶片气孔的保卫细胞会因失水而致使气孔缩小,进而影响到水稻叶片的气孔导度。对两年试验数据平均值进行分析可知(表 1),两个品种顶 1 叶气孔导度在拔节、抽穗和灌浆期均有类似的分布规律,即:W3>CK>W2>W1。各生育期间除两优培九 W2 处理的气孔导度表现为:抽穗期>拔节期>灌浆期,其余各处理均为:抽穗期>灌浆期>拔节期。

表 1 不同土壤水分处理对水稻顶 1 叶片气孔导度、蒸腾速率和光合速率的影响

Table 1 Effects of different soil water treatments on stomatic conductance, transpiration and Photosynthetic rates of the first leaf on main stem in rice

品种 Variety	处理 Treatment	气孔导度 Stomatic conductance/($\text{molH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			蒸腾速率 Transpiration rate/($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)			光合速率 Photosynthetic rate/($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
武香梗 14	W1	0.28 $\pm$ 0.02c	0.33 $\pm$ 0.01d	0.34 $\pm$ 0.01c	4.43 $\pm$ 0.13c	5.11 $\pm$ 0.23d	4.92 $\pm$ 0.14c	17.81 $\pm$ 0.42b	22.83 $\pm$ 0.73c	17.79 $\pm$ 0.37d
Wuxiangjing14	W2	0.31 $\pm$ 0.01c	0.61 $\pm$ 0.02c	0.51 $\pm$ 0.02b	5.77 $\pm$ 0.09b	7.77 $\pm$ 0.24c	6.80 $\pm$ 0.10b	19.75 $\pm$ 0.31ab	25.75 $\pm$ 0.92b	20.16 $\pm$ 0.28c
	W3	0.42 $\pm$ 0.01a	0.77 $\pm$ 0.02a	0.66 $\pm$ 0.02a	6.41 $\pm$ 0.17a	8.27 $\pm$ 0.19b	7.37 $\pm$ 0.12a	21.32 $\pm$ 0.56a	28.81 $\pm$ 0.65a	23.66 $\pm$ 0.49a
	CK	0.36 $\pm$ 0.01b	0.71 $\pm$ 0.02b	0.54 $\pm$ 0.01b	6.63 $\pm$ 0.12a	9.01 $\pm$ 0.32a	7.25 $\pm$ 0.13a	19.17 $\pm$ 0.33ab	27.13 $\pm$ 1.01ab	22.61 $\pm$ 0.41b
	W1	0.34 $\pm$ 0.01d	0.44 $\pm$ 0.02c	0.38 $\pm$ 0.02c	7.44 $\pm$ 0.06d	7.18 $\pm$ 0.50c	6.42 $\pm$ 0.22c	19.75 $\pm$ 0.14b	21.58 $\pm$ 0.72c	17.21 $\pm$ 0.58d
两优培九	W2	0.47 $\pm$ 0.02c	0.81 $\pm$ 0.05b	0.44 $\pm$ 0.03b	8.64 $\pm$ 0.22c	8.43 $\pm$ 0.35b	8.10 $\pm$ 0.18b	21.60 $\pm$ 0.62a	24.14 $\pm$ 1.39bc	19.89 $\pm$ 0.37c
Liangyoupeiuiu	W3	0.64 $\pm$ 0.01a	0.93 $\pm$ 0.05a	0.75 $\pm$ 0.04a	11.10 $\pm$ 0.18a	11.74 $\pm$ 0.49a	9.69 $\pm$ 0.50a	22.19 $\pm$ 0.45a	27.95 $\pm$ 1.41a	23.13 $\pm$ 1.26a
	CK	0.55 $\pm$ 0.01b	0.91 $\pm$ 0.04a	0.69 $\pm$ 0.04a	10.03 $\pm$ 0.14b	10.90 $\pm$ 0.64a	9.89 $\pm$ 0.37a	21.89 $\pm$ 0.29a	26.70 $\pm$ 0.96ab	21.04 $\pm$ 1.07b

S1、S2 和 S3 分别代表拔节、抽穗和灌浆初期。同一栏内 a、b、c 不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

受外部环境及植株本身因素的影响,同一植株不同叶位叶片含水率各不相同,其叶片光合特性也会表现出一定的差异。通过进一步分析灌浆初期水稻叶片气孔导度后发现,上部叶片的气孔导度,在不同叶位间的分布规律表现为:剑叶>顶 2 叶>顶 3 叶>顶 4 叶,且剑叶的气孔导度值明显高于下部 3 叶,顶 2 叶与顶 3 叶较为接近,顶 4 叶最小(图 1)。总体来看,两优培九上、下叶位叶片之间的气孔导度差异高于武香梗 14。

2.2 不同土壤水分处理对水稻叶片蒸腾速率的影响

对两年试验数据平均值进行分析可知,不同水分处理条件下(表 1),武香梗 14 在拔节和抽穗期的叶片蒸腾速率均表现为:CK>W3>W2>W1,其中以抽穗期的蒸腾速率最大,达到 9.01 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;而在灌浆期,不同处理

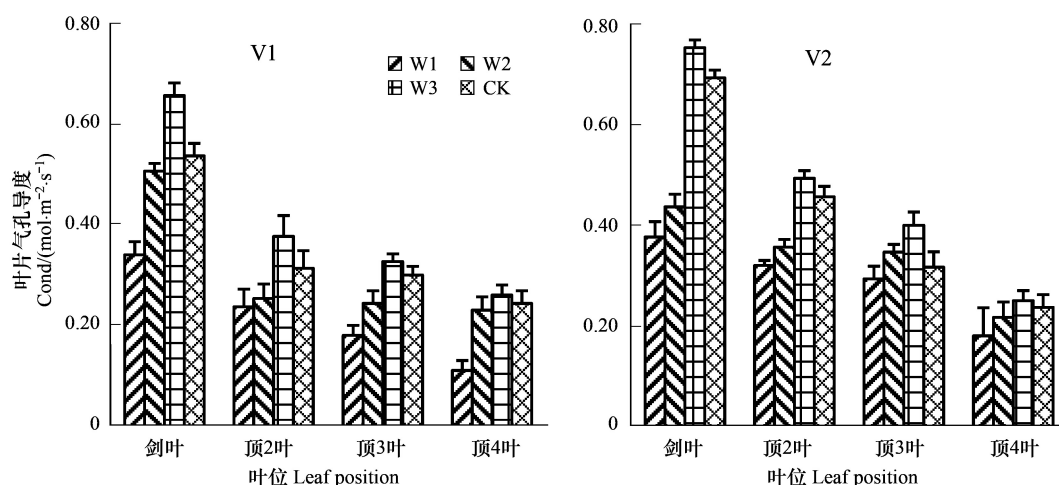


图1 不同土壤水分处理对水稻灌浆初期叶片气孔导度的影响

Fig. 1 Effect of different soil water treatments on leaf stomatic conductance in initial filling stage of rice

间的表现为 $W3 > CK > W2 > W1$ 。两优培九的最大蒸腾速率值也出现在抽穗期, 达到 $11.74 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 拔节和抽穗期不同处理间表现为 $W3 > CK > W2 > W1$, 而在灌浆期其 CK 处理的蒸腾速率则高于其他处理。

在灌浆初期, 水稻上部叶位叶片的蒸腾速率表现为剑叶 > 顶2叶 > 顶3叶 > 顶4叶 (图2), 且剑叶蒸腾速率明显高于其他叶位叶片。总体来看, 两优培九上下叶位叶片蒸腾速率的差异相对武香粳 14 更大。

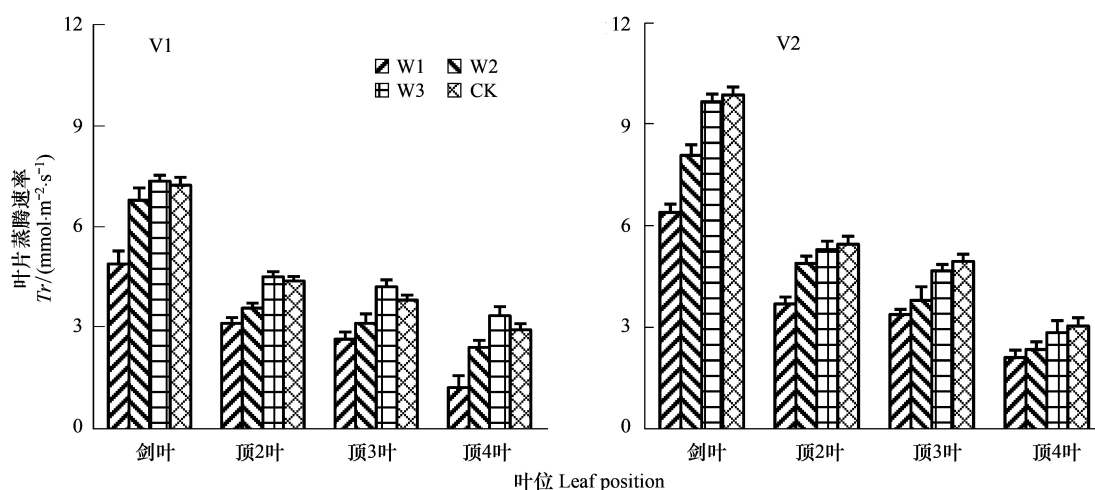


图2 不同土壤水分处理对水稻灌浆初期叶片蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effect of different soil water treatments on leaf transpiration in initial filling stage of rice

2.3 不同土壤水分处理对水稻叶片净光合速率的影响

适宜的土壤干旱处理可为水稻创造较好的生长环境, 从而获得较高的光合速率。对两年试验数据平均值进行分析可知 (表1), 不同水分处理条件下, 两品种除拔节期武香粳 14 的净光合速率表现为 $W3 > W2 > CK > W1$, 其余生育期各处理间均表现为: $W3 > CK > W2 > W1$, 其中以抽穗期 W3 处理的净光合速率值最大, 武香粳 14 和两优培九分别达到 $28.81 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $27.95 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这可能是因为适度水分胁迫更有利于水稻植株根系的生长和叶片叶绿素的形成, 进而构建了更适宜的群体结构体系, 从而促进了叶片的光合作用。

不同叶位叶片因在空间分布及光热资源上的差异, 其叶片净光合速率也会表现出一定的差异性 (图3)。灌浆初期水稻叶片净光合速率在不同叶位间的分布规律表现为剑叶 > 顶2叶 > 顶3叶 > 顶4叶, 且剑叶和顶2

叶的光合速率明显高于下部叶片,两优培九上、下叶位叶片净光合速率的差异相对武香粳 14 更大。

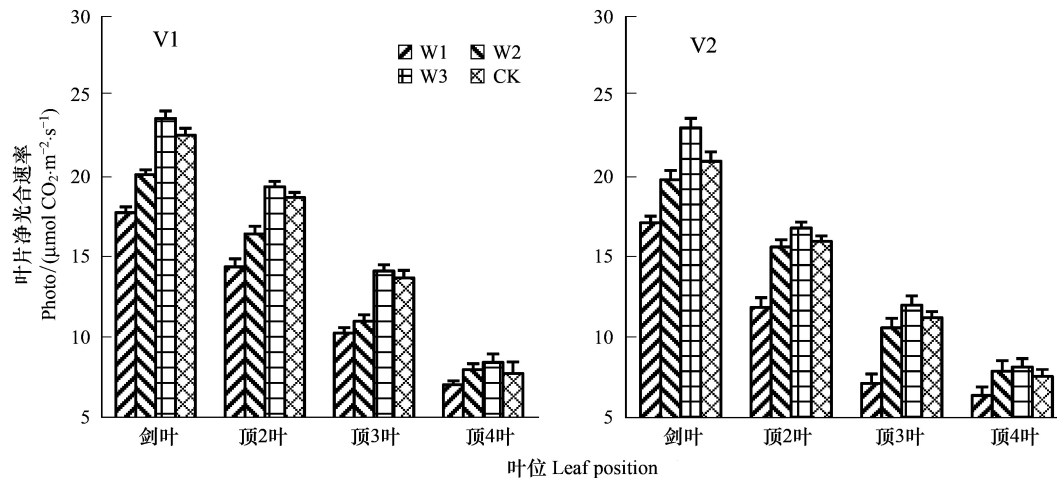


图3 不同土壤水分处理对水稻灌浆初期叶片净光合速率的影响
Fig. 3 Effect of different soil water treatments on leaf photosynthetic rate in initial filling stage of rice

2.4 不同土壤水分处理对水稻产量的影响

对两年试验数据平均值进行分析可知(表2),两个品种各处理间的有效穗数和穗粒数差异显著,结实率以轻度和中度干旱胁迫处理较高,千粒重则以轻度干旱胁迫和水层灌溉处理较高,因此各水分处理间产量最终表现为 W3>CK>W2>W1。与水层灌溉(CK)相比,武香粳 14 的 W3 处理增产 0.96%,W2、W1 分别减产 29.13%、61.14%;两优培九 W3 处理增产 2.08%,略高于对照,但差异不显著,W2、W1 分别减产 28.76%、64.11%。对照处理虽具有较高的干物重、有效穗数和穗粒数,但后期生长活力的下降以及光合能力的衰减,导致颖花退化,秕粒增加,从而使结实率降低,千粒重下降;而在轻度干旱胁迫下植株产生应激效应,反而构建了较好的群体结构,形成了较好的“源”、“库”、“流”的协调结构,进而获得了较高的产量。

表2 不同土壤水分处理对水稻产量和水分生产率的影响
Table 2 Effect of different soil water treatments on grain yield, its components and water productivity of rice

品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数 Spike number /(×10 ⁴ /hm ²)	颖花数 Spikelet number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Grain yield /(kg/hm ²)	耗水量 Water consumption /(m ³ /hm ²)	水分生产率 Water productivity /(kg/m ³)
武香粳 14 Wuxiangjing14	W1	142.53c	118.13b	85.24b	23.74b	3315c	2832.63d	1.17c
	W2	188.50b	155.70ab	87.15ab	24.52ab	6045b	4531.31c	1.33b
	W3	223.37a	167.50a	89.64a	25.92a	8613a	5445.08b	1.58a
	CK	229.02a	175.81a	85.33b	25.81a	8531a	6516.52a	1.31b
两优培九 Liangyoupeijiu	W1	140.08c	161.57b	73.43b	22.25b	3347c	3294.82d	1.02c
	W2	176.80b	185.90ab	85.07ab	23.03ab	6644b	5305.77c	1.25b
	W3	221.14a	203.93a	89.65a	24.10a	9520a	6375.96b	1.49a
	CK	217.33a	209.34a	86.49ab	24.44a	9325a	7660.97a	1.22b

2.5 不同土壤水分处理对水稻水分生产率的影响

对两年试验数据平均值进行分析可知,不同土壤水分处理下,水稻在全生育期内的耗水量差异显著(表2)。与对照处理(CK)相比,武香粳 14 在 W3、W2 和 W1 处理下的耗水量仅相当于 CK 的 83.6%、69.5% 和 43.5%;两优培九则为 83.2%、69.3% 和 43%。不同土壤水分处理下武香粳 14 和两优培九的水分生产率均表现为 W3>CK/ W2>W1,以轻度干旱胁迫处理最高,分别达到 1.58kg/m³ 和 1.49 kg/m³。

根据不同土壤水分处理下水稻全生育期的实际耗水量(x)与水分生产率(y)的对应关系(图4),可以建

立两者间的拟合方程如下:

$$\text{武香梗 14} \quad y = -7 \times 10^{-8}x^2 + 0.0008x - 0.4615 \quad R^2 = 0.8409$$

$$\text{两优培九} \quad y = -5 \times 10^{-8}x^2 + 0.0007x - 0.5662 \quad R^2 = 0.7160$$

当理论耗水量 $x = 5326.4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,武香梗 14 的水分生产率达到最大值 $1.54 \text{ kg}/\text{m}^3$;当理论耗水量 $x = 6281.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时,两优培九的水分生产率达到最大值 $1.46 \text{ kg}/\text{m}^3$,这与 W3 处理的结果基本类似。

3 讨论

水分胁迫会影响叶片的生理生化机能,胡继超等^[5, 16, 18]研究表明,土壤水分胁迫下植物的气孔导度会缩小甚至关闭,从而导致叶片光合速率的下降。本研究通过分析光合特性对土壤水分的响应规律后发现,轻度干旱胁迫处理具有最大的气孔导度、蒸腾速率和单叶净光合速率,且上部叶片的光合指标均显著高于下部叶片,这是由于下部叶位叶片受到光、温、风等环境因素的影响较大,且下部叶位较上部叶位叶片衰老得快所致,同时长期土壤水分胁迫条件会显著影响下部叶片的活力。两品种间相比,同生育期内相同土壤水分处理下,两优培九的气孔导度、蒸腾速率和单叶净光合速率均高于武香梗 14,且其 3 项光合指标在上、下位叶片之间的差异均较武香梗 14 更显著,这可能是因为相比武香梗 14,两优培九的冠层结构更复杂,其下位叶片受到来自上位叶片的影响更大,也可能是因为两优培九的抗旱能力弱于武香梗 14,其下位叶片受长期水分胁迫影响较武香梗 14 更显著所致。

杨建昌等^[14, 22]认为土壤干旱胁迫对水稻各生育期均有不同程度的影响,若关键生育期遭受水分亏缺将直接导致颖花退化、抽穗率降低、穗粒数减少、空秕粒增多、千粒重下降,并最终导致减产。本研究则发现,轻度干旱胁迫除有效穗数低于对照外,结实率和产量均高于其他处理,表明该处理具有较强的光合能力,供给籽粒灌浆期间的光合产物充足;而水层灌溉和较重的干旱胁迫均降低了叶片光合能力,致使空秕粒增多、结实率降低,并最终影响了产量的形成。相同土壤水分处理下两品种间对比,武香梗 14 的有效穗数和千粒重均优于两优培九,这可能是因为抽穗后两优培九对土壤水分亏缺更为敏感所致。另外,由于试验所用土壤为生土,前期分蘖力不高,致使单位有效穗数比正常偏低,并受试验基地局部小气候等环境的影响,穗粒数稍高于大田生长环境。

土壤水分胁迫显著降低了各处理的耗水量,水分生产率均以轻度干旱胁迫处理最高,重度干旱胁迫最低。可见,适度的土壤干旱显著提高了灌溉水利用效率。虽然重度干旱胁迫的水稻耗水量较低,但是水分的节省幅度低于产量下降的幅度,故导致水分生产率极低,这也与前人的研究结果相似^[19-20]。相同土壤水分处理下,两优培九的产量和耗水量均高于武香梗 14,但水分生产率却低于武香梗 14。这可能是因为两优培九在叶面积、株高等株型方面的特性限制了叶片水分利用效率,进而影响了水分生产率。

适度的土壤水分亏缺有利于促进水稻的光合作用,激发水稻的生长和生产潜能,进而提高其产量和灌溉水生产效率,但不同土壤和气候条件下的研究结果尚不一致。如同一水稻品种在沿海地区和内陆地区的产量表现不一^[18-19],水分生产率也表现出较大的差异^[19, 23]。因此,要真正实现精确灌溉,制定科学合理的灌溉管理措施,还需更进一步探寻其内在的生理机制,并开展多生态点的大田试验,研究不同品种对不同环境的应激机制。

4 结论

轻度土壤水分胁迫下,水稻具有处理间最高的叶片气孔导度、蒸腾速率、光合速率、产量及水分生产率。

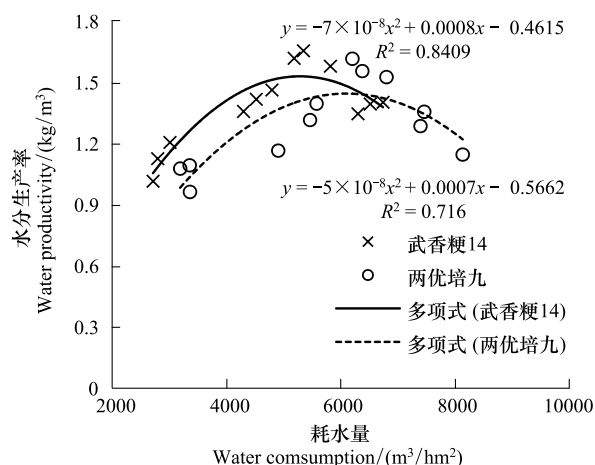


图4 水稻水分生产率和耗水量的关系

Fig. 4 Relationships between water productivity and water consumption in rice

与对照处理(CK)相比,武香粳 14 在 W3 处理下增产 0.96%,W2、W1 分别减产 29.13% 和 61.14%,两优培九 W3 处理增产 2.08%,W2、W1 处理分别减产 28.76%、64.11%。武香粳 14 和两优培九的水分生产率均以轻度干旱胁迫处理(W3)最高,分别达到 $1.58\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $1.49\text{kg}/\text{m}^3$ 。

References:

- [1] Boonjung H, Fukai S. Effects of soil water deficit at different growth stages on rice growth and yield under upland conditions. 1. Growth during drought. *Field Crops Research*, 1996, 48(1): 37-45.
- [2] Kato Y, Kamoshita A, Yamagishi J, Imoto H, Abe J. Growth of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars under upland conditions with different levels of water supply. *Plant Production Science*, 2007, 10(1): 3-13.
- [3] Peng S Z, Xu J Z, Huang Q, Wu H X. Experimental study on leaf water use efficiency of paddy rice under controlled irrigation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 47-52.
- [4] Wang Z Q, Yang J C, Zhu Q S. Effect of soil moisture on photosynthetic rate and matter translocation in rice plants. *Chinese Journal of Rice Science*, 1996, 10(4): 235-240.
- [5] Hu J C, Jiang D, Cao W X, Luo W H. Effect of short-term drought on leaf water potential, photosynthesis and dry matter partitioning in paddy rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 63-67.
- [6] Kumar R, Sarawgi A K, Ramos C, Amarante S T, Ismail A M, Wade L J. Partitioning of dry matter during drought stress in rainfed lowland rice. *Field Crops Research*, 2006, 98(1): 1-11.
- [7] Cater G A, Cibula W G, Miller R L. Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5): 515-522.
- [8] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, Guoan L, Quilang E J P, Li Y H, Spiertz J H J, Tuong T P. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agricultural Water Management*, 2004, 65(3): 193-210.
- [9] Huang X Y, Xu Y C, Shen Q R, Zhou C L, Yin J L, Dittert K. Water use efficiency of rice crop cultivated under waterlogged and aerobic soil mulched with different materials. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 140-143.
- [10] Bouman B A M, Tuong T P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agricultural Water Management*, 2001, 49(1): 11-30.
- [11] Vories E D, Helms R S. Production of water-seeded rice on a clay soil. *Research Series*, 1996, 453: 271-274.
- [12] Borrell A, Garside A, Fukai S. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crops Research*, 1997, 52(3): 231-248.
- [13] Chen G, Zhou Y, Guo S W, Shen Q R. The regulatory mechanism of different nitrogen form on photosynthetic efficiency of rice plants under water stress. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 40(10): 2162-2168.
- [14] Zhou Y, Guo S W, Song N, Zhang L, Shen Q R. Effects of nitrogen form and water stress interaction on photosynthesis, utilization of water and nitrogen of rice plants at the tillering stage. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3): 313-318.
- [15] Zou G H, Mei H W, Yu X Q, Liu H Y, Liu G L, Li M S, Luo L J. Effects of different water supply treatment on vegetative growth, photosynthetic characteristics and grain yield in paddy and upland Rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(8): 1179-1183.
- [16] O' Toole J C, Cruz R T. Response of leaf water potential, stomatal resistance, and leaf rolling to water stress. *Plant Physiology*, 1980, 65(3): 428-432.
- [17] Yang J C, Zhu Q S, Wang Z Q. Effects of soil moisture on the yield and physiological characteristics in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(1): 110-114.
- [18] Lin X Q, Zhou W J, Zhu D F, Zhang Y P. Effect of water management on photosynthetic rate and water use efficiency of leaves in paddy rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(4): 333-338.
- [19] Cheng J P, Cao C G, Cai M L, Wang J P, Yuan B Z, Wang J Z, Zheng C J. Effects of different irrigation modes on biological characteristics and water use efficiency of paddy rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(10): 1859-1865.
- [20] Lu J, Ookawa T, Hirasawa T. The effects of irrigation regimes on the water use, dry matter production and physiological responses of paddy rice. *Plant and Soil*, 2000, 223(1/2): 209-218.
- [21] Qin J T, Hu F, Li H X, Wang Y P, Huang F Q, Huang H X. Effects of dry cultivation with straw mulching on rice agronomic traits and water use efficiency. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(2): 171-176.
- [22] Shao X W, Liu H D, Du Z Y, Yang J, Meng F X, Ma J Y. Effects of water disposal on growth and yield of rice. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 193-196.

- [23] Li C H, Zeng K, Wei S Q, Xu S H, Jiang L G. Water use of rice under different soil tillage and irrigation patterns. *Crops*, 2011, (4): 81-84.

参考文献:

- [3] 彭世彰, 徐俊增, 黄乾, 吴宏霞. 控制灌溉水稻叶片水平的水分利用效率试验研究. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 47-51.
- [4] 王志琴, 杨建昌, 朱庆森. 土壤水分对水稻光合速率与物质运转的影响. *中国水稻科学*, 1996, 10(4): 235-240.
- [5] 胡继超, 姜东, 曹卫星, 罗卫红. 短期干旱对水稻叶水势、光合作用及干物质分配的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 63-67.
- [9] 黄新宇, 徐阳春, 沈其荣, 周春霖, 尹金来, Dittert K. 不同地表覆盖旱作水稻和水作水稻水分利用效率的研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 140-143.
- [13] 陈贵, 周毅, 郭世伟, 沈其荣. 水分胁迫条件下不同形态氮素营养对水稻叶片光合效率的调控机理研究. *中国农业科学*, 2007, 40(10): 2162-2168.
- [14] 周毅, 郭世伟, 宋娜, 张磊, 沈其荣. 水分胁迫和供氮形态耦合作用下分蘖期水稻的光合速率、水分与氮素利用. *中国水稻科学*, 2006, 20(3): 313-318.
- [15] 邹桂花, 梅捍卫, 余新桥, 刘鸿艳, 刘国兰, 李名寿, 罗利军. 不同灌水量对水、旱稻营养生长和光合特性及其产量的影响. *作物学报*, 2006, 32(8): 1179-1183.
- [17] 杨建昌, 朱庆森, 王志琴. 土壤水分对水稻产量与生理特性的影响. *作物学报*, 1995, 21(1): 110-114.
- [18] 林贤青, 周伟军, 朱德峰, 张玉屏. 稻田水分管理方式对水稻光合速率和水分利用效率的影响. *中国水稻科学*, 2004, 18(4): 333-338.
- [19] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 汪金平, 原保忠, 王建漳, 郑传举. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1859-1865.
- [21] 秦江涛, 胡锋, 李辉信, 王一平, 黄发泉, 黄花香. 覆草旱作对水稻主要农艺性状的影响及节水效应. *中国水稻科学*, 2006, 20(2): 171-176.
- [22] 邵玺文, 刘红丹, 杜震宇, 杨晶, 孟繁霞, 马景勇. 不同时期水分处理对水稻生长及产量的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 193-196.
- [23] 李昌华, 曾可, 韦善清, 徐世宏, 江立庚. 不同耕作方式下水分管理对水稻水分利用的影响. *作物杂志*, 2011, (4): 81-84.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of jiaozhou bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元