

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

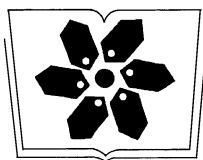
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **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 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

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

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 380 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 38 * 2012-12

DOI: 10.5846/stxb201203120329

李宗新,陈源泉,王庆成,刘开昌,张秀清,刘霞,张慧,刘书聪,刘春晓,高旺盛,隋鹏. 密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响. 生态学报, 2012, 32(23): 7391-7401.

Li Z X, Chen Y Q, Wang Q C, Liu K C, Zhang X Q, Liu X, Zhang H, Liu S C, Liu C X, Gao W S, Sui P. Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7391-7401.

密植条件下种植方式对夏玉米群体 根冠特性及产量的影响

李宗新^{1,2,3}, 陈源泉¹, 王庆成^{2,3}, 刘开昌^{2,3}, 张秀清^{2,3}, 刘霞^{2,3},
张慧^{2,3}, 刘书聪^{2,3}, 刘春晓^{2,3}, 高旺盛^{1,*}, 隋鹏¹

(1. 中国农业大学循环农业研究中心, 北京 100193; 2. 山东省农业科学院玉米研究所, 济南 250100;

3. 小麦玉米国家工程实验室, 济南 250100)

摘要: 选用平展大穗型品种鲁单 981 (Ludan981, LD981) 和紧凑型品种鲁单 818 (Ludan818, LD818), 在两种种植密度 (60000 和 90000 株/hm²) 和两种种植方式 (单株和双株) 下, 研究了密植及种植方式对夏玉米冠层和根系结构与功能以及子粒产量等的影响。研究发现, 随种植密度增加, 冠层垂直分布呈现干重比例权重上移的趋势, 根系则呈现下移的趋势。密植条件下, LD981 冠层对生长空间更为敏感, 其根系对生长空间的竞争强于冠层, 其群体产量限制因素是子粒库容; LD818 根系对生长空间更为敏感, 冠层对生长空间的竞争强于根系, 其群体产量限制因素是单位面积穗数。60000 株/hm² 下, LD981 的群体结构质量和功能较优, 双株种植可缓解其冠层竞争, 根、冠协调, 表现增产; 在 90000 株/hm² 下, LD818 的群体结构质量和功能较优, 双株种植可缓解其根系竞争, 部分改善冠层群体结构质量和功能, 根、冠协调, 表现增产。

关键词: 玉米; 密植; 种植方式; 根冠; 生长空间

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities

LI Zongxin^{1,2,3}, CHEN Yuanquan¹, WANG Qingcheng^{2,3}, LIU Kaichang^{2,3}, ZHANG Xiuqing^{2,3}, LIU Xia^{2,3},
ZHANG Hui^{2,3}, LIU Shucong^{2,3}, LIU Chunxiao^{2,3}, GAO Wangsheng^{1,*}, SUI Peng¹

1 Research Center of Circular Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 Maize Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China

3 National Engineering Laboratory for Wheat and Maize, Jinan 250100, China

Abstract: In order to investigate high densities and planting methods of summer maize in north China, in 2010–2011, two varieties (Ludan 981, LD981, and Ludan 818, LD818) were selected and planted in two densities (6 0000 and 90000 plants/hm²) at two planting methods (single and double plants at one place). In this experiment, eight treatments were designed to study the effect of planting methods on root-shoot development and grain yield of summer maize under high densities. The results showed that vertical distribution of canopy resulted in a trend that dry matter weight increased with planting density increased; however, root vertical distribution resulted in a opposite trend. Under high density conditions, there were different competitive ability of root and shoot between different maize varieties. The canopy of LD981 was more

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAD16B15, 2011BAD16B09); 农业科技成果转化资金项目 (2010GB2C600250); 山东省玉米现代产业技术体系项目

收稿日期: 2012-03-12; **修订日期:** 2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wshgao@cau.edu.cn

sensitive to space, and its space competition of root was stronger than that of the canopy, hence, the yield limiting factor of LD981 was the kernel storage capacity; however, the root of LD818 was more sensitive to space, and its space competition of canopy was stronger than that of the root, hence, the yield limiting factor of LD818 was the spike number per unit. Under the condition of 60000 plants/hm², the quality of canopy structure and function of LD981 was better, double plants at one place reduced competitive stress in the canopy, as a result, achieved root and shoot equilibrium. Hence, the population yield enhanced; under the condition of 90000 plants/hm², the quality of canopy structure and function of LD818 was better, double plants at one place alleviated root competition, the quality of canopy structure and function improved partly, therefore, the root and shoot coordinated, which let to the yield increased.

Key Words: maize (*Zea mays* L.); high densities; planting method; root-shoot; growth space

根和冠是对作物个体基本的划分,是作物结构和功能的基础^[1],二者在营养物质、水分以及碳水化合物供求和分配上既互相依赖又互相影响^[2]。根、冠关系主要体现在二者结构的变化与功能的调节,这不仅与作物个体和环境间物质及能量交换有关,而且与作物群体本身的代谢、生长、发育等过程紧密相关^[3-4],相关研究一直是农业领域的研究热点^[5-6]。共用资源充足时,根、冠主要表现为依赖关系;共用资源短缺时,则表现为竞争关系^[7-8]。作物群体内个体之间的竞争主要表现为根、冠的竞争。根据生态学中的优化分配理论,种内竞争使得个体把有限的资源向某一部分的分配增加,造成对其它部分分配的相应减少,必然将降低作物种群内每个个体向繁殖方面的资源分配比例,这时从整个群体的角度来看反而不利^[9-10]。可见,只有根、冠的结构与功能调节至平衡状态时,二者关系协调,作物产量和资源利用效率较高^[1]。因此,从结构和功能两个角度侧重研究作物群体生长过程中根、冠的生长发育特征,对于调节根、冠关系,构建作物高质量群体尤为重要。近年来,随着根系研究技术和成果丰富^[11-12],有关作物根冠关系的研究日渐增多^[1],大部分集中于水分^[4,13]、矿质营养^[2,8]等因素亏缺的逆境响应,且人工模拟实验较多^[4,14-15],大田自然条件下的研究很少。玉米是 C4 作物,植株冠层高大,根系发达,与小麦^[2,4,13-14]和牧草^[16-17]等作物相比较,开展此方面的研究更困难一些,导致相关研究滞后。国内外相关研究表明,种植密度增加是实现玉米高产的关键因素^[18-20],逐步增加种植密度是今后玉米超高产栽培的发展趋势。显然,种植密度增加会改变玉米个体的生长空间,导致可获取资源受限,引起群体内竞争加剧^[21]。作物间发生竞争时,资源的改变和作物对资源改变后产生的反应将会影响作物的个体形态、种群数量和群落结构等^[22]。玉米群体结构包括地上冠层和地下根系吸收层两个部分,仅仅研究冠层对生长空间竞争加剧的响应是片面的。少数学者已经有意识开展了一些研究,但存在分歧。一些研究者认为随着有效资源的增加,个体间的竞争由根部转向茎叶,地下竞争比地上竞争对作物的影响大^[23-24];另一种观点则认为,地上部竞争加剧,使地上部生长受到抑制,从而影响根系生长^[21]。为此,本试验在高种植密度条件下,通过配置不同种植方式,研究不同类型玉米品种群体根冠结构和功能及产量对生长空间改变的响应,以期为玉米产量的进一步提高提供一些有益的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于 2010—2011 年在山东省农业科学院玉米研究所六一农场(37°1'N, 117°1'E)进行。试验田为灌排良好、常年培育、土壤肥沃的高产田(近 3 a 玉米平均单产 12780 kg/hm² 以上,高出当地平均单产 48.17%),砂壤土,耕层土壤有机质含量为 1.11%,全氮含量 0.11%,速效氮 53.16 mg/kg,速效磷 29.38 mg/kg,速效钾 87.17 mg/kg。

近 10 a 来,我国玉米主推品种逐渐转变为株型紧凑、耐密植杂交种为主,株型平展、大穗型杂交种逐渐减少^[25]。因此,本试验选用平展大穗型品种鲁单 981(Ludan981, LD981)和紧凑中穗型品种鲁单 818(Ludan818, LD818)为供试材料。每个品种设置 60000(D₁)、90000(D₂)株/hm² 2 个种植密度以及单株(P₁)、

双株(P_{II})2 种植方式;采用随机区组设计,每个小区 12 行,小区面积 40.02 m^2 ,行距 66.7 cm ,重复 4 次。两年均为 6 月中旬播种,10 月上旬收获。依据 13500 kg/hm^2 的玉米产量目标,按照每生产 100 kg 子粒需吸收 3 kgN 、 $1\text{ kgP}_2\text{O}_5$ 、 $3\text{ kgK}_2\text{O}$ 施用无机肥料,其中氮肥(尿素)以 4:6 的比例于播种前和大喇叭口期施入,磷肥(过磷酸钙)、钾肥(硫酸钾)全部做底肥施入;其它栽培管理按大田高产要求进行。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 冠层

分别于拔节期、大喇叭口期、开花期、乳熟期和成熟期取样, D_1P_I 、 D_2P_I 每个处理取代表性植株 6 穴(6 株), D_1P_{II} 、 D_2P_{II} 每个处理取代表性植株 3 穴(6 株),地上部冠层按叶片、子粒、茎秆(除叶片、子粒的剩余部分)分样,烘干法测定单株干物重。同期量取单株叶面积,计算叶面积指数(LAI)^[26], $LAI=LA/GA$,式中 LA 为单株叶面积(m^2), GA 表示单株所占土地面积(m^2)。根据单株干物重和叶面积计算叶面积持续期(LAD)、净同化率(NAR)和相对生长率(RGR)^[26], $LAD=(LA_2+LA_1)\times(T_2-T_1)^2/2$, $NAR=2.3\times(W_2+W_1)\times(\log LA_2-\log LA_1)/(T_2-T_1)\times(LA_2-LA_1)$, $RGR=2.3\times(\log W_2-\log W_1)/(T_2-T_1)$,式中 W_1 、 W_2 分别表示前后两次取样的单株干重(g), LA_1 、 LA_2 表示前后两次取样的单株叶面积(m^2), T_2-T_1 表示前后两次取样的间隔期(d)。采用大田切片法测定开花期群体结构^[26],取样面积 2 m^2 ,从上到下按层厚 30 cm 分层割取样品,每层植株样按叶片、子粒、茎鞘、果穗和雄穗分样,烘干法分别测定其干物重,以层高为纵坐标,单位面积干物重为横坐标,按各层高度绘制出群体结构图。

成熟收获时测产,每个小区取 13.2 m^2 ,并计数实际收获穗数;计算单位面积穗数,考种测定穗粒数、千粒重,并计算子粒库容^[26]。

1.2.2 根系

采用根钻法和大田挖掘法结合采集根系样品,取样时间和样品植株数量同上。根钻法采集根系样品,钻头长 15 cm ,直径 6.2 cm ,根据前人研究经验和研究者在大田用根钻采样的结果^[27],垂直剖面采样深度确定为 80 cm ,水平层面以取样植株为中心,面积范围为 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ 。依据李鹏等^[28]对 1/4 样圆法的研究修订结论,以取样植株主茎为中心,水平层面划出 1/4 圆弧取样区域,每个区域均匀取 8 个样点,从上往下按 20 cm 分层取样,深 80 cm ,将所得的样本用 0.5 mm 和 0.25 mm 土壤筛依次过筛冲洗,捞出根样,然后烘干法测定干重。累加计算同一土层各取样区域样点的根重,用于分析根系在土壤中的垂直分布,并计算根系总干重。大田挖掘法采集根系样品,以取样植株为中心,取 1/2 行距(垂直于行向) $\times$ 株距(平行于行向)划出根系分布区域,深 80 cm ,通过环切和冲洗,完整挖掘其中的全部根系。用排水法测定根系总体积;用亚甲基蓝吸附法测定根系吸收总面积和活跃吸收面积^[29],用 TTC(氯化三苯基四氮唑)还原法测定根系活力,以上结果除以根系总干重算得根系比吸收面积、比活跃吸收面积和还原强度^[30]。

1.3 数据分析

两年数据结果变化趋势基本一致,本文主要以 2011 年度试验数据进行整理分析。试验数据处理采用 Excel2007,统计分析和显著性检验采用 SPSS13.0 软件,Sigmaplot10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 种植方式对两种类型玉米群体根冠结构垂直分布的影响

玉米开花期,不同处理单位面积群体根冠结构的垂直分布均表现出相似的趋势(图 1),依据干重分布比例,自上而下分布是雄穗、叶片、果穗、茎鞘和根系。叶片干重垂直分布自下而上呈现先增后减的趋势,其中 $67.80\%\text{—}80.45\%$ 分布在离地面 $90\text{—}240\text{ cm}$ 的冠层中上部;茎鞘自下而上呈现不断递减的趋势,其中 $74.65\%\text{—}86.58\%$ 分布在 $0\text{—}150\text{ cm}$ 的冠层中下部;果穗干重主要集中在离地面 $90\text{—}180\text{ cm}$ 的冠层中部;根系自上而下呈“T”分布,根系干重的 $87.75\%\text{—}92.44\%$ 分布在近地面 $0\text{—}40\text{ cm}$ 的深度。叶片、茎鞘、果穗、根系、雄穗分别平均占全植株干重的 30.69% 、 48.99% 、 7.49% 、 10.16% 和 2.67% 。

种植密度由 D_1 增至 D_2 ,叶片、茎鞘和果穗干重的垂直分布呈现比例权重上移的趋势,冠层中上部叶片

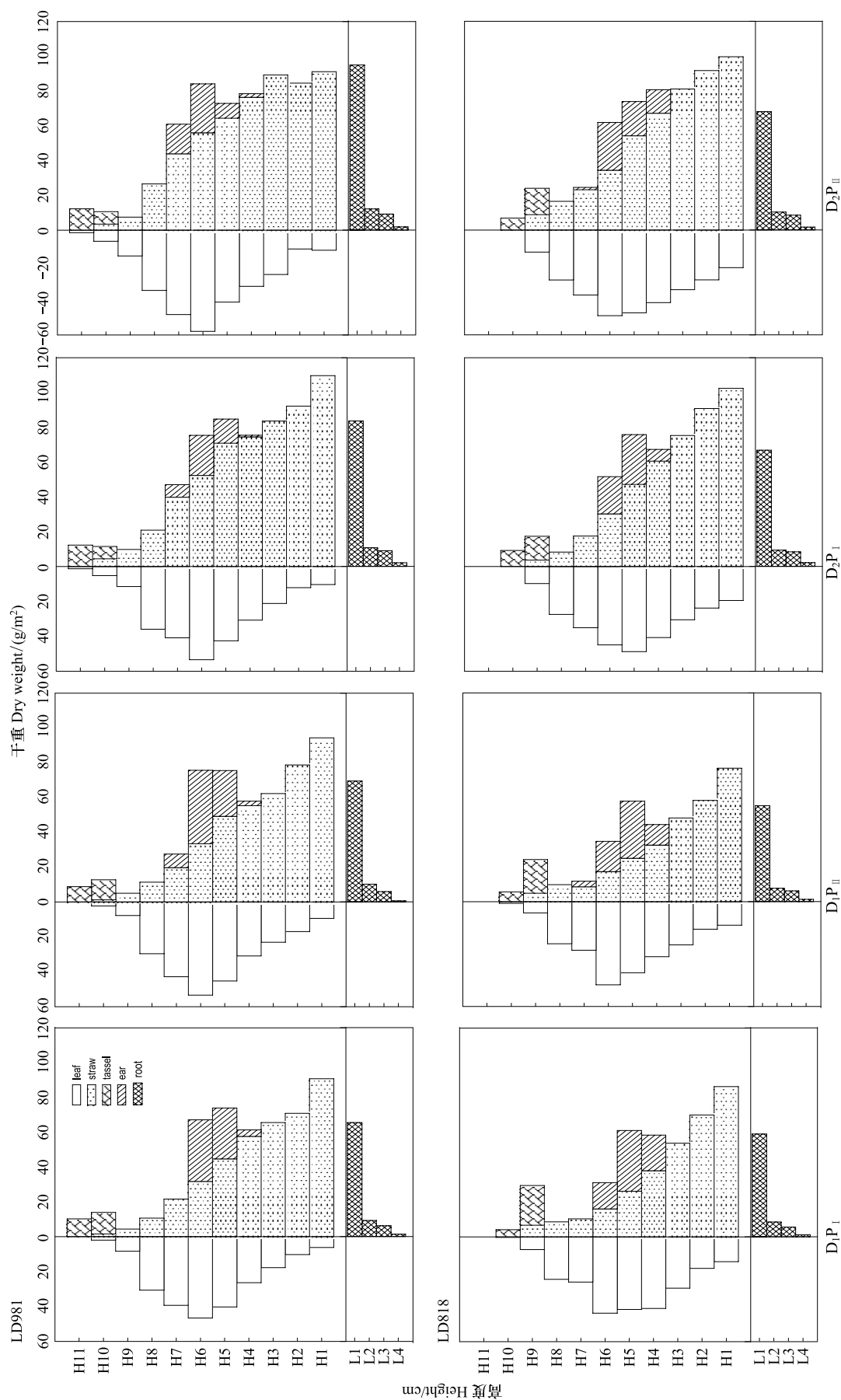


图1 开花期群体根冠结构垂直分布变化动态
 Fig. 1 Dynamics of vertical-distribution on root-canopy structure during flowering stage
 H代表地上部群体冠层高度0—300 cm, 层高30 cm; L代表地下部根系所在土层深度0—80 cm, 层高20 cm

(120—330 cm) 和茎秆(150—330 cm) 以及 150—210 cm 高度内的果穗干重的比例分别平均增加 3.38%、4.21% 和 12.61%, 根系干重的垂直分布则呈现比例权重下移的趋势, 40—80 cm 土层的根系干重的比例平均增加 4.01%; 全植株、叶片、茎鞘和根系的干重呈现增加趋势, 分别平均增加 25.77%、16.82%、44.32% 和 26.93%, 果穗和雄穗则分别平均减少 22.02% 和 11.51%; 进一步分析发现, 茎鞘占全植株干重的比例平均增加 6.61%, 叶片、果穗和雄穗则分别下降了 2.26%、3.51% 和 0.95%, LD981 的根系干重比例上升 0.91%, LD818 则下降 0.69%。种植方式由 P_I 转变为 P_{II} 时, D_1 、 D_2 处理下 LD981 的全植株、叶片、茎鞘、果穗和根系分别平均增加 4.31%、10.73%、0.37%、18.72% 和 8.09%, D_1 处理下 LD818 的全植株、叶片、茎鞘、果穗和根系干重分别下降 8.36%、5.21%、11.19%、7.58% 和 5.39%, D_2 处理下则分别增加 8.11%、7.26%、9.26%、9.30 和 1.99%; 进一步分析发现, D_1 处理下两个品种中下部茎鞘(0—120 cm) 的比例权重变化不大, D_2 处理下均下降; D_1 处理下, LD981 中下部叶片(0—120 cm) 增加 4.15%, LD818 的则下降 5.09%, D_2 处理下二者均变化不明显; 两个品种果穗干重和根系的垂直分布均呈现比例权重上移的趋势, LD981 的上移趋势更明显。

两个品种比较, LD981 的冠层垂直分布高度比 LD818 高 30 cm。 D_1 、 D_2 处理下 LD981 的全植株干重均明显高于 LD818, 各器官(除雄穗) 则表现各异。 D_1 处理下, LD981 的各器官(除雄穗) 干重均明显高于 LD818, D_2 处理下, 前者的茎鞘和根系干重高于后者, 叶片和果穗则是后者高于前者。 LD981 冠层中上部叶片干重的比例比 LD818 高 6.59%, 前者冠层中下部茎鞘干重的比例比后者低 6.05%; LD981 果穗干重的垂直分布高度明显高于 LD818, 前者平均 96.38% 集中于 120—210 cm 冠层高度内, 后者平均 98.23% 集中于 120—210 cm 冠层高度内; 近地面 0—40 cm 的深度内 LD981 根系干重比例高于 LD818, 平均高 9.63%。

2.2 叶面积指数和根系体积变化动态

不同处理的叶面积指数(LAI) 均随着生育进程呈单峰曲线变化, 开花期达到最大值, 之后迅速下降(图 2)。

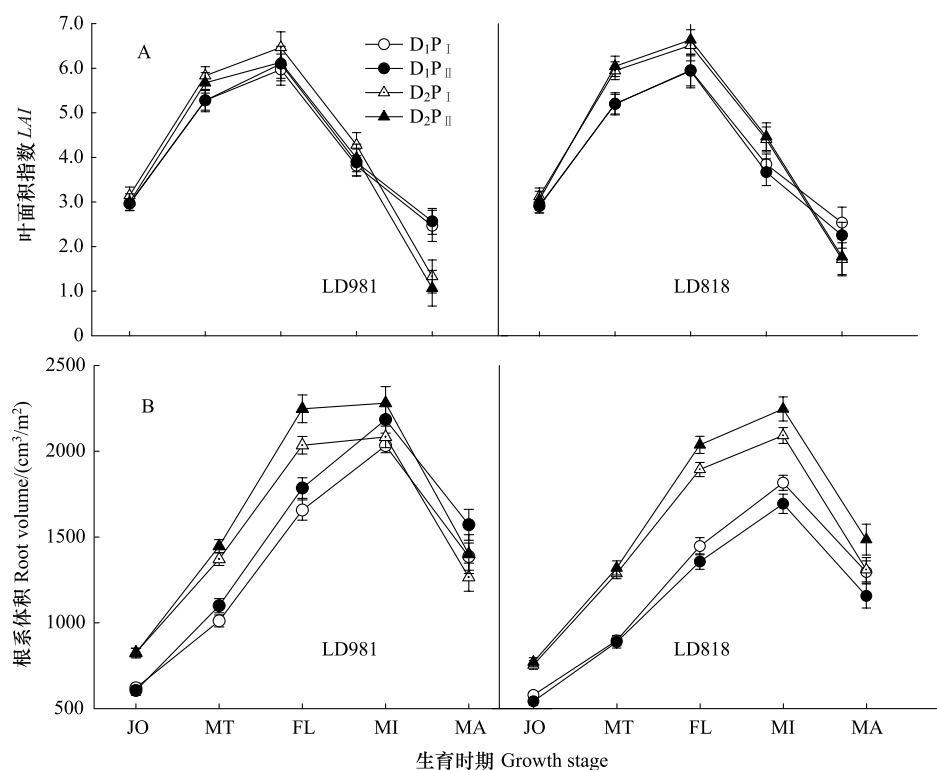


图2 叶面积指数和单位面积根系体积变化动态

Fig.2 Dynamics of LAI and root volume

JO 表示拔节期 JO means jointing; MT 表示大喇叭口期 MT means male tetrad; FL 表示开花期 FL means flowering; MI 表示乳熟期 MI means milky; MA 表示成熟期 MA means maturity。

拔节期,各处理间的 *LAI* 差异不大,之后至乳熟期, D_2 的 *LAI* 高于 D_1 ,乳熟期后,前者则逐渐低于后者。种植方式由 P_I 转变为 P_{II} 时, D_1 处理 LD981 的 *LAI* 平均略增 1.46%, LD818 平均降低 2.20%, D_2 处理前者平均下降 5.70%,后者则平均略增 1.15%。两个品种比较, D_1 处理下 LD981 的 *LAI* 平均比 LD818 高 1.85%, D_2 处理下则平均低 7.23%。

由图 2 看出,不同处理的单位面积根系体积生育期内呈现与 *LAI* 相似的变化趋势,乳熟期达到最大值。种植密度由 D_1 增至 D_2 ,两个品种的单位面积根系体积均明显增加,平均增加 21.69%。种植方式由 P_I 转变为 P_{II} 时,两个品种的单位面积根系体积变化趋势不同; D_1 、 D_2 处理下 LD981 的均表现增加,分别增加 8.04%、8.13%, D_1 处理下 LD818 的下降 6.61%, D_2 处理下增加 7.14%。两个品种比较, D_1 、 D_2 处理下 LD981 的分别平均比 LD818 高 19.78%、3.99%。

2.3 种植方式对两种类型玉米根系吸收活力和 TTC 还原强度的影响

表 1 结果显示,大喇叭口期至成熟期,不同处理的比吸收面积与比活跃吸收面积呈线性下降,根系还原强度则呈现先升后降的变化趋势,3 个根系吸收活性指标均随种植密度增加而升高,其中比吸收面积平均升高 15.43%,比活跃吸收面积平均升高 22.27%,根系还原强度平均升高 8.63%。 D_1 处理下, P_I 转变为 P_{II} ,两个品种的比吸收面积、比活跃吸收面积和根系还原强度均不显著性升高; D_2 处理下,前者的均显著下降,后者的则均升高。两个品种比较,LD981 的比吸收面积、比活跃吸收面积和根系还原强度均高于 LD818,分别平均高 13.28%、4.65% 和 3.64%,显著性检验结果显示,LD981 根系吸收活性随种植密度增加而升高幅度较大, D_1 处理下的差异显著低于 D_2 处理下的差异。

表 1 不同种植方式下两种类型玉米根系吸收活力和吸收强度的变化

Table 1 The change ratio of root absorbing activities to root dry weight in two types maize under different planting methods

品种 Varieties	处理 Treatments	比吸收面积 Ratio of absorbing area to root dry weight/(m^2/g)			比活跃吸收面积 Ratio of actively absorbing area to root dry weight/(m^2/g)			根系 TTC 还原强度 Ratio of reductive amount of TTC to root dry weight/($\mu gTTC \cdot h^{-1} \cdot g^{-1}$)		
		MT	FL	MA	MT	FL	MA	MT	FL	MA
LD981	$D_1 P_I$	11.12f	10.28d	7.76b	3.23e	2.62e	0.93e	160.09d	216.59c	42.34f
	$D_1 P_{II}$	12.88c	10.32d	7.79b	3.68d	2.61e	1.00de	173.38cd	221.43bc	47.43e
	$D_2 P_I$	14.47a	13.62a	8.81a	4.84a	3.80a	1.55a	205.70a	230.65a	76.97a
	$D_2 P_{II}$	13.80b	12.54b	8.56ab	4.42b	3.40b	1.48ab	199.61a	223.68bc	71.52b
LD818	$D_1 P_I$	12.49de	10.29d	4.94d	3.66d	2.71de	1.03d	170.43c	218.07bc	50.55de
	$D_1 P_{II}$	12.50de	10.49d	5.28d	3.80d	2.80d	1.05d	176.01cd	224.84b	51.65de
	$D_2 P_I$	12.55d	11.43c	6.20cd	4.11c	3.04c	1.26bc	180.53bc	209.53d	53.63d
	$D_2 P_{II}$	12.61cd	11.45c	6.65c	4.19bc	3.12c	1.40b	184.48b	224.32b	63.62c

同一列内标注不同字母的数据处理间在 0.05 水平下差异显著;大喇叭口期 (maletetrad, MT);开花期 (flowering, FL);成熟期 (maturity, MA)

2.4 种植方式对两种类型玉米群体冠层结构指标的影响

从表 2 可以看出,种植密度增加,两个品种的群体总叶面积持续期 (*LAD*) 均显著升高,LD981 平均升高 2.65%, LD818 平均升高 15.47%,但二者开花后 *LAD* 的变化不同,LD981 平均降低 6.67%, LD818 平均升高 3.82%;二者的净同化率 (*NAR*)、相对生长率 (*RGR*) 则随着种植密度增加表现为显著降低,分别平均降低 23.18%、8.76% 和 13.49%、3.87%。 D_1 处理下, P_I 转变为 P_2 , LD981 的 *LAD*、*NAR* 和 *RGR* 均升高,但差异不显著; LD818 的则均表现降低,其中开花后叶面积持续期 (*PFLAD*)、总叶面积持续期 (*TLAD*) 呈显著降低; D_2 处理下则反之。两个品种比较, D_1 处理下, LD981 的 *PFLAD* 和 *TLAD* 显著高于 LD818,开花前 *LAD* 则是前者显著低于后者, *NAR* 和 *RGR* 差异不显著; D_2 处理下,前者的 *PFLAD*、*TLAD* 和 *NAR* 均显著低于后者,分别平均低 29.06%、10.69% 和 10.26%,开花前叶面积持续期 (*BFLAD*)、*RGR* 差异不显著。

2.5 种植方式对两种类型玉米产量及产量构成因素的影响

由表 3 可见,种植密度增加,穗粒数 (*GN*)、干粒重 (*GW*) 均显著下降,导致子粒库容 (*SS*) 和群体产量 (*GY*)

显著减少,表现出对单株产量(PY)的负效应,单位面积穗数(EN)则显著升高,表现正效应,两个品种的正负效应叠加效果不同,LD981 的 PY 下降,LD818 的升高。 P_I 转变为 P_{II} ,两个品种的 GN 均受益显著升高; D_I 处理下,LD981 的 GW 略有升高,导致其 SS 显著升高, EN 变化不大, GY 和 PY 随之均显著升高,LD818 的 GW 显著下降,导致其 SS 显著下降,再叠加 EN 的下降效应,其 GY 和 PY 均显著下降; D_2 处理下,LD981 的 EN 略升高,但受其 GW 显著下降导致 SS 下降的影响, PY 显著下降,虽然 LD818 的 GW 也显著下降,但其 SS 略有增加,其 GY 和 PY 也不显著性增加。两个品种比较, D_I 处理下,LD981 的 GN 和 SS 显著高于 LD818, GW 与 EN 差异不显著,导致前者的 GY 和 PY 均显著高于后者; D_2 处理下,前者的 GN 、 GW 、 SS 和 EN 均显著低于 LD818,导致前者的 GY 和 PY 均显著低于后者。

表 2 不同种植方式下两种类型玉米群体冠层结构指标的变化

Table 2 The change ratio of canopy structure indices in two types maize under different planting methods

品种 Varieties	处理 Treatments	叶面积持续期 $LAD/(m^2 \cdot d^{-1} \cdot m^{-2})$			净同化率 NAR $/(g \cdot d^{-1} \cdot m^{-2})$	相对增长率 RGR $/(g \cdot d^{-1} \cdot kg^{-2})$
		开花前 LAD	开花前 LAD	总叶面积持续期		
		Before flowering LAD	Post flowering LAD	Total LAD		
LD981	$D_I P_I$	183.6e	213.4b	397.1d	7.31ab	53.86a
	$D_{I P_{II}}$	184.4e	217.9b	402.3d	7.53a	54.37a
	$D_2 P_I$	220.8a	200.9c	421.6c	5.74e	49.53a
	$D_2 P_{II}$	211.9b	187.2d	399.0d	5.66e	49.22a
LD818	$D_I P_I$	191.55d	205.31c	396.86d	7.29ab	54.30a
	$D_{I P_{II}}$	191.28d	198.48d	389.76e	7.24b	53.53a
	$D_2 P_I$	203.21c	248.65a	451.86ab	6.13d	51.19a
	$D_2 P_{II}$	204.22c	252.25a	456.47a	6.44c	52.47a

表 3 不同种植方式下两种类型玉米产量及产量构成因素的变化

Table 3 The change ratio of grain yield and its components in two types maize under different planting methods

品种 Varieties	处理 Treatments	穗粒数 Grains No. per ear	千粒重 1000-kernel Weight/g	子粒库容 (Grains per ear× kernel weight)	单位面积穗数 Ear No. per m^2 $/(个/m^2)$	单株子粒产量 Grain yield $/(g/plant)$	群体产量 Population yield $/(kg/hm^2)$
LD981	$D_I P_I$	632.51b	376.43bc	238.10b	6.41e	193.25b	11452.05d
	$D_{I P_{II}}$	651.82a	380.31ab	247.89a	6.45e	205.68a	12048.60b
	$D_2 P_I$	474.96g	313.57f	148.93e	8.53c	107.97e	9337.20f
	$D_2 P_{II}$	493.18f	294.24g	145.11e	8.55c	105.59e	9053.58g
LD818	$D_I P_I$	604.73 c	383.58a	231.96c	6.71d	195.85b	11737.05c
	$D_{I P_{II}}$	607.24c	371.85c	225.80d	6.45e	184.82c	11030.70e
	$D_2 P_I$	533.84e	341.08d	182.08f	9.00a	145.06d	13023.90a
	$D_2 P_{II}$	562.66d	332.33e	186.99f	9.01a	148.93d	13176.85a

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 种植方式对根冠群体结构垂直分布的影响

玉米各器官的田间空间配置状况可以直观地反映玉米群体结构分布。本文采用大田切片法研究了开花期根冠群体的垂直结构,发现密植条件下玉米各器官的垂直分布层次分明,并与其功能有着直接的联系。雄穗居冠层顶部,叶片主要集中于冠层中上部,茎鞘主要集中于冠层中下部,果穗则主要集中在冠层中部,这与王庆成等^[26]的研究结果基本一致;此外,根系自上而下呈“T”分布,主要分布在近地面的吸收层。种植密度增加不利于个体库源的建成,虽然全植株、叶片、茎鞘和根系的干重表现为增加,但叶片和果穗占全植株干重的比例均表现下降;同时发现,冠层垂直分布呈现干重比例权重上移的趋势,根系则呈现下移的趋势,这是根、

冠结构自动调节^[1]的结果。双株种植有利于 LD981 的根、冠群体生物量增加,对 LD818 的只在较高种植密度 90000 株/hm² 下有积极效果。同时使得两个品种根系明显上移,这应该得益于双株种植可改善冠层中下部光照条件^[31]和根系扩展能力^[32]。两个品种比较,种植密度 60000 株/hm² 下,LD981 的各器官(除雄穗)干重均明显高于 LD818,至 90000 株/hm² 下,前者的茎鞘和根系干重较高,叶片和果穗则是后者较高;LD981 的根系干重比例和根冠比随种植密度增加而增大,LD818 的则减小。可以看出,密植条件下 LD981 冠层对生长空间更为敏感一些,其根系对生长空间的竞争要强于冠层;LD818 根系对生长空间更为敏感一些,冠层对生长空间的竞争要强于根系。这一结果与严云等^[21]用单一品种研究得出的结论不一致。因此,可以推断玉米根、冠的竞争力强弱与品种类型相关,不同类型玉米品种根、冠建成对空间配置的响应不同。

3.1.2 种植方式对根冠群体结构与功能的影响

单位面积根系体积、比吸收面积、比活跃吸收面积和根系 TTC 还原强度是表征根系吸收能力的重要量化指标^[1,27]。本试验研究结果显示,群体根系体积受益于单位面积株数增加而升高,种植密度增加导致根系生长空间受到胁迫,激发根系通过主动调节自身生理代谢过程,较大幅度地提升了根系吸收面积、活跃吸收面积和根系还原总量,从而提高了单位重量的根系吸收能力和强度,减缓了生长空间压缩带来的胁迫,这与前人研究得出的环境胁迫可致根系吸收能力提高的结论是一致的^[30]。种植方式改变也对两个品种的根系吸收能力产生一定的影响。单株变双株时,两个品种的单位面积根系体积与干重的变化趋势一致,也进一步验证了两个类型品种的根系竞争特点;单株变双株致使个体竞争局部增强,反馈于根系进行自动调节,其根系吸收面积、活跃吸收面积和根系还原总量升高,种植密度 60000 株/hm² 下,两个品种的根系吸收能力和强度均提高,90000 株/hm² 下,由于 LD981 的根系竞争胁迫强度已经很高,种植方式改变提高根系活性的幅度没有根系生物量大,导致其根系吸收能力和强度显著下降,而 LD818 根系活性的提高幅度大于根系生物量,其根系吸收能力和强度则升高。说明变化种植方式可以激发玉米个体根系的主动调节能力,提高其吸收活性,与根系结构和生物量的调节并不一定同步,这取决于不同种植密度的空间胁迫和品种类型。

LAI、*LAD*、*NAR* 和 *RGR* 是表征群体冠层结构特性的重要数量指标^[26]。种植密度对冠层结构和功能的影响要大于其他栽培措施^[33]。王庆成等^[26]研究认为,群体 *LAI* 和 *LAD* 随种植密度增加表现升高,*NAR* 和 *RGR* 则表现降低,本试验的研究验证了这一点;由于高密度群体叶片衰老较快^[21,26],其 *LAI* 在乳熟期后逐渐低于低密度群体。*LAI*、*LAD*、*NAR* 和 *RGR* 对种植方式改变的响应与根系吸收活力指标一致,这符合 Veen B W 等^[34]的研究结论,也反映了群体根、冠之间一种相互协作关系^[35]。两个品种的群体冠层结构指标对种植密度的响应表现不同,60000 株/hm² 下,LD981 的 *LAI*、*TLAD* 和 *PLAD* 均高于 LD818,至 9 株/m² 下,情况反之。可见,LD981 群体结构和功能对种植密度递增更为敏感,*LAD* 的大小及其生育期内的分配比例,一定程度上可反映品种特性^[18,26]及其对种植密度的响应。

3.1.3 种植方式对产量和产量构成因素的影响

有关玉米种植密度的研究成果较多,一些研究认为种植密度通过影响 *GN*、*GW* 影响 *PY*^[18],也有研究认为 *GW* 是决定 *PY* 的主要因素,*EN* 和 *GN* 影响较弱^[36]。本试验密植条件下,发现 *PY* 的增减决定于 *GN*、*GW* 下降导致 *SS* 减少的负效应和 *EN* 升高的正效应叠加,不同品种间表现不同,LD981 的 *PY* 限制因素是 *SS*,LD818 的则是 *EN*,可见不同类型品种的最适密度、产量潜力存在差异。卫丽等^[31]研究发现,双株配置方式可以改善穗部性状,提高穗粒重和千粒重,提高 *PY*。本试验研究结果表明,双株配置方式可以通过改善冠层通风透光条件提高 *GN*、*GW* 的响应则因品种和种植密度而异,*PY* 限制因素是 *SS*。

综合分析可以看出,本试验密植条件下,平展大穗型品种 LD981 根系对生长空间的竞争要强于冠层,冠层光竞争是限制因素,种植密度增加,表现出个体根“外向型”竞争力强的特点,根系群体体积和吸收能力升高,但冠层光竞争加剧导致冠层群体结构质量和功能减弱,呈现一定程度的根系冗余^[9,37],影响了库的建成,导致个体产量与群体产量均下降;而紧凑中穗型品种 LD818 冠层对生长空间的竞争要强于根系,根系吸收层对水分和养分的竞争是限制因素,种植密度增加,其冠群体结构和功能增强,根系群体体积和吸收能力升高,

群体产量受益于群体穗数增加而升高。种植密度 60000 株/hm² 下,双株种植缓解了 LD981 的冠层光竞争^[31],改善了其冠层群体结构质量和功能,根、冠协调,表现增产;增至 90000 株/hm² 时,由于冠层生长空间严重受限,双株种植并不能改善冠层群体结构质量和功能,根系反而受益提高了其群体体积和吸收能力,呈现一定程度的根系冗余^[9,37],致使冠层水分和养分供应受阻,表现减产。LD818 在种植密度 60000 株/hm² 下,个体竞争压力不大,但双株种植使其根系竞争局部加大,根系表现出“内敛型”竞争的特点,致使冠层水分和养分供应受阻^[10],源库失调,导致减产;增至 90000 株/hm² 时,双株种植缓解了根系竞争,部分改善了冠层群体结构质量和功能,根、冠协调,表现增产。因此,适宜的种植密度是构建合理的玉米根、冠群体结构的基础,由于不同类型玉米品种根、冠竞争力强弱存在差异,种植方式只有在适宜的种植密度和适度的生长空间压力下才能发挥群体增产的正效应。本文仅从表观上阐述了密植条件下玉米根、冠结构的变化和功能表现,关于根、冠相互协作及自动调节的机制和内在机理尚需深入研究。

3.2 结论

种植密度对两种类型玉米群体垂直分布、结构与功能影响较大。种植密度递增,二者冠层垂直分布呈现干重比例权重上移的趋势,根系则呈现下移的趋势,单位面积根系体积、比吸收面积、比活跃吸收面积、根系 TTC 还原强度、LAI 和 LAD 均表现升高,NAR 和 RGR 则表现降低。密植条件下,平展大穗型品种 LD981 冠层对生长空间更为敏感,其根系对生长空间的竞争强于冠层,其群体产量限制因素是子粒库容;紧凑中穗型品种 LD818 根系对生长空间更为敏感,冠层对生长空间的竞争强于根系,其群体产量限制因素是单位面积穗数。60000 株/hm² 下,LD981 的群体结构质量和功能较优,双株种植可缓解其冠层竞争,根、冠协调,表现增产;在 90000 株/hm² 下,LD818 的群体结构质量和功能较优,双株种植可缓解其根系竞争,部分改善冠层群体结构质量和功能,根、冠协调,表现增产。

致谢: 本文得到山东农业大学李全起副教授的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Chen X Y, Gao Z H, Luo Y P. Relationship between root and shoot of plants. *Plant Physiology Communications*, 2005, 41(5): 555-562.
- [2] Ren S L, Zhang L M, Zhang S Q, Shangguan Z P. The effect of nitrogen nutrition on coordinate growth of root and shoot of winter wheat. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(3): 395-400.
- [3] Magnani F, Mencuccini M, Grace J. Age-related decline in stand productivity: the role of structural acclimation under hydraulic constraints. *Plant, Cell and Environment*, 2000, 23(3): 251-263.
- [4] Feng G L, Luo Y P. Simulation on functional equilibrium of winter wheat root and shoot under different soil water regimes. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 96-103.
- [5] Wang P, Wang T H, Zhou D W, Zhang H X. A literature review on the above- and below-ground competition. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3489-3499.
- [6] Schenk H J. Root competition: beyond resource depletion. *Journal of Ecology*, 2006, 94(4): 725-739.
- [7] Peltzer D A, Wilson S D, Gerry A K. Competition intensity along a productivity gradient in a low-diversity grassland. *The American Naturalist*, 1998, 151(5): 465-475.
- [8] Cahill J F. Fertilization effects on the interactions between above-and belowground competition in an old field. *Ecology*, 1999, 80(2): 446-480.
- [9] Zhao S L, Li F M, Zhang D Y, Duan S S. Crop production is a population process. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(1): 100-104.
- [10] Chapin F S, Bloom A J, Field C B, Waring R H. Plant responses to multiple environmental factors. *Bioscience*, 1987, 37(1): 49-57.
- [11] Maina G G, Brown J S, Gersani M. Intra-plant versus inter-plant root competition in beans: avoidance, resource matching or tragedy of them commons. *Plant Ecology*, 2002, 160(2): 235-247.
- [12] Li C J, Peng Y F, Niu J F, Ma W, Yan H F, Jiao R X. Real maize roots in the soil and issues should be considered by study. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 225-231.
- [13] Gao Z H, Chen X Y, Luo Y P. Winter wheat root and shoot: equilibrium and growth stability under different soil and water conditions. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(3): 540-548.
- [14] Chen X Y, Liu X Y, Luo Y P. Effects of soil moisture on dynamic distribution of dry matter in winter wheat root and shoot. *Scientia Agricultura*

- Sinica, 2003, 36(12): 1502-1507.
- [15] Aerts R, Boot R G A, van der Aart P J M. The relation between above-and belowground biomass allocating patterns and competitive ability. *Oecologia*, 1991, 87(4): 551-559.
- [16] Geng H L, Wang Y H, Wang F Y, Jia B R. The dynamics of root-shoot ratio and its environmental effective factors of recovering *Leymus chinensis* steppe vegetation in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4629-4634.
- [17] Wang H Y, Peng L, Li S C, Bai B W. Growth characteristics of rock plant *Pogonatherum paniceum*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1432-1436.
- [18] Chen C Y, Hou Y H, Sun R, Zhu P, Dong Z Q, Zhao M. Effects of planting density on yield performance and density-tolerance analysis for maize hybrids. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(7): 1153-1160.
- [19] Lu L H, Tao H B, Xia L K, Zhang Y J, Zhao M, Zhao J R, Wang P. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3): 447-455.
- [20] Tokatlidis I S, Koutroubas S D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3): 103-114.
- [21] Yan Y, Liao C S, Zhang F S, Li C J. The causal relationship of the decreased shoot and root growth of maize plants under higher plant density. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 257-265.
- [22] Grace J B, Tilman D. *Perspectives on Plant Competition*. California: Academic Press, 1990.
- [23] Pugnaire F I, Luque M T. Changes in plant interactions along a gradient of environmental stress. *Oikos*, 2001, 93(1): 42-49.
- [24] Belcher J W, Keddy P A, Twolan S L. Root and shoot competition intensity along a soil depth gradient. *The Journal of Ecology*, 1995, 83(4): 673-682.
- [25] Li S K, Wang C T. Evolution and development of maize production techniques in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(6): 1941-1951.
- [26] Guo Q F, Wang Q C, Wang L M. *Chinese Maize Cultivation*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2004: 351-362, 763-776.
- [27] Li C H, Li S L, Wang Q, Hao S P, Han J F. A study on corn root growth and activities at different soil layers with special bulk density. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(8): 1706-1711.
- [28] Li P, Li Z B, Zhao Z. Study of the method for determining sampling number for root investigation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(1): 146-149.
- [29] Zou Q. *Guide to Plant Physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 62-63.
- [30] Song H X, Li S X. Effects of root growing space on its absorbing characteristics. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 899-904.
- [31] Wei L, Xiong Y C, Ma B L, Ma C, Zhang H Q, Shao Y, Li P F, Cheng Z G, Wang T C. Photosynthetic characterization and yield of summer corn (*Zea mays* L.) during grain filling stage under different planting pattern and population densities. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2524-2531.
- [32] Huante P, Rincon E, Chapin F S. Effect of changing light availability on nutrient foraging in tropical deciduous tree-seedlings. *Oikos*, 1998, 82(3): 449-458.
- [33] Li M, Li W X. Regulation of fertilizer and density on sink and source traits and yield of maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1130-1137.
- [34] Veen B W, van Noordwijk M, de Willigen P, Boone F R, Kooistra M J. Root-soil contact of maize as measured by a thin-section technique. III. Effects on shoot growth, nitrate and water uptake efficiency. *Plant and Soil*, 1992, 139: 131-138.
- [35] Jeschke W D, Hartung W. Root-shoot interactions in mineral nutrition. *Plant and Soil*, 2000, 226(1): 57-69.
- [36] Cui Y H. Study on yield and yield components in different populations of spring corn. *Journal of Hebei Agriculture University*, 1992, 15(1): 14-18.
- [37] Li H, Zhang D Y. Morphological characteristics and growth redundancy of spring wheat root system in semi-arid regions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 26-30.

参考文献:

- [1] 陈晓远, 高志红, 罗远培. 植物根冠关系. *植物生理学通讯*, 2005, 41(5): 555-562.
- [4] 冯广龙, 罗远培. 土壤水分与冬小麦根、冠功能均衡关系的模拟研究. *生态学报*, 1999, 19(1): 96-103.
- [5] 王平, 王天慧, 周道玮, 张红香. 植物地上竞争与地下竞争研究进展. *生态学报*, 2007, 27(8): 3489-3499.

- [9] 赵松岭, 李凤民, 张大勇, 段舜山. 作物生产是一个种群过程. 生态学报, 1997, 17(1): 100-104.
- [12] 李春俭, 彭云峰, 牛君仿, 马玮, 闫慧峰, 焦润兴. 土壤中的玉米根系生长及其研究应注意的问题. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 225-231.
- [13] 高志红, 陈晓远, 罗远培. 不同土壤水分条件下冬小麦根/冠平衡与生长稳定性研究. 中国农业科学, 2007, 40(3): 540-548.
- [14] 陈晓远, 刘晓英, 罗远培. 土壤水分对冬小麦根/冠干物质动态消长关系的影响. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1502-1507.
- [16] 耿浩林, 王玉辉, 王凤玉, 贾丙瑞. 恢复状态下羊草 (*Leymus chinensis*) 草原植被根冠比动态及影响因子. 生态学报, 2008, 28(10): 4629-4634.
- [17] 王海洋, 彭丽, 李绍才, 白宝伟. 岩生植物金发草生长特征研究. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1432-1436.
- [18] 陈传永, 侯玉虹, 孙锐, 朱平, 董志强, 赵明. 密植对不同玉米品种产量性能的影响及其耐密性分析. 作物学报, 2010, 36(7): 1153-1160.
- [19] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 张雅杰, 赵明, 赵久然, 王璞. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性. 作物学报, 2008, 34(3): 447-455.
- [21] 严云, 廖成松, 张福锁, 李春俭. 密植条件下玉米冠根生长抑制的因果关系. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 257-265.
- [25] 李少昆, 王崇桃. 中国玉米生产技术的演变与发展. 中国农业科学, 2009, 42(6): 1941-1951.
- [26] 郭庆法, 王庆成, 汪黎明. 中国玉米栽培学. 上海科学技术出版社, 2004: 400-405, 763-776.
- [27] 李潮海, 李胜利, 王群, 郝四平, 韩锦锋. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1706-1711.
- [28] 李鹏, 李占斌, 赵忠. 根系调查取样点数确定方法的研究. 水土保持研究, 2003, 10(1): 146-149.
- [29] 邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2000: 62-63.
- [30] 宋海星, 李生秀. 玉米生长空间对根系吸收特性的影响. 中国农业科学, 2003, 36(8): 899-904.
- [31] 卫丽, 熊友才, Ma B L, 马超, 张慧琴, 邵阳, 李朴芳, 程正国, 王同朝. 不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化. 生态学报, 2011, 31(9): 2524-2531.
- [33] 李明, 李文雄. 肥料和密度对寒地高产玉米源库性状及产量的调节作用. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1130-1137.
- [36] 崔彦宏. 春玉米不同群体产量构成因素分析. 河北农业大学学报, 1992, 15(1): 14-18.
- [37] 李话, 张大勇. 半干旱地区春小麦根系形态特征与生长冗余的初步研究. 应用生态学报, 1999, 10(1): 26-30.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《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 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 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