

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 14 期 Vol.31 No.14 **2011**

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 31 卷 第 14 期

2011 年 7 月 (半月刊)

目 次

厦门市三个产业土地利用变化的敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (3863)
黄河源区沙漠化及其景观格局的变化·····	胡光印,董治宝,逯军峰,等 (3872)
岩溶山区景观多样性变化的生态学意义对比——以贵州四个典型地区为例·····	罗光杰,李阳兵,王世杰,等 (3882)
基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析·····	徐涵秋 (3890)
北京市土地利用生态分类方法·····	唐秀美,陈百明,路庆斌,等 (3902)
长白山红松臭冷杉光谱反射随海拔的变化·····	范秀华,刘伟国,卢文敏,等 (3910)
臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型·····	汪金松,张春雨,范秀华,等 (3918)
渔山岛岩礁基质潮间带大型底栖动物优势种生态位·····	焦海峰,施慧雄,尤仲杰,等 (3928)
食物质量差异对树麻雀能量预算和消化道形态特征的影响·····	杨志宏,邵淑丽 (3937)
桂西北典型喀斯特区生态服务价值的环境响应及其空间尺度特征·····	张明阳,王克林,刘会玉,等 (3947)
隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布·····	李彩霞,孙景生,周新国,等 (3956)
不同抗病性茄子根系分泌物对黄萎菌的化感作用·····	周宝利,陈志霞,杜 亮,等 (3964)
镉在草-菇-土系统中的循环与生物富集效应·····	翁伯琦,姜照伟,王义祥,等 (3973)
鄱阳湖流域泥沙流失及吸附态氮磷输出负荷评估·····	余进祥,郑博福,刘娅菲,等 (3980)
柠条细根的分布和动态及其与土壤资源有效性的关系·····	史建伟,王孟本,陈建文,等 (3990)
土壤盐渍化对尿素与磷酸脲氮挥发的影响·····	梁 飞,田长彦 (3999)
象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素·····	杨季芳,王海丽,陈福生,等 (4007)
近地层臭氧对小麦抗氧化酶活性变化动态的影响·····	吴芳芳,郑有飞,吴荣军,等 (4019)
抑制剂和安全剂对高羊茅根中酶活性和菲代谢的影响·····	龚帅帅,韩 进,高彦征,等 (4027)
南苜蓿高效共生根瘤菌土壤的筛选·····	刘晓云,郭振国,李乔仙,等 (4034)
汉江上游金水河流域土壤常量元素迁移模式·····	何文鸣,周 杰,张昌盛,等 (4042)
基于地理和气象要素的春玉米生育期栅格化方法·····	刘 勤,严昌荣,梅旭荣,等 (4056)
日光温室切花郁金香花期与外观品质预测模型·····	李 刚,陈亚茹,戴剑锋,等 (4062)
冀西北坝上旱干区南瓜油葵间作的水分效应·····	黄 伟,张俊花,李文红,等 (4072)
专论与综述	
鸟类分子系统地理学研究进展·····	董 路,张雁云 (4082)
自然保护区空间特征和地块最优选择方法·····	王宜成 (4094)
人类活动是导致生物均质化的主要因素·····	陈国奇,强 胜 (4107)
冬虫夏草发生的影响因子·····	张古忍,余俊锋,吴光国,等 (4117)
自然湿地土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌多样性的分子检测·····	余晨兴,全 川 (4126)
研究简报	
塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价·····	贡 璐,张海峰,吕光辉,等 (4136)
高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态·····	周晓庆,吴福忠,杨万勤,等 (4144)
生物结皮粗糙特征——以古尔班通古特沙漠为例·····	王雪芹,张元明,张伟民,等 (4153)
不同海拔茶园害虫、天敌种群及其群落结构差异·····	柯胜兵,党凤花,毕守东,等 (4161)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-07



封面图说:内地多呈灌木状的沙棘,在青藏高原就表现为高大的乔木,在拉萨河以及雅鲁藏布江沿岸常常可以看到高大的沙棘林和沼泽塔头湿地相映成趣的美丽景观。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

李彩霞, 孙景生, 周新国, 邱新强, 刘祖贵, 强小嫚, 郭冬冬. 隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布. 生态学报, 2011, 31 (14): 3956-3963.

Li C X, Sun J S, Zhou X G, Qiu X Q, Liu Z G, Qiang X M, Guo D D. Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (14): 3956-3963.

隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布

李彩霞, 孙景生*, 周新国, 邱新强, 刘祖贵, 强小嫚, 郭冬冬

(中国农业科学院农田灌溉研究所 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 新乡 453003)

摘要:为揭示根系对土壤环境的适应机制,研究了隔沟交替灌溉条件下玉米根系形态性状及结构分布。以垄位和坡位的玉米根系为研究对象,利用 Minirhizotrons 法研究了根系(活/死根)的长度、直径、体积、表面积、根尖数和径级变化及其与土壤水分、土温和水分利用效率(WUE)的相关关系。结果表明,对于活根,在坡位非灌水区域复水后根系平均直径减小,而根系日均生长速率、单位面积土壤根系体积密度、根尖数和表面积均增大,并随灌水区域土壤水分的消退逐渐减小;对于死根,在坡位非灌水区域复水后根系日均死亡速率、根系体积密度、根尖数和表面积变化均减小,其中根系死亡速率和死根直径随土壤水分的消退逐渐降低,而死根体积密度、根尖数和表面积分布随土壤水分降低呈增大趋势;在垄位,根系形态分布趋势与坡位一致,除根系直径与与坡位比较接近外,其他根系形态值均小于坡位。将根系分成 4 个径级区间分析根系的形态特征,结果表明在根系长度和体积密度分布中以 $(2.5 - 4.5) \times 10^{-1}$ mm 径级的根系所占比例最大,在根尖数和根系表面积分布中以 $(0.0 - 2.5) \times 10^{-1}$ mm 径级的根系为主。通过显著性相关分析,死根直径、体积密度、活根表面积等根系形态与土壤含水率、土壤温度和 WUE 间均存在显著或极显著的正相关关系,部分根系形态指标(如根系的生长速率、活根体积密度)只与坡位土壤含水量、土壤温度具有明显的相关性,表明隔沟交替灌溉对坡位根系形态的调控作用比垄位显著。

关键词:隔沟交替灌溉;根系形态; Minirhizotrons;径级;土壤含水量

Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation

LI Caixia, SUN Jingsheng*, ZHOU Xinguo, QIU Xinqiang, LIU Zugui, QIANG Xiaoman, GUO Dongdong

Ministry of Agriculture, & Farmland Irrigation Research Institute, Key Laboratory for Crop Water Requirement and Regulation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China

Abstract: Alternate furrow irrigation is a biological water-saving technique and extensively applied to agricultural production in the arid and semi-arid region. There are the irrigated and non-irrigated root-zones alternately under alternate furrow irrigation. Because crop roots firstly sensed the variation of soil water and had a process of adaptation, their morphology characteristics and structure distribution under alternate furrow irrigation were studied to reveal the adaptive mechanism of roots system in the soil environment. Taking the roots both at ridge and slope as the research object, the minirhizotrons was used to investigate the changes of root length (living roots/dead roots), diameter, volume density, surface area, root tip number and diameter class as well as the correlations between each parameter of roots and soil moisture, soil temperature, water use efficiency (WUE). In the period of 52 – 78 day after the sowing of maize, the experiment was not influenced by rainfall (total precipitation is 5 mm in two times) and this period was chosen for the analysis of root morphology characteristics and structure distribution. Results showed maize roots were mainly distributed at ridge at the early growing stage, and its root production rate was greater than that at slope. Meanwhile, root metabolism was rapid with the higher root mortality rate. Alternate furrow irrigation had greater effect on the morphology indexes of maize

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2007BAD88B02);中国农业科学院科技经费项目(201015);商丘野外生态台站开放基金项目;国家自然科学基金项目(51009139)

收稿日期:2010-04-30; 修订日期:2010-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jshsun623@yahoo.com.cn

roots at slope than at ridge, and after the re-watering in the non-irrigated root-zone at slope, the average root diameter was decreased, while the daily average root production rate, the volume density per unit soil area, the root tip number and surface area of the living roots were increased, and these indexes were gradually reduced with the decrease of soil moisture in the irrigated root-zone. At ridge, the average root diameter of the living roots is similar to that at slope, and the change trend of daily average root production rate, the volume density per unit soil area, the root tip number and surface area of the living roots is also similar to those at slope, but the values of these indexes were lower than those at slope. After the re-watering in non-irrigated root-zone at slope, the root mortality rate, root diameter, volume density, root tip number and surface area of dead roots were decreased, and the root mortality rate and diameter were gradually reduced with the decrease of soil moisture, while the root volume density, root tip number and surface area were gradually increased with the decrease of soil moisture. Root system was divided into four diameter classes based on the root morphology, and root morphological characteristics of different diameter classes were analyzed. In the distribution of root length and volume density, the roots with diameter $(2.5 - 4.5) \times 10^{-1} \text{ mm}$ accounted for the greatest proportion, while in the distribution of root tip number and surface area, the roots with diameter $(0 - 2.5) \times 10^{-1} \text{ mm}$ accounted for greater proportion. Correlation analysis and significant test showed that the living and dead root tips and root mortality rate were significantly correlated with soil moisture, soil temperature and *WUE*. There are significant positive correlations between some morphological indexes of roots (root production rate, volume density of living roots, et al.) and soil moisture and soil temperature only at slope. Results indicated that alternate furrow irrigation regulated root morphology more significantly at slope than at ridge.

Key Words: alternate furrow irrigation; root morphology; minirhizotrons; diameter class; soil moisture

根系作为作物地上与地下部分物质及信息交换的重要系统,对作物的生长发育和产量形成具有重要的影响。在抗旱节水中,由于根系最先感知土壤水分变化,而且能够调节叶片气孔开度、改善水分-产量关系,使得根系形态及其与环境的关系研究成为热点,田间节水抗旱研究的重点也从地上部分转移到根系上来,特别是针对抗旱品种或干旱半干旱、沙漠地区的植物根系形态研究尤为重视,研究方法不断改进^[1-4]。研究认为,水分胁迫时土壤上层的水分亏缺严重,根系主动吸收下层土壤水,增加了根系长度,减小了根系直径,进而减小了根系吸水阻力,与充分供水时存在显著的差异,为地上部的能量供应提供了有利条件,对作物产量和水分利用效率的提高有很大贡献^[3,5]。然而,土壤水分亏缺是如何影响作物根系的水分吸收与运输,作物又是通过怎样的根系形态结构来适应变化的土壤水分环境,这一问题是当前抗旱节水研究的重点和难点。隔沟交替灌溉研究至今仍沿用静态干湿对比的试验方法,未充分重视旱后复水的环境条件下根系生长和形态结构的恢复能力^[6-7],尤其是关于干湿交替环境对根系形态结构的系统研究很少,而根系在适应特殊环境的过程中形成了自身的适应机制,开展相关研究对生物节水技术的发展具有重要意义。虽然根系研究已成为提高作物生产力、挖掘作物节水潜力的基础性前沿课题,但了解根系的形态和结构分布并不容易,对应的测量技术非常关键。Minirhizotrons 技术是近年来较受关注的根系研究方法,它在原位、非破坏、长期连续、定点地观测根系动态方面优于其他方法^[3],并大量应用于草地、农作物、果园、森林和沙漠植物等^[8-10],对根系发展动态、生产力估算及根系吸水模型的建立研究很有帮助。因此,本文采用 Minirhizotrons 方法研究隔沟交替灌溉条件下玉米根系的形态分布动态及其与环境的关系,揭示隔沟交替灌溉对玉米根系形态的调控效应。

1 试验方法

1.1 试验区概况

本试验研究于 2009 年 4 至 8 月在河南新乡中国农业科学院农田灌溉研究所(N 35°19', E 113°53', 海拔 73.2 m)的作物需水量试验场进行。试验场多年平均气温 14.1℃,无霜期 210 d,日照时数 2398.8 h。试验期间平均气温为 24℃,平均相对湿度 69.7%,平均气压 1002.8 mb,平均风速 0.615 m/s。土壤为砂壤土,田间持水量 24.0% (质量含水量),凋萎含水量 8% (质量含水量)。土壤理化性质:土壤容重 1.38 g/cm³,有机质

10.3 g/kg,全氮 0.072 g/kg,全磷 0.018 g/kg,全钾 0.100 g/kg。

试验采用隔沟交替灌溉方式,沟灌垄播,垄高 20cm,种植行距为 60cm,株距 40cm。玉米品种为浚单 18,2009 年 4 月 21 日播种,8 月 14 日成熟。播种期施复合肥($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}=15\text{-}15\text{-}15$)675 kg/hm²,拔节期追施尿素(含 N46%)(300 kg/hm²)。在 5 月 26 日—7 月 10 日根系观测期间,降雨 5 次,分别为 5 月 28 日(2.6mm)、6 月 6 日(23.4mm)、6 月 8 日(2.0mm)、7 月 6 日(3.0mm)和 7 月 8 日(21.2mm);灌水 7 次,总灌水量为 162.0 mm。在 6 月 8 日—7 月 8 日期间,几乎不受降雨的影响(两次共降雨 5mm),因此作为根系形态分析的主要参考时段。

1.2 试验观测

1.2.1 根系生长情况观测

用 ET-100 根系监测系统观测根系生长与死亡参数。ET-100 由 3 部分组成:第一部分是 Minirhizotrons 管(透明的树脂玻璃管);上部 30 cm 露出地面涂成白色,管下端密封,上端用橡皮塞塞住避免水分和灰尘进入管内。2008 年 10 月安装 Minirhizotrons 管,分别安装在垄位和沟/垄之间的坡位,每个点位安装两根管,安装角度与地面成 45°,安装后待周围环境稳定(6—12 个月)开始监测。第二部分是微型摄像头,扫描图片尺寸为 1.05 cm×1.45 cm,扫描头连接 200 cm 的滑竿,滑竿每次滑动距离为 1 cm。观测时将扫描头用 USB 线连接到计算机,用图像扫描软件进行操作;第三部分 WinRHIZOTron 图像分析软件。在 2008 年玉米收获后至 2009 年播种之前,试验区休闲,并及时清除地面杂草,以免杂草根系与玉米根系混淆。在研究阶段共采集图像 9 次:5 月 26 日、6 月 2 日、6 月 12 日、6 月 16 日、6 月 18 日、6 月 24 日、6 月 28 日、7 月 3 日、7 月 10 日。根据各参数测定结果,对每个位置全部图片的根系信息(根系长度、根尖数、体积、直径和表面积)进行统计累加或求平均。

1.2.2 环境因素观测

土壤含水量采用土钻取土烘干法测定,取土深度为 1m,每钻取土 10 cm;土壤温度采用直管和曲管地温计测定,深度为 5—100 cm;气象参数如气温、相对湿度、风速、降雨量等从试验场内的自动气象站获取。

1.2.3 叶片水分利用效率(WUE)的计算

$$WUE = \frac{P_r}{T_r} \quad (1)$$

式中,WUE 为叶片水分利用效率 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$; P_r 为光合速率 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; T_r 为蒸腾速率 $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.2.4 数据处理

利用 SPSS13.0 进行方差分析和显著性检验,用 Excel 软件作图。

2 结果分析

2.1 根系形态变化

图 2 给出了活/死根的根系长度、直径、体积、根尖数和表面积在观测时段的发展动态。图中灌水后的湿润区域和非灌水区域,两个区域交替出现,选择同一个垄位和坡位的两组数据进行分析。

研究选取受雨水影响小的 5 月 26 日至 7 月 10 日的时段数据(图 2)。在玉米生育前期(56d 内),属于快速生长阶段,除垄位的根尖数外,其他根系形态指标均呈增大趋势。在播后 58d,活根的根系生长速率(DAP)、体积密度、单位面积土壤的根尖数和表面积均达到最大峰值,分别为 $7.21 \text{ mm}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $4.09 \text{ mm}^3/$

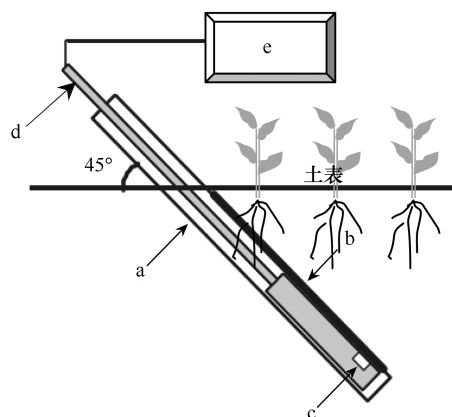


图 1 ET-100 根系观测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ET-100 root observation system

(a) 树脂玻璃管(长 1.8 m, 外径 5.2 cm); (b) 观测面; (c) 微型照相机; (d) 滑动滑竿; (e) 计算机

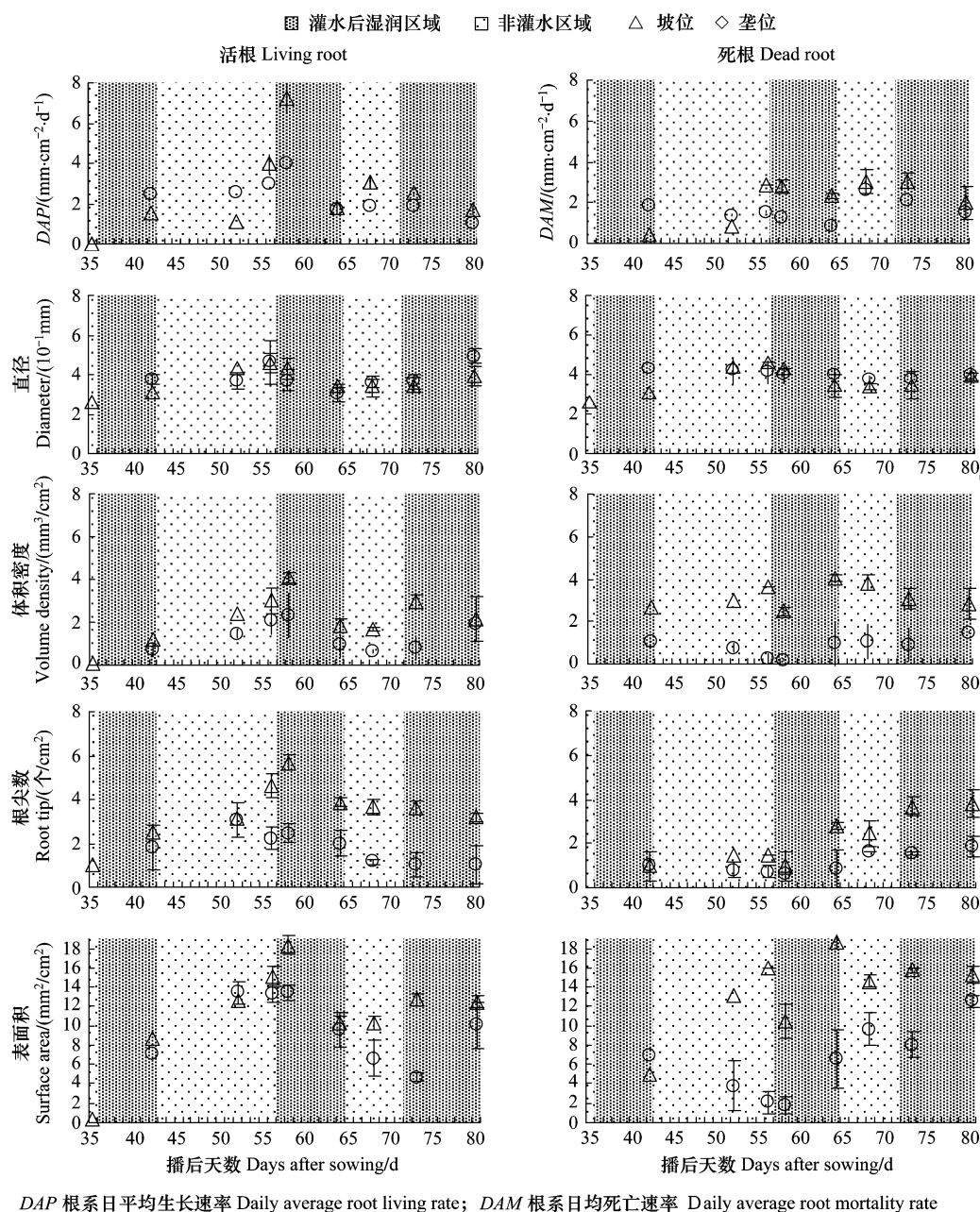


图2 隔沟交替灌溉条件下不同点位处的根系形态变化

Fig. 2 Change of maize root morphology at different locations under alternate furrow irrigation

cm^2 、5.68 个/ cm^2 和 18.32 mm^2/cm^2 ;非灌水区域复水后 DAP、活根直径、体积密度、根尖数和表面积均随着土壤水分的逐渐消退逐渐减小,直到下次复水再次回升,垄位和坡位的根系形态分布趋势比较一致,两个点位处的活根直径比较接近,除根系直径外的其他根系形态值均为坡位高。

对于死根,在坡位非灌水区域复水后 DAM、根系直径、体积密度、根尖数和表面积均减小,DAM 和根系直径随土壤水分的降低逐渐减小,而死根体积密度、根尖数和表面积呈逐渐增大趋势。垄位和坡位的 DAM 值在灌水区域湿润期间差异较大,而在非灌水区域干燥时段值较接近。坡位的死根量大于垄位。

2.2 根系形态指标与土壤水分、温度及水分利用效率(WUE)的相关性

图3给出了观测期间土壤含水量、土温和 WUE 随播后天数的观测结果,非灌水区域复水后使土壤含水量增大,同时降低了土壤温度,并且土壤温度随土壤的逐渐干燥而升高。

表1结果表明,土壤含水量和土温对根系形态发育均有不同程度的影响。在垄位和坡位两个点位处,土

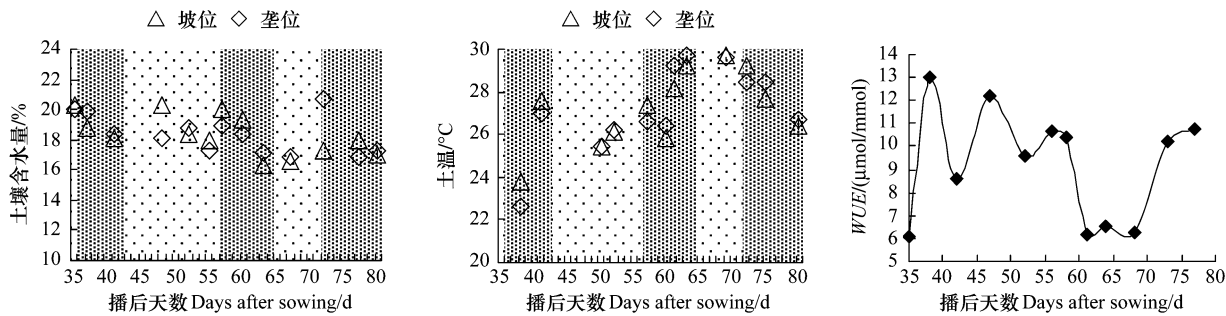


图3 土壤含水量、土温和叶片 WUE 随播后天数的变化
Fig. 3 Change of soil water, soil temperature and leaf WUE with the days after sowing

壤水分、土温均与 DAM、活/死根的根尖数间具有显著或极显著的正相关,根系生长速率和活根体积密度均与坡位的土壤环境存在显著的相关性。各指标受土壤水分影响的大小顺序为:活根根尖数>DAP>DAM>活根表面积>死根根尖数>活根体积密度(坡位);受土壤温度影响的大小顺序为:死根根尖数>DAM>DAP>活根根尖数>活根体积密度(坡位)。在坡位,共有根系生长速率、活/死根根尖数以及活根直径、体积密度和表面积 7 个因素与 WUE 存在显著或极显著的正相关关系,在垄位,有死根根尖数和表面积 2 个因素与 WUE 具有显著的正相关。

表 1 根系形态指标与土壤含水量、土壤温度和叶片水分利用效率的相关性分析

Table 1 Correlation among indices of root morphology and soil water content, soil temperature and leaf water use efficiency (WUE)		DAP、DAM		直径 Diameter		体积密度 Volume density		根尖数 Root tip		表面积 Surface area	
点位 Location	因素 Factor	活根 Living root	死根 Dead root	活根 Living root	死根 Dead root	活根 Living root	死根 Dead root	活根 Living root	死根 Dead root	活根 Living root	死根 Dead root
坡 Slope	土壤含水量	0.67 *	0.64 *	0.19	0.20	0.61 *	0.03	0.73 **	0.62 *	0.63 *	0.10
垄 Ridge	土壤含水量	0.56	0.61 *	0.01	0.10	0.32	0.19	0.75 **	0.76 **	0.15	0.05
坡 Slope	土温	0.64 *	0.65 *	0.08	0.49	0.58 *	0.50	0.61 *	0.67 *	0.45	0.55
垄 Ridge	土温	0.55	0.64 *	0.52	0.01	0.52	0.76 **	0.65 *	0.87 **	0.48	0.37
坡 Slope	WUE	0.69 *	0.58	0.72 *	0.35	0.66 *	0.56	0.68 *	0.63 **	0.75 **	0.62 *
垄 Ridge	WUE	0.37	0.29	0.68	0.07	0.39	0.47	0.50	0.61 *	0.15	0.66 *

* $P<0.05$ ** $P<0.01$

2.3 不同径级根系的根长密度、体积密度和单位面积土壤的根尖数变化

根据根系径级和数据集中程度,将根系分成 4 个径级区间(根系直径($RD(\times 10^{-1} \text{ mm})$)): $0.0 < RD \leq 1.5$; $1.5 < RD \leq 2.5$; $2.5 < RD \leq 4.5$; $RD > 4.5$) 分析(图 4—图 5)。

试验结果表明,灌水与非灌水区域交替地影响根系径级和根长密度分布(图 4)。在坡位, $2.5 < RD \leq 4.5$ 区间根系的根长密度最大,前期(52d 之前)约占总根长密度的 50%,数值低于 3 mm/cm^2 ;后期随着根系的生长和根区湿润环境的变化,根系直径迅速增大,达到峰值 8.87 mm/cm^2 (64d), 占总根长的比例增大到 70%—81% (56d 以后); $1.5 < RD \leq 2.5$ 径级的根系占 20% 左右,64d 内根系密度小于 3 mm/cm^2 , 64d 以后根系密度小于 1 mm/cm^2 。在垄位,同样是 $2.5 < RD \leq 4.5$ 径级区间根系的根长密度占最大比例(约 90%—75%);与坡位不同的是根长密度的最大值(10.98 mm/cm^2)发生在观测期开始(42d),以后逐渐减小;其他径级的根长密度基本在 1 mm/cm^2 以内。两个点位相比,区域干湿交替对坡位的根长密度有明显的调控作用。

不同径级根系的体积密度分布与根长密度分布趋势类似, $2.5 < RD \leq 4.5$ 径级的根系所占体积密度最大,在垄位,根系体积密度随播种天数逐渐降低,最大值为 $3.71 \text{ mm}^3/\text{cm}^2$ (42d), 其他径级的根系体积密度小于 $0.5 \text{ mm}^3/\text{cm}^2$ (图 4)。

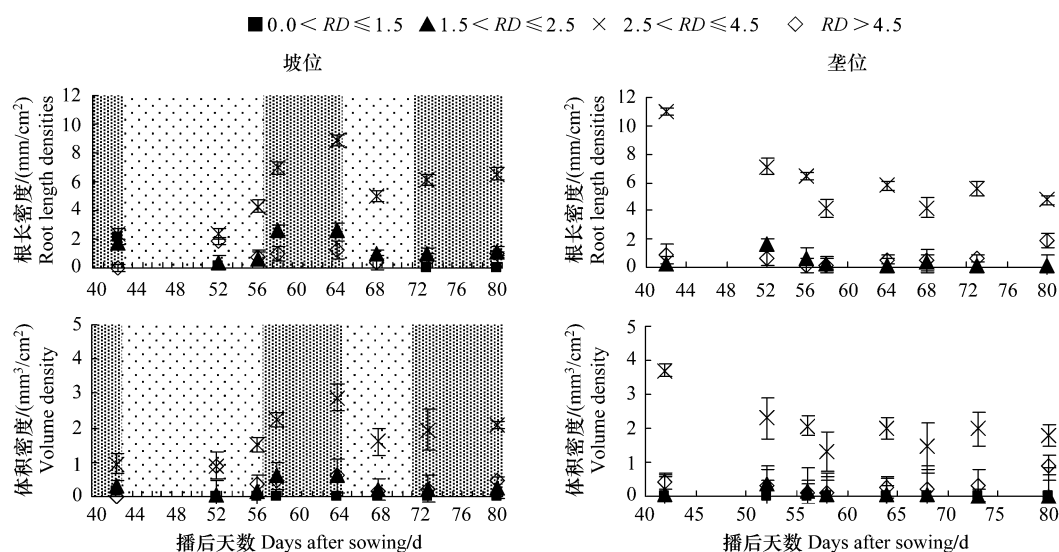


图4 不同径级根系的根长密度和体积密度变化

Fig. 4 Variation of root length and volume densities for different root diameters

根尖数和根系表面积分布不同于根长和根系体积密度分布(图5)。在坡位, $1.5 < RD \leq 2.5$ 径级的根尖数最多, 平均 1.24 个/ cm^2 , 占总根尖数的 $50\%—70\%$; $0.0 < RD \leq 1.5$ 径级的根系次之, 平均为 0.83 个/ cm^2 , 占 $25\%—50\%$; 非灌水区复水后有利于细根 ($RD \leq 2.5$) 根尖数的增加; $RD > 4.5$ 和 $2.5 < RD \leq 4.5$ 径级的根尖数接近于零; 通过根系长度密度、体积密度和根尖数的分析表明, 虽然细根的数量多, 但所占的体积和长度却很小。在垄位, $1.5 < RD \leq 2.5$ 径级根系的根尖数分布有一个突变峰值点 (58d), 为 5.73 个/ cm^2 , 除此之外其他径级根系的根尖数基本小于 1 个/ cm^2 , 受灌溉方式影响小。

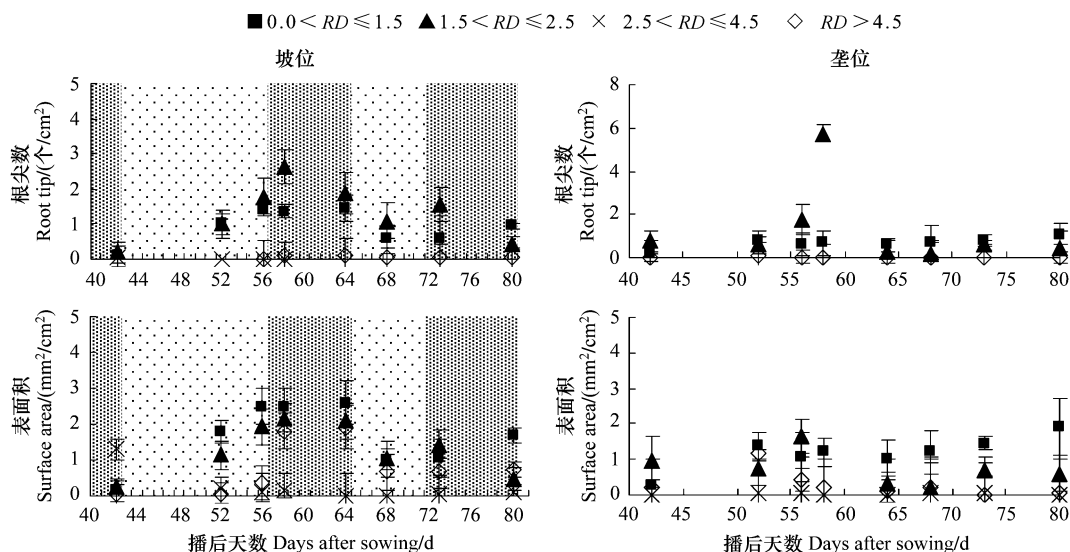


图5 不同径级根系的单位面积土壤的根尖数和根系表面积变化

Fig. 5 Variation of root tip number and root surface area per area for different root diameters

按照径级区间从小到大的顺序, 观测期间根系表面积平均值分别为 $1.44, 1.23, 0.35$ 和 0.7 (mm^2/cm^2) (坡位) (图5)。在垄位, $1.5 < RD \leq 2.5$ 径级的根系表面积存在突变峰值 (58d, $6.3 \text{ mm}^2/\text{cm}^2$), 此径级的平均根系表面积为 $1.18 \text{ mm}^2/\text{cm}^2$, $0.0 < RD \leq 1.0$ 区间的平均值为 $1.44 \text{ mm}^2/\text{cm}^2$ 。

3 讨论

不同生境下植物的根系产生一系列的适应性机制,表现在根系上的明显特征是其生长和代谢呈现出“补偿效应”^[11]。这种补偿效应的表现形式主要有根系长度、直径、数量和根长密度等方面,这些都是根系对干旱环境适应的结果,也是作物抵御干旱、维持一定产量的生理学基础^[12-13]。在干湿交替的土壤环境下,根系的代谢功能增强,诱发出大量的新生侧根或根毛,根密度明显提高^[14],本研究在非灌水区域复水后,根系生长速率明显增强,数值上表现为坡位大于垄位,表明交替干燥与湿润的土壤水分环境能够促进根系的补偿生长。从根系的直径、根尖数和体积密度上看,非灌水区域复水后坡位的根系数量和体积密度明显增多,直径相对减小,而根系形态分布在常规沟灌(各区域均匀灌水,无干湿区域交替)中没有表现出明显的区域差异(限于篇幅,没有列出分析结果),表明从作物生长时间和根层空间上的水分调控能够促进侧向根系的生长活跃性。

水分利用效率(*WUE*)是评价作物生长的综合性生物学指标,在不同环境条件下具有稳定的遗传性状^[15],通过根系的形态特征研究不仅能够实现农田水分的高效管理,还为培育高水分利用效率的作物品种提供重要的参考。玉米根系形态对 *WUE* 的调控研究表明,对 *WUE* 贡献最大的是根系长度,其次是根系表面积^[2]。实际上根系形态诸指标是相互联系、相互影响的,本研究结果表明,根系体积密度、根尖数、根直径和根系生长速率与 *WUE* 的相关系数均在 0.6 以上,土壤含水量和土壤温度均与根系形态各指标表现出明显的相关性,表明在适当的土壤环境下可根据根系的形态特征判断作物对水分的利用状况。

在直径 ≤ 2 mm 或 ≤ 1 mm 的根系中,其细根组成变异较大^[9,16]。本文通过根系径级分析表明,(2.5—4.5) $\times 10^{-1}$ mm 径级根系在根长和体积密度分布中所占比例较大,但根数并不多,(0.0—2.5) $\times 10^{-1}$ mm 径级根系的根尖数最多。两个点位中坡位的细根数量更大,特别是在非灌水区域湿润后,根尖数显著增加,新生根系的生长,对单位面积土壤的根系长度、体积密度和表面积的增大有一定贡献,与以往研究较为一致^[14]。从根系直径大,吸水困难的角度看^[2],坡位在非灌水区域复水后产生大量的小径级根系,根系活性表面积的增加促进了根系对水分的吸收,对植株体与外界的水分交换和生物量形成起到很好的调控作用。另外,在生态系统的碳分配和养分循环过程中,细根巨大的吸收表面积,极强的生理活性,能够有效地吸收和固定养分,为作物地上部分的干物质生产提供强有力的动力。

使用 Minirhizotrons 研究根系的生长与死亡动态,在国际上早有报道,主要对落叶松、水曲柳、杉木、草本等植物的细根周转、死亡和生长进行了研究^[3,17],国内在树木和草本植物的根系生长、寿命周转等方面也进行了一些研究,该方法可通过图像辨别活根和死根,但不能直接获得根系生物量。目前,有研究者用 Minirhizotrons 法所得的数据来换算根系生物量,并认为与地面 45°埋设的 Minirhizotrons 管能够较好地估算 30 cm 土层以下的根系分布^[1],如果存在偏差,最可能的原因是管埋设时间不够长或观测时受扰动引起的,有关根系生物量获取,有必要对 Minirhizotrons 与原位取根法进一步对比研究。

4 结论

隔沟交替灌溉在时空上调控玉米根系的生长与死亡,根系直径、根系体积密度、单位面积土壤的根尖数和根系表面积在干、湿交替的土壤环境中形成了自身的适应性,根系形态产生“补偿效应”。非灌水区域复水后根系的生长活性和代谢明显增强,与垄位相比,坡位根系的生长与死亡动态对灌溉方式的响应更大。

在坡位,*DAP*、*DAM*、根尖数和活根体积密度均与土壤含水量和土温存在明显的相关性;在垄位,*DAM* 和活/死根尖数与土壤含水量、土温存在显著相关性。坡位的根系形态对 *WUE* 影响的大小顺序为:活根表面积、活根直径、*DAP*、活根根尖数、活根体积密度、死根根尖数和死根表面积;在垄位,死根表面积和死根根尖数与 *WUE* 有显著相关性。

隔沟交替灌溉促进了小径级根系的发育,非灌水区域复水后细根($\leq 2.5 \times 10^{-1}$ mm)的根尖数明显增加,相应地增大了根系吸收表面积,为作物地上部的水分和养分输送提供了有利条件。

致谢: 本文得到广西大学农学院李伏生老师的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Jose S, Gillespie A R, Seifert J R, Pope P E. Comparison of minirhizotron and soil core methods for quantifying root biomass in a temperate alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 2001, 52(2): 161-168.
- [2] Mu Z X, Zhang S Q, Hao W F, Liang A H, Liang Z S. The effect of root morphological traits and spatial distribution on WUE in maize. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2895-2900.
- [3] Liao R W, Liu J M. Progresses in methods for observing crop root pattern system. *Meteorological Science and Technology*, 2008, 36(4): 429-435.
- [4] Zhang Z S, Fan H W, Zhao J L, Chen Y W, Tan H J. Root distribution and dynamics of re-vegetated communities in desert area. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(4): 637-643.
- [5] E Y J, Dai J Y, Gu W L. Studies on the relationship between root growth and yield in maize (*Zea mays* L.) I. Relationships between the growth and absorption ability of the roots and the growth and development of the above-ground parts of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1988, 14(2): 149-154.
- [6] Shan L. Plant drought resistance and semi-dryland farming. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(1): 1-5.
- [7] Shan L, Deng X P, Su P, Zhang S Q, Huang Z B, Zhang Z B. Exploitation of crop drought resistance and water-saving potentials——adaptability of the crops to the low and variable water conditions. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2000, 2(2): 66-70.
- [8] Crocker T L, Hendrick R L, Ruess R W, Pregitzer K S, Burton A J, Allen M F, Shan J P, Morris L A. Substituting root numbers for length: improving the use of minirhizotrons to study fine root dynamics. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(2): 127-135.
- [9] Yuan Y D, Yang Y S, Chen G S, Yang Z J, Lin R Q, Ling H. Fine root longevity of a *Cunninghamia lanceolata* plantation estimated by minirhizotrons. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2009, 4(2): 47-52.
- [10] Zhang X Q, Wu K H, Murach D. A review of methods for fine-root production and turnover of trees. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 875-883.
- [11] Eapen D, Barroso M L, Ponce G, Campos M E, Cassab G I. Hydrotropism: root growth responses to water. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(1): 44-50.
- [12] Liang B M, Sharp R E, Baskin T I. Regulation of growth anisotropy in well-watered and water-stressed maize roots I. Spatial distribution of longitudinal, radial, and tangential expansion rates. *Plant Physiology*, 1997, 115(1): 101-111.
- [13] Liang A H, Ma F Y, Liang Z S, Mu Z X. Studies on the physiological mechanism of functional compensation effect in maize root system induced by re-watering after draught stress. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2008, 36(4): 58-64.
- [14] Liang Z S, Kang S Z, Shi P Z, Pan Y H, He L J. Effect of alternate furrow irrigation on maize production, root density and water-saving benefit. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(6): 26-32.
- [15] Turner N C. Water use efficiency of crop plants: potential for improvement//Buxton D R, Shibles R, Forsberg R A, Blad B L, Asay K H, Paulsen G M, Wilson R F, eds. *International Crop Science I*. Madison: Crop Science Society of America, 1993: 75-82.
- [16] Pregitzer K S, DeForest J L, Burton A J, Allen M F, Ruess R W, Hendrick R L. Fine root architecture of nine North American trees. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.
- [17] Price J S, Hendrick R L. Fine root length production, mortality and standing root crop dynamics in an intensively managed sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) coppice. *Plant and Soil*, 1998, 205(2): 193-201.

参考文献:

- [2] 慕自新, 张岁岐, 郝文芳, 梁爱华, 梁宗锁. 玉米根系形态性状和空间分布对水分利用效率的调控. *生态学报*, 2005, 25(11): 2895-2900.
- [3] 廖荣伟, 刘晶淼. 作物根系形态观测方法研究进展讨论. *气象科技*, 2008, 36(4): 429-435.
- [4] 张志山, 樊恒文, 赵金龙, 陈应武, 谭会娟. 沙漠人工植物群落的根系分布及动态. *中国沙漠*, 2006, 26(4): 637-643.
- [5] 鄂玉江, 戴俊英, 顾慰连. 玉米根系的生长规律及其与产量关系的研究 I. 玉米根系生长和吸收能力与地上部分的关系. *作物学报*, 1988, 14(2): 149-154.
- [6] 山仑. 植物抗旱生理研究与发展旱地农业. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(1): 1-5.
- [7] 山仑, 邓西平, 苏佩, 张岁岐, 黄占斌, 张正斌. 挖掘作物抗旱节水潜力——作物对多变低水环境的适应与调节. *中国农业科技导报*, 2000, 2(2): 66-70.
- [9] 袁一丁, 杨玉盛, 陈光水, 杨智杰, 林如强, 凌华. 杉木人工林细根寿命研究. *亚热带资源与环境学报*, 2009, 4(2): 47-52.
- [10] 张小全, 吴可红, Murach D. 树木细根生产与周转研究方法评述. *生态学报*, 2000, 20(5): 875-883.
- [13] 梁爱华, 马富裕, 梁宗锁, 慕自新. 旱后复水激发玉米根系功能补偿效应的生理机制研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(4): 58-64.
- [14] 梁宗锁, 康绍忠, 石培泽, 潘英华, 何立绩. 隔沟交替灌溉对玉米根系分布和产量的影响及其节水效益. *中国农业科学*, 2000, 33(6): 26-32.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 14 July, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The sensitivity of Xiamen's three industrial sectors to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (3863)
Desertification and change of landscape pattern in the Source Region of Yellow River	 HU Guangyin, DONG Zhibao, LU Junfeng, et al (3872)
Comparison of ecological significance of landscape diversity changes in karst mountains: a case study of 4 typical karst area in Guizhou Province	 LUO Guangjie, LI Yangbing, WANG Shijie, et al (3882)
Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors	 XU Hanqiu (3890)
Primary exploration on the ecological land use classification in Beijing	TANG Xiumei, CHEN Baiming, LU Qingbin, et al (3902)
Changes of spectral reflectance of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Abies nephrolepis</i> along altitudinal gradients in Changbai Mountain	 FAN Xiuhua, LIU Weiguo, LU Wenmin, et al (3910)
Biomass allocation patterns and allometric models of <i>Abies nephrolepis</i> Maxim	 WANG Jinsong, ZHANG Chunyu, FAN Xiuhua, et al (3918)
Niche analysis of dominant species of macrobenthic community at a tidal flat of Yushan Island	 JIAO Haifeng, SHI Huixiong, YOU Zhongjie, et al (3928)
The influence of different food qualities on the energy budget and digestive tract morphology of Tree Sparrows <i>passer montanus</i>	 YANG Zhihong, SHAO Shuli (3937)
The response of ecosystem service values to ambient environment and its spatial scales in typical karst areas of northwest Guangxi, China	 ZHANG Mingyang, WANG Kelin, LIU Huiyu, et al (3947)
Root morphology characteristics under alternate furrow irrigation	LI Caixia, SUN Jingsheng, ZHOU Xinguo, et al (3956)
Allelopathy of the root exudates from different resistant eggplants to verticillium wilt (<i>Verticillium dahliae</i> Kleb.)	 ZHOU Baoli, CHEN Zhixia, DU Liang, et al (3964)
Biological cycle and accumulation of lanthanum in the forage-mushroom-soil system	 WENG Boqi, JIANG Zhaowei, WANG Yixiang, et al (3973)
Evaluation of soil loss and transportation load of adsorption N and P in Poyang Lake watershed	 YU Jinxiang, ZHENG Bofu, LIU Yafei, et al (3980)
Effects of soil resource availabilities on vertical distribution and dynamics of fine roots in a <i>Caragana korshinskii</i> plantation	 SHI Jianwei, WANG Mengben, CHEN Jianwen, et al (3990)
Effects of soil salinization on ammonia volatilization characteristics of urea and urea phosphate	 LIANG Fei, TIAN Changyan (3999)
Distribution of marine bacteria and their environmental factors in Xiangshan Bay	 YANG Jifang, WANG Haili, CHEN Fusheng, et al (4007)
Concentration of O ₃ at the atmospheric surface affects the changes characters of antioxidant enzyme activities in <i>Triticum aestivum</i>	 WU Fangfang, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al (4019)
Effects of inhibitor and safener on enzyme activity and phenanthrene metabolism in root of tall fescue	 GONG Shuaishuai, HAN Jin, GAO Yanzheng, et al (4027)
Screening of highly-effective rhizobial strains on Alfalfa (<i>Medicago polymorpha</i>) in soil	 LIU Xiaoyun, GUO Zhenguo, LI Qiaoxian, et al (4034)
Geochemical evolution processes of soil major elements in the forest-dominated Jinshui River Basin, the upper Hanjiang River	 HE Wenming, ZHOU Jie, ZHANG Changsheng, et al (4042)
Integrating geographic features and weather data for methodology of rasterizing spring maize growth stages	 LIU Qin, YAN Changrong, MEI Xurong, et al (4056)
A model for predicting flowering date and external quality of cut tulip in solar greenhouse	 LI Gang, CHEN Yaru, DAI Jianfeng, et al (4062)
Moisture effect analysis of pumpkin and oil sunflower intercropping in semi-arid area of northwest Hebei Province	 HUANG Wei, ZHANG Junhua, LI Wenhong, et al (4072)
Review and Monograph	
Theoretical backgrounds and recent advances in avian molecular phylogeography	DONG Lu, ZHANG Yanyun (4082)
A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods	WANG Yicheng (4094)
Human activities are the principle cause of biotic homogenization	CHEN Guoqi, QIANG Sheng (4107)
Factors influencing the occurrence of <i>Ophiocordyceps sinensis</i>	ZHANG Guren, YU Junfeng, WU Guangguo, et al (4117)
Molecular detection of diversity of methanogens and methanotrophs in natural wetland soil	SHE Chenxing, TONG Chuan (4126)
Scientific Note	
Soil quality assessment of continuous cropping cotton fields for different years in a typical oasis in the upper reaches of the Tarim River	GONG Lu, ZHANG Haifeng, LÜ Guanghui, et al (4136)
Dynamics of microbial biomass during litter decomposition in the alpine forest	 ZHOU Xiaoqing, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (4144)
The aerodynamic roughness length of biological soil crusts: a case study of Gurbantungut Desert	 WANG Xueqin, ZHANG Yuanming, ZHANG Weimin, et al (4153)
Differences among population quantities and community structures of pests and their natural enemies in tea gardens of different altitudes	KE Shengbing, DANG Fenghua, BI Shoudong, et al (4161)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 14 期 (2011 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 14 2011

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:100717	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