ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

# Acta Ecologica Sinica



中国生态学学会 主办 中国科学院生态环境研究中心 *科 译 g 版 社* 出版



## 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 31 卷 第 11 期 2011 年 6 月 (半月刊)

#### 次

E

巢湖蓝藻水华形成原因探索及"优势种光合假说" ……………………………… 贾晓会,施定基,史绵红,等 (2968) 我国甜菜夜蛾间歇性暴发的非均衡性循环波动……………………………………………… 文礼章,张友军,朱 亮,等(2978) 庞泉沟自然保护区华北落叶松林的自组织特征映射网络分类与排序………………………… 上海大莲湖湖滨带湿地的生态修复……………………………………………………… 吴 迪,岳 峰,罗祖奎,等(2999) 芦芽山典型植被土壤有机碳剖面分布特征及碳储量…………… 武小钢,郭晋平,杨秀云,等 (3009) 中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 ………………… 重金属 Cd 胁迫对红树蚬的抗氧化酶、消化酶活性和 MDA 含量的影响 ……………………………… 海南霸王岭天然次生林边缘效应下木质藤本与树木的关系………… 乌玉娜,陶建平,奚为民,等 (3054) 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺………… 杨 磊,卫 伟,莫保儒,等 (3060) 季节性干旱对中亚热带人工林显热和潜热通量日变化的影响………… 贺有为,王秋兵,温学发,等(3069) 新疆古尔班通古特沙漠南缘多枝柽柳光合作用及水分利用的生态适应性 … 王珊珊,陈 曦,王 权,等 (3082) 利用数字图像估测棉花叶面积指数………………………………………………………… 王方永,王克如,李少昆,等(3090) 野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应………………… 薛忠财,高辉远,柳 洁 (3101) 水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响 …………………… 张 均,贺德先,段增强(3110) 应用物种指示值法解析昆嵛山植物群落类型和植物多样性…………… 孙志强,张星耀,朱彦鹏,等(3120) 不同生态区烟草的叶面腺毛基因表达……………………………… 崔 红,冀 浩,杨惠绢,等(3143) B型烟粉虱对23种寄主植物适应度的评估和聚类分析 ……………… 安新城,郭 强,胡琼波 (3150) 杀虫剂啶虫脒和毒死蜱对捕食蜘蛛血细胞 DNA 的损伤作用 ………… 李 锐, 李生才, 刘 佳 (3156) 杀真菌剂咪鲜安对萼花臂尾轮虫的影响………………………………………… 李大命,陆正和,封 琦,等 (3163) 长、短期连续孤雌生殖对萼花臂尾轮虫生活史和遗传特征的影响 ……………… 葛雅丽,席贻龙 (3170) 专论与综述 区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展 ………………… 赵 军,杨 凯,邰 俊,等(3180) 葡萄座腔菌科研究进展——鉴定,系统发育学和分子生态学 ……… 程燕林,梁 军,吕 全,等(3197) 人工林生产力年龄效应及衰退机理研究进展 ……………………………………… 毛培利,曹帮华,田文侠,等(3208) 研究简报 三江源地区高寒草原土壤微生物活性和微生物量……………………………任佐华,张于光,李迪强,等(3232) 3 种黑杨无性系水分利用效率差异性分析及相关 ERECTA 基因的克隆与表达 ………………………… 猕猴桃园节肢动物群落重建及主要类群的生态位………………… 杜 超,赵惠燕,高欢欢,等(3246) 期刊基本参数:CN 11-2031/Q\*1981\*m\*16\*298\*zh\*P\* ¥70.00\*1510\*33\*2011-06

#### \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\*

**封面图说:**盘锦市盘山县水稻田——盘锦市位于辽宁省西南部,自古就有"鱼米之乡"的美称。这里地处温带大陆半湿润季风 气候,有适宜的温度条件和较长的生长期以供水稻生长发育,农业以种植水稻为主,年出口大米达1亿多公斤,是国 家级水稻高产创建示范区和重要的水稻产区。

彩图提供:沈菊培博士 中国科学院生态环境研究中心 E-mail:jpshen@reccs.ac.cn

# 水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态与结构的影响

# 张 均1, 贺德先1,\*, 段增强2

(1. 河南农业大学农学院,郑州 450002;2. 河南农业大学生命科学学院,郑州 450002)

**摘要**:通过水、磷复因子大田试验,以强筋小麦品种郑麦 9023 为材料,研究了水磷耦合对小麦生育中、后期次生根特殊根毛形态 与结构的影响。结果指出,不同水分处理显著影响特殊根毛形态。随着土壤水分含量提高,次生根特殊根毛长度缩短。与土壤 湿润处理相比,仅依靠自然降水处理的特殊根毛长度和直径增加(P<0.01),拔节至子粒形成期间完全灌溉处理的根毛长度增 加(P<0.01)。随着供磷水平提高,特殊根毛长度和直径增加(P<0.05),其中高磷处理和对照(不施磷)的差异达极显著水平 (P<0.01)。同一供水条件下随供磷水平提高,或同一供磷水平上随土壤含水量降低,特殊根毛长度和直径均增加(P<0.05)。 拔节以后,仅依靠自然降水-高磷处理组合的特殊根毛细胞饱满,结构完整,细胞壁加厚明显,细胞核、液泡及线粒体清晰可见; 而土壤湿润-低磷处理组合的特殊根毛扭曲、变形现象严重,细胞壁变薄,细胞核解体,质膜、微体等细胞器消失。研究表明,适 当降低土壤含水量并提高供磷水平,小麦次生根特殊根毛的长度和直径增加,并维持良好的细胞形态和结构。 关键词:小麦;灌水;供磷;水磷耦合效应;特殊根毛;形态;结构

# Effects of water and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of wheat (*Triticum aestivum* L.)

ZHANG Jun<sup>1</sup>, HE Dexian<sup>1,\*</sup>, DUAN Zengqiang<sup>2</sup>

1 College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: In this study, we examined the combined effects of irrigation and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of Zhengmai 9023, a strong-gluten cultivar of wheat (Triticum aestivum L.). The experiments, conducted in the middle and late growing periods in 2009 and 2010, consisted of a 2 × 3 factorial experimental design with four replications. The effects of water supply on morphology of special root hairs were significant after jointing. Increased water supply was associated with significantly decreased length of special root hairs. Compared with those in the waterlogging treatment, the length and diameter of special root hairs from jointing to grain formation in optimal irrigation treatments (P < 0.01). The diameter of special root hairs slightly increased before jointing, and thereafter the differences in diameter of special root hairs among the different water treatments gradually increased. There was a significant difference in the diameter of special root hairs between the solely rain-fed treatment and the waterlogging treatment. The length and diameter of special root hairs increased with phosphorus supply (P<0.05). For special root hair length, there was a significant difference between the control (CK) and high phosphorus supply treatment in the solely rainfed treatment, and an extremely significant difference between the CK and high phosphorus supply treatment in the waterlogging treatment. From jointing to grain formation, the difference in special root hair diameter between the CK and high phosphorus supply treatments was extremely significant. After grain formation, the diameter of special root hairs decreased significantly and the difference in diameter between the different water treatments was not significant. The length and diameter of special root hairs significantly increased with phosphorus supply at a fixed irrigation level, and significantly decreased with soil moisture content at a fixed phosphorus level. After jointing, in the rain-fed treatment coupled with high

基金项目:河南省科技创新人才计划项目(104200510013);教育部高校博士学科点专项科研基金项目(20060466003)

收稿日期:2010-12-13; 修订日期:2011-03-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hedexian@ yahoo. com

phosphorus supply, special root hairs were full with a complete structure, thickened cell walls, distinct nuclei, vacuoles, and mitochondria. In the low phosphorus supply treatment coupled with waterlogging, special root hairs were twisted and deformed with thin cell walls, diffuse nuclei, and indistinct plasma membranes and microbodies. These results indicate that maintaining soil moisture at appropriate levels and increasing phosphorus supply could increase the length and diameter of special root hairs on nodal roots and retain favorable cell morphology and structure in wheat.

Key Words: nodal roots; irrigation level; phosphorus supply; combined effects of water and phosphorus supply; wheat; morphology; structure

根毛作为一种特化的根表皮细胞,在植物吸收那些只能通过渗透作用、短距离运输的营养元素如磷、钾以 及微量元素时发挥着非常重要的作用[1-2]。前人研究表明,根毛的生长与土壤环境具有密切关系,其中尤其 是土壤湿度以及氮、磷等营养元素含量<sup>[3]</sup>。大麦(Hordeum vulgare L.)根毛的变化对土壤磷的吸收具有显著 影响<sup>[4]</sup>。小麦在高磷条件下有较大的根毛密度,而在磷素缺乏时则几乎不发生根毛<sup>[5]</sup>。然而,也有研究表 明,低磷条件下拟南芥(Arabidopsis thaliana L.)平均根毛长度和密度分别是磷充足时的 3-5 倍多,表明缺磷 可诱导根毛的形成和生长<sup>[6]</sup>。因而,根毛生长的养分调节机制如何<sup>[7]</sup>,根毛与养分之间的模型构建<sup>[8-9]</sup>则是 当今的研究热点之一。尽管前人在矿质营养对根毛发育与功能的影响方面做了不少工作,但这些研究多采用 模式植物拟南芥以及其它非大田作物为研究对象。即使有一些研究涉及到作物根毛,大多也仅以实验室所培 养出来的幼根为材料,而并不结合根系生长自然环境或大田生产实际。同时,相关研究也缺乏全生育期的系 统性,研究结果缺乏实用性。因而,人们并不了解大田生产实践中原位的作物根毛在不同磷素水平下的实际 发育过程和对不同磷素水平的反应差异。而关于作物与水分的关系,以往的文献资料业已明确不同水分条件 下作物根系的形成和分布、形态和结构、生理特性等[10-11],但尚未见有专题研究报道不同水分条件下根毛的 发育和功能。土壤湿度是调控根毛发育的重要因素之一<sup>[12]</sup>,显著影响根毛密度的发生<sup>[13]</sup>。比较看来,前人 零星的根毛的水分关系研究,大多侧重于水分对根毛发生的影响[14],而关于根毛对不同水分条件下在形态与 结构方面的响应则尚属空白。关于次生根特殊根毛,前人主要报道了特殊根毛的发生部位、发育规律以及形 态结构[15]。鉴于上述,特开展水磷耦合对小麦次生根特殊根毛发生的影响研究,以期明确不同灌溉和供磷条 件下根毛形态与结构的差异,为合理施用磷肥和进行灌溉,有效调控根毛发育,提高根系生理功能提供科学 依据。

#### 1 材料与方法

试验于 2009—2010 年在河南农业大学科教园区进行。供试品种为黄淮麦区目前推广应用面积较大的优质强筋小麦品种"郑麦 9023"。试验地土质沙壤,耕层土壤有机质含量为 17.8 g/kg,全氮、碱解氮、有效磷和 有效钾含量分别为 0.89 g/kg,57.9 mg/kg,14.5 mg/kg 和 154.8 mg/kg,pH 值 7.9。

1.1 试验设计

采用多点随机区组设计。设3个不同水分处理,相当于3个不同环境,分别为:①仅依靠自然降水(W<sub>1</sub>); ②完全灌溉(W<sub>2</sub>),即根据当地小麦高产灌水方案进行灌溉;③保持湿润状态(W<sub>3</sub>)。每个水分处理设3个供 磷水平,分别为:0(P<sub>1</sub>),80(P<sub>2</sub>)和160(P<sub>3</sub>)kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/hm<sup>2</sup>。小区面积为17.4 m<sup>2</sup>(6 m×2.9 m),行距0.24 m, 12 行区,重复4次。

1.2 研究方法

#### 1.2.1 土壤水分控制方法

每个水分处理四周挖深 150 cm、宽 50 cm 的壕沟,将 2 层复合农用大棚膜紧覆沟壁,并高出地面 30 cm, 回填土壤,然后浇水踏实。复合农用大棚膜由濮阳市四季青塑料制品有限公司生产,规格为 180 m/捆,重 25 kg,宽4 m,厚0.4 mm。①W<sub>1</sub>:全期不灌溉;② W<sub>2</sub>:分别于 2009-11-28,2010-03-10 和 2010-04-17 灌水,每次灌 3112

水 30 m<sup>3</sup>,灌水方式为喷灌;③ W<sub>3</sub>:冬前至拔节期每间隔 10 d 灌溉 1 次,灌水量为 10 m<sup>3</sup>;拔节期后每间隔 5 d 灌溉 1 次,灌水量为 20 m<sup>3</sup>,全生育期保持土壤相对含水量为 95% 左右。不同水分环境的控制,仅考虑防止测 渗而地下水忽略不计。之所以采用如此的水分控制方法,一方面是为尽可能使大田试验切近生产实际,即保 证植株生长环境充分接近于大田,避免容器法(盆、桶、柱栽)和设施法(池栽)栽培对根系发育的影响;另一方 面,本试验田地下水埋深较深(汛期埋深 30 m 以上,其它季节埋深 27 m 以上),因而仅防测渗即可满足本研 究的需要。

1.2.2 主要仪器设备与试剂

OLYMPUS CH20-BM 显微图像处理系统、EMITECH K850 临界点干燥仪、HITACH E-1010 喷镀仪、LKB-V 型超薄切片机、FEI QUANTA200 扫描电子显微镜、日立 H-600 型透射电子显微镜等仪器设备,以及卡氏固定液、卡宝品红染液、醋酸异戊酯、四氧化锇、Epon812 包埋剂、醋酸铀、柠檬酸铅等试剂。

1.2.3 田间取样与样品前期处理方法

于 2010-02-05 (返青期)开始,每隔5 d 取样 1 次,直至蜡熟末期。取样时,随机选择并挖掘不同处理具 有代表性的植株 15 株,样株挖掘深度为 30 cm。前后 2 次的取样点之间留有 30 cm 以上的间隔,以避免前次 取样所留下的空隙影响下次取样样本的代表性。

用湿纱布包裹带土根样,装入盛有少量清水的塑料袋内转移至实验室。根样冲洗干净后,测定所取根段的根长、根粗等数量性状,然后仔细挑选15—20段长约10 cm具有代表性且具特殊根毛的次生根基部根样,投入卡氏固定液中固定30 min,然后转移至70%酒精中保存,以备光学显微镜观察。

另选取数百条有代表性的根样,一部分切为1 cm 左右的根段,投入5% 戊二醛溶液(pH 值 7.4)中保存, 以备扫描电子显微镜观察。另一部分则用刀片将特殊根毛轻轻剥离在培养皿中,然后转入10 mL 离心管,在 -4 ℃低温下 5000 r/min 离心10 min,然后收集、保存根毛于5% 戊二醛溶液(pH 7.4)中,以备透射电子显微 镜观察。

#### 1.2.4 制片与观察方法

(1)光学显微镜观察 用刀片和解剖针,将根毛轻轻剥离在载玻片上,滴1-2滴卡宝品红染液,染色2--3min。将制成的临时根毛样片置于光学显微镜下,观察其形态特征。

(2)扫描电子显微镜观察 ①切取长约1 cm 具特殊根毛的次生根根段,立即投入4% 戊二醛溶液中固定。②用0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH7.2)清洗3次,每次20 min。③采用浓度为30%,50%,70%,90%,100%的乙醇脱水,每次15 min。④醋酸异戊酯置换2次,每次15 min。⑤临界点干燥。⑥导电处理后,置于FEI QUANTA200 扫描电子显微镜下观察、拍摄。

(3)透射电子显微镜观察 ①固定。将新鲜根毛样品立即投入4%戊二醛溶液固定;静置4h后,用0.1 mol/L磷酸缓冲液(pH值7.2)清洗3次,每次20min;2%锇酸固定2h。②脱水、浸透与包埋、聚合。分别用 30%,50%,70%,90%丙酮逐级脱水,然后用 100%丙酮脱水2次,每级每次30min;Epon812包埋剂逐级渗透、包埋;恒温箱中于37℃,45℃,60℃温度下分别过夜聚合。③超薄切片、染色。用 LKB-V 型超薄切片机 进行超薄切片,厚度为50—70nm;铀铅染色;置于日立 H-600 型透射电子显微镜下观察、拍摄。

1.3 田间管理

前茬大豆。底肥普施纯 N 120 kg/hm<sup>2</sup>,氯化钾 187.5 kg/hm<sup>2</sup>,拔节期追施纯 N 120 kg/hm<sup>2</sup>。2009-10-16 播种。种植密度为 240 万苗/hm<sup>2</sup>。其它栽培管理同一般高产田。小麦全生育期内(2009 年 9 月—2010 年 6 月)的自然降水情况具有代表性,逐月降水量分别为 80,9,47,1,0,14,16,56,22,19 mm,共计 264 mm。

1.4 统计分析方法

运用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 对数据进行统计分析。

#### 2 结果与分析

水磷耦合对小麦次生根特殊根毛长度的影响
不同供水、供磷条件下,耕层土壤中小麦次生根特殊根毛长度为0.20—1.10 mm (x=0.64 mm,s=0.09)。

随着土壤水分含量提高,特殊根毛长度缩短,不同生育时期不同土壤水分处理间的变化趋势均表现为:W<sub>3</sub><W<sub>2</sub><W<sub>1</sub>(图1)。图1表明,拔节后不同水分处理对根毛的影响大于拔节以前,且随着土壤水分含量提高,根毛长度下降幅度增大。本试验条件下,小麦生育期间的自然降水量及其季节分布接近常年水平,观察期间W<sub>1</sub>处理略有旱象,在一定程度上刺激了根毛生长,而W<sub>3</sub>由于土壤相对含水量始终保持在95%左右,土壤空气不足,根毛少而短。该研究结果表明,生产实践中可适当减少灌溉次数,以增加根毛长度。表1也指出,在本研究土壤有效磷含量为中等水平的基础地力条件下,提高供磷水平,显著促进特殊根毛长度延长。在W<sub>1</sub>处理中,P<sub>3</sub>的根毛长度为0.67—1.17 mm (*x*=0.90 mm),而P<sub>1</sub>的根毛长度则仅为0.34—0.86 mm (*x*=0.60 mm),二者在不同生育时期的差异均达显著水平。W<sub>2</sub>处理中不同供磷水平下根毛长度的变化趋势与W<sub>1</sub>处理相似。而在W<sub>3</sub>处理中,不同供磷水平下根毛长度的变化幅度更大:返青期,P<sub>1</sub>与P<sub>3</sub>的根毛长度分别为为0.20 mm 和0.35 mm,二者间的差异未达极显著水平;随着生育期推进,根毛长度的差异增大,至扬花期二者间的差异达极显著水平,这说明土壤湿润条件下,增施磷肥可显著增加根毛长度,其中尤其是在生育中、后期,效果更为明显。





Fig. 1 Length of special root hairs of wheat nodal roots at differentirrigation and phosphorus supply levels

& I 个问点小但应姆及连对小女人工很有办很七人及用家	根毛长度的影响	同供水和供	表1 ス
-----------------------------	---------	-------	------

Table 1 Effects of different irrigation and phosphorus supply levels on length of special root hairs of wheat nodal roots

处理	观测时间 Observation date											
Treatment	02-05	02-15	02-25	03-07	03-17	03-27	04-06	04-16	04-26	05-06	05-06	05-06
$W_1P_1$	0.349	0.400	0.428	0.580	0.680	0.670	0.828	0.852	0.856	0.600	0.500	0.457
	cdBCD	cdBCD	eD	$\mathbf{bC}$	cdBC	dDE	bcABC	cdBC	bcBC	bcBC	cdBC	bcdBCD
W/ D	0.410	0.600	0.600	0.600	0.828	0.856	0.845	0.900	0.992	0.755	0.700	0.500
w <sub>1</sub> 1 <sub>2</sub>	bcdBC	abA	dBC	$\mathbf{bC}$	bcAB	bBC	bcABC	bcBC	abAB	$\mathbf{bB}$	$\mathbf{bB}$	bcBC
W/ D	0.670	0.670	0.700	0.868	1.000	1.008	1.037	1.100	1.165	0.975	0.900	0.700
w <sub>1</sub> 1 <sub>3</sub>	aA	aA	$\mathbf{bB}$	aAB	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA
$W_2 P_1$	0.300	0.400	0.590	0.600	0.637	0.654	0.655	0.640	0.700	0.573	0.500	0.338
	cdeCD	cdBCD	dC	$\mathbf{bC}$	dBCD	deDE	cdCD	efDE	cdCD	cdBC	cdBC	deCDE
$W_2P_2$	0.428	0.500	0.620	0.700	0.800	0.790	0.824	0.824	0.828	0.600	0.500	0.456
	bcBC	bcABC	cdBC	bBC	cABC	bcCD	bcABC	cdBCD	beBC	beBC	cdBC	bcdBCD
W/D	0.500	0.600	0.941	0.955	0.952	0.975	1.000	1.000	0.986	0.631	0.600	0.592
w <sub>2</sub> r <sub>3</sub>	$\mathbf{bB}$	abA	aA	aA	abA	aAB	abAB	abAB	abAB	bcBC	bcB	abAB
W/D	0.200	0.240	0.291	0.330	0.440	0.375	0.460	0.540	0.560	0.440	0.336	0.240
w 311	eD	eD	fE	$^{\rm cD}$	eD	$\mathbf{fF}$	eD	fE	dD	dC	eC	eE
$W_3P_2$	0.291	0.340	0.477	0.572	0.590	0.555	0.614	0.640	0.692	0.440	0.381	0.291
	deCD	deCD	eD	$\mathbf{bC}$	dCD	eE	deCD	efDE	cdCD	dC	deC	eDE
W/D	0.350	0.540	0.680	0.696	0.713	0.708	0.745	0.735	0.865	0.617	0.540	0.445
$W_3P_3$	cdBCD	bAB	bcBC	bBC	cdBC	cdD	cdBC	deCD	abcABC	bcBC	cBC	cdBCD

同一列数据后标有不同小写或大写字母者,表示其差异达显著(α=0.05)或极显著(α=0.01)水平

研究结果表明(表1),水磷耦合显著影响特殊根毛长度。不同生育时期,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>与W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>的差异均达极显著 水平。返青—子粒形成期间,特殊根毛长度呈逐渐增加趋势,到子粒形成前后,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>的根毛长度达观察期间 的最大值1.17 mm,而W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>处理组合则仅为0.56 mm,二者间的差异达极显著水平;子粒形成以后,根毛长度 逐渐缩短,且表现为随着土壤含水量增加和供磷水平降低,下降幅度显著。该研究结果说明,供磷水平提高可 增加根毛长度,但这种作用受到水分状况的影响。大田实践中,轻度水分胁迫条件下增施磷肥,对特殊根毛长 度具有显著的增加效应,而当土壤水分较多时,通过增施磷肥也可缓解土壤水分逆境对根毛长度的抑制作用。 2.2 水磷耦合对小麦次生根特殊根毛直径的影响

不同处理条件下,小麦特殊根毛直径为2.8—23.8 μm (x̄=11.9 μm,s=1.08),不同生育时期表现出 "低—高—低"的变化趋势(图2,表2)。图2表明,拔节前,随着土壤水分减少,根毛直径略有增加,但变化幅





Fig. 2 Diameter of special root hairs of wheat nodal roots at different irrigation and phosphorus supply levels

Table 2 Effects of different irrigation and phosphorus supply levels on diameter of special root hairs of wheat nodal roots

处理					3	观测时间 O	bservation	date				
Treatment	02-05	02-15	02-25	03-07	03-17	03-27	04-06	04-16	04-26	05-06	05-06	05-06
$W_1P_1$	4.32	4.59	4.70	5.00	6.00	8.70	9.40	15.00	18.00	17.80	17.95	13.40
	dDE	cCD	eD	cC	dDE	cBC	fD	cdeCDE	cCD	bAB	bcBC	deD
$W_1P_2$	5.57	6.96	7.20	7.40	12.20	11.59	14.60	16.60	23.80	18.92	18.12	16.10
	bcABC	aA	bB	bB	aA	abA	cdBC	bcdBCD	aAB	abAB	bcABC	bcBC
$W_1P_3$	6.35	7.01	7.29	9.25	10.20	12.80	19.00	20.53	25.39	19.60	18.40	17.30
	aA	aA	aB	aA	bB	aA	aA	aA	aA	abAB	bcABC	bAB
$W_2 P_1$	4.00	3.90	5.20	4.90	6.90	7.00	9.00	17.59	19.26	17.59	15.95	11.72
	deE	dE	deCD	cC	cdCD	cdCDE	fD	bcABCD	bcBCD	bAB	сС	eDE
$W_2 P_2$	5.01	6.05	6.98	6.90	8.00	8.20	14.90	18.26	22.74	22.30	20.30	16.80
	cCD	bC	bB	bB	cC	cBCD	cdBC	abABC	abABC	aA	abAB	bAB
$W_2P_3$	6.05	6.90	9.70	8.79	10.59	12.20	18.60	19. 10	23.75	22.60	21.80	19.80
	abAB	aAB	aA	aA	bAB	abA	abA	abAB	aAB	aA	aA	aA
$W_3P_1$	3.50	2.90	2.80	3.50	4.50	4.60	11.20	12.60	13.00	11.00	10.70	9.32
	eE	dE	fE	dD	eE	eE	efCD	eE	dE	cC	dD	fE
$W_3 P_2$	5.50	4.75	5.90	4.50	5.60	5.80	12.50	14.20	17.00	16.00	16.00	14.40
	bcABC	cC	cdBCD	cC	deDE	deDE	deBCD	deDE	cDE	bBC	cC	cdBCD
$W_3P_3$	5.40	6.20	6.50	9.00	10.40	10.60	16.20	17.60	19.40	18.60	17.10	17.00
	bcBC	bB	bcBC	aA	bAB	bAB	bcAB	bcABCD	bcBCD	abAB	cBC	bAB

同一列数据后标有不同小写或大写字母者,表示其差异达显著(α=0.05)或极显著(α=0.01)水平

度不大;拔节后,不同水分处理间根毛直径的差异逐渐增大,到扬花期时,W<sub>1</sub>与W<sub>3</sub>的根毛直径分别为18.0—25.4 µm ( $\bar{x}$ =22.4 µm)与13.0—19.4 µm ( $\bar{x}$ =16.5 µm),差异达显著水平;子粒形成以后,根毛直径显著减小,W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub>、W<sub>3</sub>根毛直径分别为13.4—19.6 µm ( $\bar{x}$ =17.5 µm),11.7—22.6 µm ( $\bar{x}$ =18.8 µm),9.3—18.6 µm ( $\bar{x}$ =14.5 µm),处理间的差异未达显著水平。该研究结果表明,适当控制土壤水分可增大根毛细胞直径,同时,土壤水分对根毛直径的影响主要表现在生育后期。不同供磷水平显著影响特殊根毛直径,表现为P<sub>1</sub><P<sub>2</sub><P<sub>3</sub>(图 2),即供磷水平降低导致特殊根毛直径减小。拔节—子粒形成期间,随着供磷水平提高,根毛直径显著增大,P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>和P<sub>3</sub>的根毛直径分别为5.8—16.8 µm ( $\bar{x}$ =11.3 µm),8.6—21.2 µm ( $\bar{x}$ =15.2 µm)和10.4—22.8 µm ( $\bar{x}$ =16.6 µm),其中,P<sub>1</sub>与P<sub>3</sub>的差异达极显著水平;子粒形成以后,根毛直径减小。在W<sub>1</sub>处理中,子粒形成以前,P<sub>1</sub>与P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>的差异均达极显著水平,但P<sub>2</sub>与P<sub>3</sub>的差异未达显著水平,这说明土壤水分过多对根毛直径所造成的不利影响。

水磷耦合对特殊根毛直径影响显著(表2),返青—拔节期间,不同处理组合的特殊根毛直径差异不大;而 拔节—子粒形成期间,不同处理组合特殊根毛直径的差异显著增大,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>与W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>的差异达极显著水平;子粒 形成—蜡熟期间,不同处理组合的根毛直径具有一定差异。该研究结果表明,土壤水分和供磷水平影响根毛 直径大小,且水、磷具有互作效应,但提高供磷水平,在一定程度上促进根毛直径增大,生产实践中可通过增施 磷肥以增大特殊根毛直径,从而以缓解水分的不利影响。

2.3 水磷耦合对小麦次生根特殊根毛形态的影响

不同供水和供磷水平下,不同生育时期次生根特殊根毛的形态显著不同。在拔节期,不同水分处理的次 生根根表皮细胞排列紧密,生毛细胞呈圆柱形,内皮层细胞近圆形(图3a)。拔节以后,不同水分处理间特殊 根毛的形态差异逐渐明显。W1处理的特殊根毛交错缠绕,或叠压在一起,表面突兀不平,其上附着大量土粒, 根毛前端突起和顶部分枝现象较多,这可能是特殊根毛抵御干旱的一种适应机制;W3处理的特殊根毛则呈平 滑管状延伸,其上少有土粒附着。蜡熟末期,各水分处理的特殊根毛衰老、死亡,尤其是W3处理的根表皮细胞 排列疏松。不同供磷水平下,特殊根毛细胞形态不同。拔节以前,各处理间的差异不明显,根毛形态单一,少 有突起及分枝现象。拔节一扬花期间,P1处理的特殊根毛多呈平滑长管形,土粒附着较少(图3b);而P3处理 的特殊根毛扭曲和变形现象则较为普遍,根毛前端多呈块瘤状,基部分枝和顶部分枝现象均有发生。子粒灌 浆一蜡熟期间,P1和P2处理的大部分特殊根毛脱落,而未脱落的特殊根毛则多数着色较浅,尤其在蜡熟末期, 甚至不着色;P3处理的特殊根毛细胞扭曲、变形现象加重(图3c)。



图 3 小麦次生根特殊根毛形态的光学显微图 Fig. 3 OM morphology of special root hairs of wheat nodal roots a: 拔节期, W<sub>2</sub>P<sub>2</sub>, ×10; b: 扬花期, W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>, ×10; c: 子粒灌浆中期, W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>, ×10

水磷耦合对特殊根毛形态影响显著。拔节—扬花期间,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>处理组合的生毛细胞近椭圆形,横切面积明显大于W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>处理组合的生毛细胞,而且细胞的变形和分枝现象较为常见(图4a)。同时,W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>处理组合的特殊根毛细胞呈长方形,同部位横切面积较小,根毛发生数量显著低于W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>处理组合,部分根毛具有分枝,扭

曲、变形程度轻于 W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>处理组合。扫描电镜观察结果指出,扬花期间,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>处理的特殊根毛颜色洁白,尤其 是根毛前端,而 W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>处理中的部分特殊根毛细胞中空,直径较小(图 4b)。水磷耦合对根毛形态的互作效应 表现为,随着土壤水分含量减少且供磷水平提高,特殊根毛形态饱满,内部充实,内含物丰富。子粒灌浆期间, W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>和 W<sub>3</sub>P<sub>2</sub>处理组合的根毛细胞衰亡速度较快,根毛表面出现裂纹(图 4c)。蜡熟末期,不同处理组合的特 殊根毛脱落时,仅是根毛细胞本身脱落,而根表皮细胞仍然排列紧密,这与一般的根尖成熟部位的根毛脱落时 根表皮细胞也随之脱落显著不同。观察还发现,特殊根毛的发生并非都由生毛细胞发育而来,而非生毛细胞 也可以发育成特殊根毛,只是发生几率较小。个别情况下,特殊根毛也可发生于两个表皮细胞中间的组织,但 该两个表皮细胞必须排列紧密且均为生毛细胞。



图 4 小麦次生根特殊根毛形态的电子扫描图 Fig. 4 SEM morphology of special root hairs of wheat nodal roots a: 扬花期,W1P3, ×40; b: 扬花期,W2P3, ×300; c: 子粒灌浆中期,W3P1, ×2400

#### 2.4 水磷耦合对小麦次生根特殊根毛内部结构的影响

土壤含水量显著影响特殊根毛结构。据在子粒形成期间观察, W<sub>1</sub>处理的特殊根毛结构比较完整,细胞壁 厚薄一致,质膜相对平滑、完整,紧贴细胞壁,细胞质集聚细胞两端,液泡较大,占据细胞腔的大部分空间,受液 泡挤压而细胞核不在中央,且呈半月形,核内物质丰富,透射电镜下染色较深,线粒体分散于细胞内,囊泡分布 稀疏(图 5a)。而 W<sub>3</sub>处理的特殊根毛结构与 W<sub>1</sub>显著不同,细胞壁厚度不均,细胞中部严重收缩,整个根毛细 胞呈"∞"形,液泡小而密集,细胞质不均等聚集,细胞核、线粒体等解体、消失(图 5b)。观察结果还指出,特 殊根毛结构随供磷水平不同而不同。据在子粒形成期间观察,P<sub>2</sub>处理的特殊根毛细胞壁厚薄不均,一端加厚, 且加厚处伴有纤维素沉积现象;细胞膜紧贴细胞壁,并在胞壁加厚处清晰可见磷脂双分子层;细胞质稀少,环 细胞壁分布;中央大液泡占据细胞腔的绝大部分空间;细胞核呈长方形,被液泡挤至细胞一端的一侧,且紧邻 细胞壁;在紧靠细胞核的近壁处,可观察到少量高电子密度颗粒;嗜银颗粒及微体集中分布在细胞质密集处 (图 5c)。而 P<sub>1</sub>处理的根毛细胞胞壁厚薄不一,两端壁稍厚,分别为1.08 μm 和0.83 μm,同时,细胞壁不仅向 胞腔内凹陷,而且可向外凸出;腔内胞质浓厚,少量不规则液泡被高密度细胞质挤压至细胞两侧,没有观察到 细胞核和线粒体等细胞器(图 5d)。

水磷耦合对特殊根毛结构产生不同影响。据在子粒灌浆中期观察, W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>处理组合的特殊根毛细胞长为 14.17 μm, 宽为11.67 μm, 胞壁完整, 可塑性强; 厚壁处内含物丰富, 质膜清晰可见, 而薄壁处内含物质则较 少, 质膜消失; 细胞质占据大部分胞腔, 液泡受挤压呈不规则状, 包被着细胞核, 位于一侧; 细胞核半圆形, 核膜 明显, 包裹着染色较深的核质; 近壁的胞质密集处, 有较大的过氧化酶体, 以及较多的线粒体、油滴及淀粉粒等 (图 5e)。与之形成对照, W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>处理组合的特殊根毛细胞呈圆形, 胞壁厚薄不一, 有内凹现象; 质膜断裂, 不完 整; 较浓的胞质分布不均, 近厚壁处胞质密集, 而近薄壁处胞质稀少; 液泡小且不规则; 细胞核、线粒体、微体等 数量很少(图 5f)。观察还发现, W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>处理组合的特殊根毛可由非生毛细胞发育而来, 但该现象并不经常发 生, 其机制需进一步探讨。



图 5 小麦次生根特殊根毛的透射电子显微结构 Fig. 5 TEM structure of special root hairs of wheat nodal roots

a:子粒形成期,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>,×8000; b:子粒形成期,W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>,×14000; c:子粒形成期,W<sub>1</sub>P<sub>2</sub>,×5000; d:子粒形成期,W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>,×8000; e:子粒灌浆中期,W<sub>1</sub>P<sub>3</sub>,×12000; f:子粒灌浆中期,W<sub>3</sub>P<sub>1</sub>,×8000

#### 3 结论与讨论

作物根尖成熟部位的根毛寿命较短,仅为10—20 d 或更短。随着根成熟区段的根龄变老,其上所覆盖的 根毛逐渐失去功能,并萎缩、死亡,最后随皮层剥落<sup>[12]</sup>。本文研究表明,冬小麦返青以后,次生根在靠近根基 部 10 cm 左右根段上发生特殊根毛,它们在生育中、后期均不脱落。观察结果指出,返青后次生根近植株部位 开始发生特殊根毛,拔节期间特殊根毛大量发生,至子粒形成期达到高峰,而生育末期也仍有发生。这与前人 所说的生产实践中,保持生育中、后期土壤适度干旱,可刺激特殊根毛数量增加,从而使根毛对耕层土壤水分 吸收与利用成为可能。

水分胁迫对植物根毛发生具有重要影响,特别是对根毛密度影响明显,水分含量较多时,根毛发生较少<sup>[16]</sup>,而土壤水分亏缺严重时,根毛也停止发生<sup>[17]</sup>。本试验条件下,小麦全生育期内自然降水为223 mm,返 青一成熟期间(2—5月)为109 mm,均接近常年水平。在此条件下,随着土壤水分含量增加,特殊根毛发生数 量减少,根毛长度和直径下降。土壤干旱时,因正常水分条件下的根毛数量不能满足植株吸收水分的需要,因 而诱发根毛数量增加,形态结构发生变化,诸如根毛长度增加、直径变大等,这种变化均增加了根毛与土壤的 有效接触面积,更有利于根毛对水分的吸收。生产实践中,春季适当控制土壤含水量,甚至保持土壤轻度干 旱,可促进根毛发生,增强根系吸水能力。截至目前,关于作物根毛与水分关系方面的研究颇少,大田条件下 根毛形成和发育的水分调控、根毛吸水的分子机制等均需加以深入研究。

小麦根毛的形成对土壤磷的吸收产生显著影响<sup>[4]</sup>。在磷胁迫下,作物根系会形成有利于磷素吸收的适应机制,比如根毛发生数量增多,形态与结构发生改变<sup>[18]</sup>。随着磷含量增加,根毛半径显著增大,且与植物体内磷含量的正相关达显著水平<sup>[18]</sup>。本试验结果表明,小麦特殊根毛的长度和直径与土壤供磷水平呈正相关, 尤其是根毛直径受磷素水平的影响显著。迄今,虽然关于根毛对磷素的吸收已有较多研究,但以往的研究多 采用染色法或同位素示踪法<sup>[19]</sup>,只能定性分析根毛的吸收功能,因而,能否寻求一种定量的方法来衡量根毛 对磷的吸收能力,值得进一步探讨。

土壤水分含量较少条件下,随着施磷量提高,特殊根毛长度和直径显著增加;而在土壤水分含量过多时, 增施磷肥也显著增加根毛长度和直径,缓解水分过多对根毛的抑制。灌溉与施磷相耦合,可促进特殊根毛生 长,这为旱作区和稻茬麦区的水磷管理提供了理论依据。

作物根毛的形态受多种因素调控。土壤环境<sup>[13]</sup>、矿质营养<sup>[20]</sup>、植物生长物质<sup>[21]</sup>等均可改变根毛形态, 其中,尤以土壤条件对根毛形态的改变最为直接。田间条件下,根毛因在土粒间穿越生长而呈不同扭曲形 状<sup>[17]</sup>。本试验条件下,仅依靠自然降水处理特殊根毛产生突起和发生分枝现象普遍,增大根表面积,利于根 系对水分和养分的吸收。随着供磷水平提高,根毛形态变化很大,说明磷有效性对根毛形态具有调节作用。 当土壤水分含量降低、供磷水平提高时,特殊根毛细胞壁变厚,细胞内水分流失减少、抵抗病害侵染的能力增 强,根毛衰老延缓<sup>[15]</sup>。此外,根毛形态因供磷水平而改变的特性,可为选育磷高效品种提供育种依据。

随着电子显微技术的发展和应用,人们对根毛细胞超微结构的认识逐渐深化<sup>[22]</sup>。本研究结果表明,土壤 水分含量较低时,根毛细胞结构完整,更有利于根系在干旱条件下继续维持生长。土壤磷含量较高时,根毛胞 质浓,细胞核大。同时,较大的液泡中含有糖及有机酸等物质,维持根毛细胞正常生长。水磷耦合有利于特殊 根毛结构发育,土壤含水量低、供磷水平高时,特殊根毛内含物丰富,结构完整而清晰;而当土壤含水量高、供 磷水平低时,特殊根毛大部分细胞器与内含物消失,胞壁薄且出现内凹和外凸现象,这可能与其抵御不良环境 有关。据此,推测水分和磷素与小麦根毛结构发育调节中的某些环节有关,但其详细作用机制尚需进一步研 究。迄今,大田生产条件下,小麦不同生育时期特殊根毛的内部结构和内含物组成的变化及其与生理功能之 间的关系如何,如何改进特殊根毛的调控手段,充分发挥其生理作用,值得进一步探索。

**致谢:**南京林业大学显微测试分析中心徐柏森、杨静老师帮助完成根毛样品切片及电镜观察工作,河南农业大 学林学院茹广欣教授为本研究的电镜观察研究提供帮助,特此致谢。

#### References:

- [1] Zhu J M, Kaeppler S M, Lynch J P. Mapping of QTL controlling root hair length in maize (*Zea mays* L.) under phosphorus deficiency. Plant and Soil, 2005, 270(1): 299-310.
- [2] Yan X L, Liao H, Beebe S E, Blair M W, Lynch J P. QTL mapping of root hair and acid exudation traits and their relationship to phosphorus uptake in common bean. Plant and Soil, 2004, 265(1/2): 17-29.
- [3] Gahoonia T S, Nielsen N E. Phosphorus (P) uptake and growth of a root hairless barley mutant (bald root barley, brb) and wild type in low- and high-P soils. Plant, Cell and Environment, 2003, 26(10): 1759-1766.
- [4] Kristoffersen A Ø, Riley H, Son T A. Effects of P fertilizer placement and temperature on root hair formation, shoot growth and P content of barley grown on soils with varying P status. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 73(2/3): 147-159.
- [5] Gahoonia T S, Nielsen N E, Lyshed O B. Phosphorus(P) acquisition of cereal cultivars in the field at three levels of P fertilization. Plant and Soil, 1999, 211(2): 269-281.
- [6] Ma Z, Bielenberg D G, Brown K M, Lynch J P. Regulation of root hair density by phosphorus availability in *Arabidopsis thaliana*. Plant Cell and Environment, 2001, 24(4): 459-467.
- [7] Richardson A E, Hocking P J, Simpson R J, George T S. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus. Crop and Pasture Science, 2009, 60(2): 124-143.
- [8] Zhu J M, Zhang C C, Lynch J P. The utility of phenotypic plasticity of root hair length for phosphorus acquisition. Functional Plant Biology, 2010, 37(4): 313-322.
- [9] Leitner D, Klepsch S, Ptashnyk M, Marchant A, Kirk G J D, Schnepf A, Roose T. A dynamic model of nutrient uptake by root hairs. New Phytologist, 2010, 185(3): 792-802.
- [10] Huang J, Zhang Y, Shen Y F, Li S Q. Effect of fertilization on winter wheat root hydraulic lift and nutrient use efficiency under water stress. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(2): 353-357.
- [11] Yao S M, Kang Y H, Liu H J. Research on root growth and distribution of winter wheat under sprinkler and surface irrigation. Journal of Water Resourcesand Water Engineering, 2010, 21(4): 1-5.
- [12] He D X, Zhang J, Yang Q H, Wang C Y, Duan Z Q, Shi X J, Cui Z Q, Ren J X. A review on crop root hairs. Journal of Henan Agricultural

Sciences, 2006, (8): 5-8.

- [13] Hammac W A, Pan W L, Bolton R P, Koenig R T. High resolution imaging to assess oilseed species' root hair responses to soil water stress. Plant and Soil, 2010, 332(1/2):125-135.
- [14] Li G W, Zhang M H, Cai W M, Sun W N, Su W A. Characterization of OsPIP2;7, a water channel protein in rice. Plant and Cell Physiology, 2008, 49(12): 1851-1858.
- [15] Zhang J, He D X, Duan Z Q. Formation, morphology, and structure of special root hairs on nodal roots of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in middle and late growing period. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5485-5492.
- [16] Metcalfe D B, Meir P, Aragão L E O C, da Costa A C L, Braga A P, Gonçalves P H L, de Athaydes Silva J Jr, de Almeida S S, Dawson L A, Malhi Y, Williams M. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest. Plant and Soil, 2008, 311(1/2): 189-199.
- [17] Ma Y X. Root of Wheat. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 262-262.
- [18] Wang L D, Liao H, Wang X R, Yan X L. Root hair initiation and development and nutrient uptake in plants. Chinese Bulletin of Botany, 2004, 21(6): 649-659.
- [19] Gahoonia T S, Nielsen N E. Barley genotypes with long root hairs sustain high grain yields in low-P field. Plant and Soil, 2004, 262(1/2): 55-62.
- [20] Brechenmacher L, Lee J, Sachdev S, Song Z, Nguyen T H N, Joshi T, Oehrle N, Libault M, Mooney B, Xu D, Cooper B, Stacey G. Establishment of a protein reference map for soybean root hair cells. Plant Physiology, 2009, 149(2): 670-682.
- [21] Bao J, Liu J X, Chen F J, Zhang F S, Mi G H. Roles of phytohormones in nitrogen- and phosphorus-regulated root morphogenesis. Plant Physiology Communications, 2009, 45(7): 706-710.
- [22] Volgger M, Lang I, Ovečka M, Lichtscheidl L. Plasmolysis and cell wall deposition in wheat root hairs under osmotic stress. Protoplasma, 2010, 243(1/4): 51-62.

#### 参考文献:

- [10] 黄洁,张扬,沈玉芳,李世清.施肥对水分胁迫下冬小麦根系提水及养分利用的影响.麦类作物学报,2010,30(2):353-357.
- [11] 姚素梅,康跃虎,刘海军.喷灌与地面灌溉冬小麦根系生长和分布的比较研究.水资源与水工程学报,2010,21(4):1-5.
- [12] 贺德先,张均,杨青华,王晨阳,段增强,史晓江,崔志青,任介新.作物根毛研究进展.河南农业科学,2006,(8):5-8.
- [15] 张均, 贺德先, 段增强. 冬小麦生育中后期次生根特殊根毛的发生与形态结构. 生态学报, 2009, 29(10): 5485-5492.
- [17] 马元喜. 小麦的根. 北京:中国农业出版社, 1999: 262-262.
- [18] 王立德, 廖红, 王秀荣, 严小龙. 植物根毛的发生、发育及养分吸收. 植物学通报, 2004, 21(6): 649-659.
- [21] 鲍娟,刘金鑫,陈范骏,张福锁,米国华.植物激素在氮磷养分调节根形态建成中的作用.植物生理学通讯,2009,45(7):706-710.

### ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 11 June, 2011 (Semimonthly) CONTENTS

Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis ..... JIA Xiaohui, SHI Dingji, SHI Mianhong, et al (2968) Unbalanced cyclical fluctuation pattern of intermittent outbreaks of beet armyworm Spodoptera exigua (Hübner) in China ..... WEN Lizhang, ZHANG Youjun, ZHU Liang, et al (2978) Self-organizing feature map classification and ordination of Larix principis-rupprechtii forest in Pangquangou Nature Reserve Ecological effects of lakeside wetlands restoration in Dalian Lake, Shanghai ...... WU Di, YUE Feng, LUO Zukui, et al (2999) Soil organic carbon storage and profile inventory in the different vegetation types of Luva Mountain ..... WU Xiaogang, GUO Jinping, YANG Xiuyun, et al (3009) Response of soil microbial community structure to the leaf litter decomposition of three typical broadleaf species in mid-subtropical area, southern China ...... ZHANG Shengxi, CHEN Falin, ZHENG Hua (3020) The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China ..... CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3027) Spatiotemporal heterogeneity of topsoil nutrients in Karst Peak-Cluster depression area of Northwest Guangxi, China ..... LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (3036) Effects of cadmium stress on the activities of antioxidant enzymes, digestive enzymes and the membrane lipid peroxidation of the mangrove mud clam Geloina coaxans (Gmelin) ..... LAI Tinghe, HE Binyuan, FAN Hangqing, et al (3044) The edge effects on tree-liana relationship in a secondary natural forest in Bawangling Nature Reserve, Hainan Island, China ..... Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau The diurnal trends of sensible and latent heat fluxes of a subtropical evergreen coniferous plantation subjected to seasonal drought ······ HE Youwei, WANG Qiubing, WEN Xuefa, et al (3069) Ecological adaptability of photosynthesis and water use for Tamarix ramosissima in the southern periphery of Gurbantunggut Desert, Xinjiang ······ WANG Shanshan, CHEN Xi, WANG Quan, et al (3082) Estimation of leaf area index of cotton using digital Imaging ..... WANG Fangyong, WANG Keru, LI Shaokun, et al (3090) Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (*Clycine soja*) and cultivated soybean (*Clycine max*) to NaCl stress XUE Zhongcai, GAO Huiyuan, LIU Jie (3101) Effects of water and phosphorus supply on morphology and structure of special root hairs on nodal roots of wheat (Triticum ZHANG Jun, HE Dexian, DUAN Zengqiang (3110) aestivum L.) Applications of species indicator for analyzing plant community types and their biodiversity at Kunyushan National Forest Reserve 🛛 … ...... SUN Zhiqiang, ZHANG Xingyao, ZHU Yanpeng, et al (3120) Societal metabolism for chinese provinces based on multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM) ..... LIU Ye, GENG Yong, ZHAO Hengxin (3133) Comparative gene expression analysis for leaf trichomes of tobacco grown in two different regions in China ..... CUI Hong, JI Hao, YANG Huijuan, et al (3143) Performance evaluation of B biotype whitefly, Bemisia tabaci on 23 host plants ..... AN Xincheng, GUO Qiang, HU Qiongbo (3150) Studies of hemocytes DNA damage by two pesticides acetamiprid and chlorpyrifos in predaceous spiders of Pardosa astrigera Koch .... LI Rui, LI Shengcai, LIU Jia, (3156) Effects of the fungicide prochloraz on the rotifer Brachionus calyciflorus ..... LI Daming, LU Zhenghe, FENG Qi, et al (3163) Effects of long- and short-term successive parthenogenesis on life history and genetics characteristics of Brachionus calyciflorus ..... GE Yali, XI Yilong (3170) **Review and Monograph** Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality ZHAO Jun, YANG Kai, TAI Jun, et al (3180) Advances in Botryosphaeriaceae: identification, phylogeny and molecular ecology ······ CHENG Yanlin ,LIANG Jun ,LÜ Quan ,et al (3197) Advances inresearch on the mechanisms of age-related productivity decline of planted forests MAO Peili, CAO Banghua, TIAN Wenxia, et al (3208) The application of tree-ring on forest disturbance history reconstruction ..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (3215) Research advances on stress responsive WRKY transcription factors in plants ..... LI Ran, LOU Yonggen (3223) Scientific Note The soil microbial activities and microbial biomass in Sanjiangyuan Alpine glassland ..... REN Zuohua, ZHANG Yuguang, LI Diqiang, et al (3232) The differences of water use efficiency (WUE) among three Populus deltoids clones, and the cloning and characterization of related gene, PdERECTA ...... GUO Peng, XIA Xinli, YIN Weilun (3239) Arthropod community reestablishment and niche of the main groups in kiwifruit orchards ..... DU Chao, ZHAO Huivan, GAO Huanhuan, et al (3246)

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

	( •	<b>3</b> . <b>3</b> = 0 = 0   /@ <b>t</b> = 0		=/1/	
排序	期刊	总被引频次	排序	期刊	影响因子
Order	Journal	Total citation	Order	Journal	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

#### (源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

★《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		ACTA ECOLOGICA SINICA
	(SHENGTAI XUEBAO) (半月刊 1981年3月创刊)		(Semimonthly, Started in 1981)
第	31卷 第11期 (2011年6月)		Vol. 31 No. 11 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	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18,Shuangqing Street,Haidian,Beijing 100085,China Tel. (010)62941099
主编	www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn 冯宗炜	Editor-in-chief	www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn FENG Zong-Wei
王管	中国科学技术协会 中国生太受受合	Supervised by	China Association for Science and Technology
王が	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	<b>4 华 <u>4</u> <u>後</u> 社</b> 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	<b>Published</b> by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	<b>Printed</b> by	Beijing Bei Lin Printing House,
发行	4 & & & & & 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	<b>Distributed</b> by	Beijing 100083, China Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
订 购 国外发行 广告经营	全国各地邮局 中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Domestic Foreign	E-mail:journal@ cspg. net All Local Post Offices in China China International Book Trading Corporation
,百年百 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

国外发行代号 M670