

# 交替隔沟灌溉土壤水分时空分布与灌水均匀性研究

潘英华<sup>1</sup>,康绍忠<sup>2</sup>,杜太生<sup>2</sup>,杨秀英<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院水利部水土保持研究所,杨凌 712100; <sup>2</sup> 西北农林科技大学教育部农业水土工程重点实验室,杨凌 712100;

<sup>3</sup> 甘肃省武威地区水利科学研究所,武威 733000)

摘要:以春玉米为试验材料,在甘肃河西民勤沙漠绿洲区进行大田试验,研究控制性交替隔沟灌溉水分的时空分布特性和灌水均匀性。试验结果表明,在玉米生长期,对灌水沟进行交替干燥和湿润,可以使作物根系经受一定程度的干旱锻炼,提高根系的吸收补偿效应;交替隔沟灌溉中,由于在灌水沟和非灌水沟之间没有形成零通量面,其水分的侧向入渗明显增强,从而可减少土壤水分发生深层渗漏的机率;同常规灌溉相比,虽然交替灌溉的用水量有所减少,但其灌水均匀性与常规灌溉没有显著差异。

关键词:交替隔沟灌溉;土壤水分;灌水均匀性

## Soil Water Distribution and Irrigation Uniformity of Alternative Furrow Irrigation

PAN Ying-hua<sup>1</sup>, KANG Shao-zhong<sup>2</sup>, DU Tai-sheng<sup>2</sup>, YANG Xiuying<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling

712100; <sup>2</sup> Key Lab of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Northwest Sci-Tech University

of Agriculture and Forestry, Yangling 712100; <sup>3</sup> Wuwei Institute of Water Conservancy, Wuwei 733000)

Abstract: The field experiment on the characteristics of spatio-temporal distribution of soil water and the uniformity of alternative furrow irrigation was conducted in Gansu Province, with Maize as the material. The results showed that alternatively drying and wetting furrows during the growing season could enhance adsorptive ability of root system. As there was no zero flux field between irrigated furrows and non-irrigated furrows, the lateral infiltration of water was increased obviously and the probability of deep percolation was hence decreased.

Key words: Alternative furrow irrigation; Soil water; Irrigation uniformity

干旱缺水是我国干旱和半干旱地区面临的主要问题,在这些地区,农业生产在很大程度上依赖于灌溉条件的发展。如甘肃河西民勤沙漠绿洲区,农田灌溉多采用传统的沟灌和畦灌形式,即使有滴灌和喷灌等节水灌溉设备,由于经济条件和社会条件的限制,只能用于蔬菜、果树以及花卉等经济价值较高的作物或产业中,很少用于大田农作物的生产。强烈的蒸发和大风天气也使喷灌技术的应用受到很大程度的限制。而传统的灌水方式存在着灌溉水利用率低、浪费严重等问题,这种情况使本已严重缺乏的水资源更受到严重的威胁。因此,在现有条件下,对

传统的灌溉方式进行改进,人为调控水量的分配,是提高水分利用效率、节约水资源的一条较好的途径。

控制性根系分区交替隔沟灌溉是一种灌水新技术,它是对传统沟灌方式的一种改进<sup>[1]</sup>。同近年来兴起的喷灌、微灌等灌水技术相比,具有投资少、技术容易掌握等优点,在大田大面积灌溉中有着广阔的应用前景。在人工气候室盆栽和大田试验条件下对其进行研究的结果表明,控制性交替隔沟灌溉可以促进根系的总量和根冠比增加,根系分布均匀。同传统的沟灌(常规灌溉)相比,灌溉水利用效率明显提高,节省水量达33.3%以上<sup>[2-4]</sup>。

收稿日期:2001-06-11

基金项目:国家杰出青年科学基金(49725102)和国家重点基础研究学科发展规划资助项目(GI99011708)

作者简介:潘英华(1973-),女,黑龙江讷河人,在职博士生,主要从事水土保持与土壤侵蚀研究工作。Tel:029-7033579(H),029-7015048(O);

E-mail:yhpan@ms.iswc.ac.cn

本研究的目的是探讨控制性根系分区交替隔沟灌溉的土壤水分的时空分布特性和灌水均匀性,以了解其土壤水分入渗、玉米生育期内土壤水分的动态变化情况,为分析其减少灌水量和提高水分利用效率的基本原理提供试验依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区自然地理状况

试验区位于甘肃河西民勤小坝口试验站,东经 103°03',北纬 38°05',属干旱地区。气候干燥,降雨量少,蒸发强烈,昼夜温差大,日照时间长。多年平均降水量在 110 mm 左右,且多为作物难以利用的无

效降雨,7~9 月的降水占全年降水的 60%,年蒸发量 2 644 mm,是降水量的 25 倍。日照时数 3 010 h 以上,大于 10℃的积温 3 147.8℃。地下水埋深为 13~18 m。

### 1.2 土壤性状

试验区土质为砂壤土,有机质含量中等,1 m 土层内田间持水量为 22.2%~23.5%(重量百分数),土壤剖面平均容重为 1.49 g/cm<sup>3</sup>。

利用压力膜法测定试验区 1 m 土层内水分特征曲线。所得试验数据用数学模拟方法模拟得出结果(表 1)。

表 1 试验区土壤水分特征曲线拟合结果及比水容量表达式<sup>1)</sup>

Table 1 Simulated results of soil water characteristics curve and specific volume equation

层次 Layer (cm)	模拟方程式 Simulated equation S(θ)	相关系数 Correlation coefficient	比水容量 Specific volume C(θ)
0~20	$S(\theta) = 0.00007 \theta^{-4.1492}$	0.9182	$C(\theta) = 2774.356 \theta^{.1492}$
20~40	$S(\theta) = 0.00008 \theta^{-4.2679}$	0.9111	$C(\theta) = 2372.862 \theta^{.2679}$
40~60	$S(\theta) = 0.00008 \theta^{-4.4761}$	0.8672	$C(\theta) = 2282.646 \theta^{.4761}$
60~80	$S(\theta) = 0.00008 \theta^{-4.6423}$	0.9016	$C(\theta) = 2215.580 \theta^{.6411}$
80~100	$S(\theta) = 0.00009 \theta^{-4.9424}$	0.9877	$C(\theta) = 1869.802 \theta^{.9424}$
平均 Average	$S(\theta) = 0.00008 \theta^{-4.5474}$	0.9770	$C(\theta) = 2253.308 \theta^{.5474}$

<sup>1)</sup> S(θ)单位为 MPa, θ单位为 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, C(θ)单位为 1/cm S(θ): MPa, θ:cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, C(θ): 1/cm

### 1.3 试验设计处理

试验采用垄植沟灌的方法种植地膜玉米。沟断面采用梯形形式,沟深 30 cm,沟顶宽 60 cm,底宽 40 cm,垄顶宽 40 cm,沟长 62 m,单沟灌溉面积为 63 m<sup>2</sup>,沟底坡度为 0.4%。播种时间为 4 月 11~20 日,种植深度 2.5 cm,每垄种 2 行玉米,株距 12~13 cm,垄行距 25~30 cm,沟行距 70~75 cm。

试验设计 3 种灌水处理,分别为常规灌溉(CFI),即每条灌水沟都灌水的处理;固定隔沟灌溉(FFI),即在玉米生长季节内,始终只给相邻两灌水沟中的 1 条沟灌水;交替隔沟灌溉(AFI),即相邻灌水沟交替灌水,同一灌水沟在前后两次灌水中轮流湿润和干燥,本次灌水沟在下次灌水时设为非灌水沟,而本次非灌水沟在下次灌水时设为灌水沟。玉米生育期内灌水时间按生育期确定,累计灌水 7 次。灌水时间分别在苗期(5 月 30 日至 6 月 3 日)、拔节期(6 月 16~20 日)、大喇叭口期(7 月 1~5 日)、抽雄期(7 月 15~19 日)、抽穗期(7 月 29 日至 8 月 2 日)、灌浆中期(8 月 9~13 日)、乳熟前期(8 月 18~22 日)。

### 1.4 测定项目及方法

土壤含水率的测定,包括灌水前后含水率情况以及土壤含水率的动态变化。表层 0~20 cm 的土壤含水率采用烘干法测定,表层以下利用南京产 LN W-50 A 型中子水分仪测定。

3 种灌水方式中子管理深均为 110 cm,剖面上土壤水分的测定深度为 1 m,每 20 cm 为一层,分 5 层测定。为研究沿沟长方向含水率分布情况,将灌水沟每 10 m 设 1 个测定点,每个测定点处都埋设中子管。在灌水前沿沟长方向定点测量土壤含水率在剖面上的分布情况。灌水后水分入渗过程中,隔一定时间(1 h 或 2 h)利用中子水分仪测量各测点剖面上水分动态。水分入渗完成后,对土壤水分进行连续 3 d 的测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 春玉米生长季节内土壤水分变化状况

由图 1 中数据显示趋势可看出,对于常规灌溉和固定隔沟灌溉,灌水沟中土壤含水率变化表现为灌水前后的上升和下降的交替出现。常规灌溉垄上

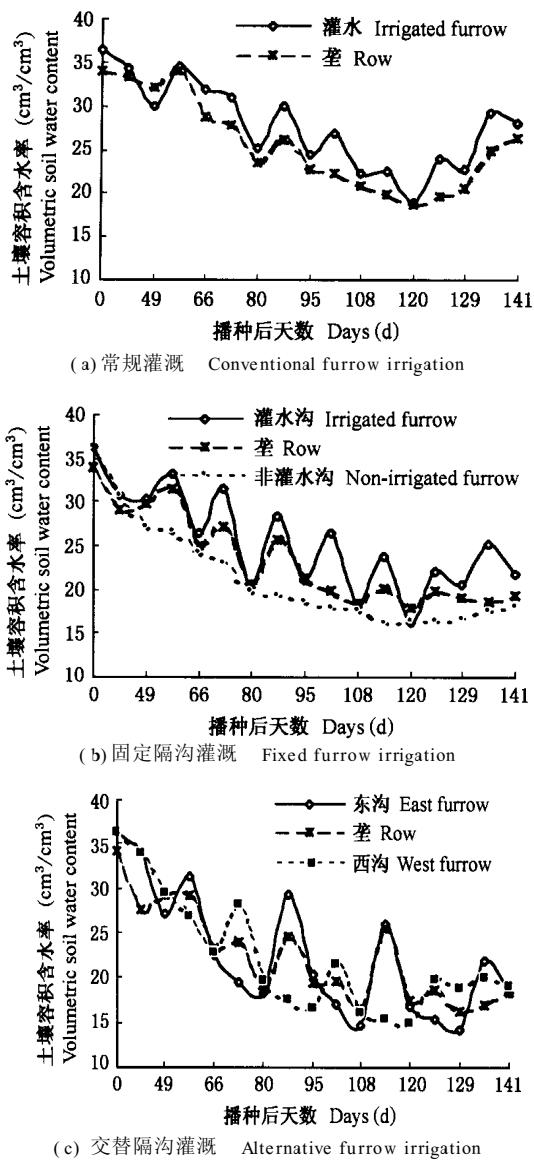


图 1 3 种灌水方式玉米全生育期内土壤水分的变化情况  
Fig.1 Soil water change of three irrigation systems during maize growth

的土壤含水率在整個生育期的前期呈现下降的趋势;固定隔沟灌溉垄上含水率的变化趋势与灌水沟的水分变化规律基本相同,也呈现含水率的上升和下降的交替出现,而非灌水沟中的含水率在整個生育期内呈现下降趋势;交替隔沟灌溉的灌水沟和非灌水沟在玉米生长期內土壤含水率均表现为交替上升和下降的趋势。另外,灌水沟与非灌水沟之間土壤含水率存在着明显的差异,由此推断其水分的侧向入渗比较明显。3 种灌水方式,在玉米生长后期,由于玉米趋向于成熟,植株耗水量相应减少,从而使土壤含水率略有上升(同玉米生长期为 120d 时的数据相比较)。

## 2.2 1 次灌水前后土壤水分变化

图 2 为玉米生长期內第 4 次灌水(7 月 16 日)前后所采集数据资料,描述的是 3 种灌水方式灌水前后土壤水分垂直方向的分布情况。从图中可以看出,灌水后,随着土壤水分的消耗,直到下一次灌水前,在交替隔沟灌溉的灌水沟和非灌水沟之間都存在着土壤水分的差值,即存在着水势差。这说明采

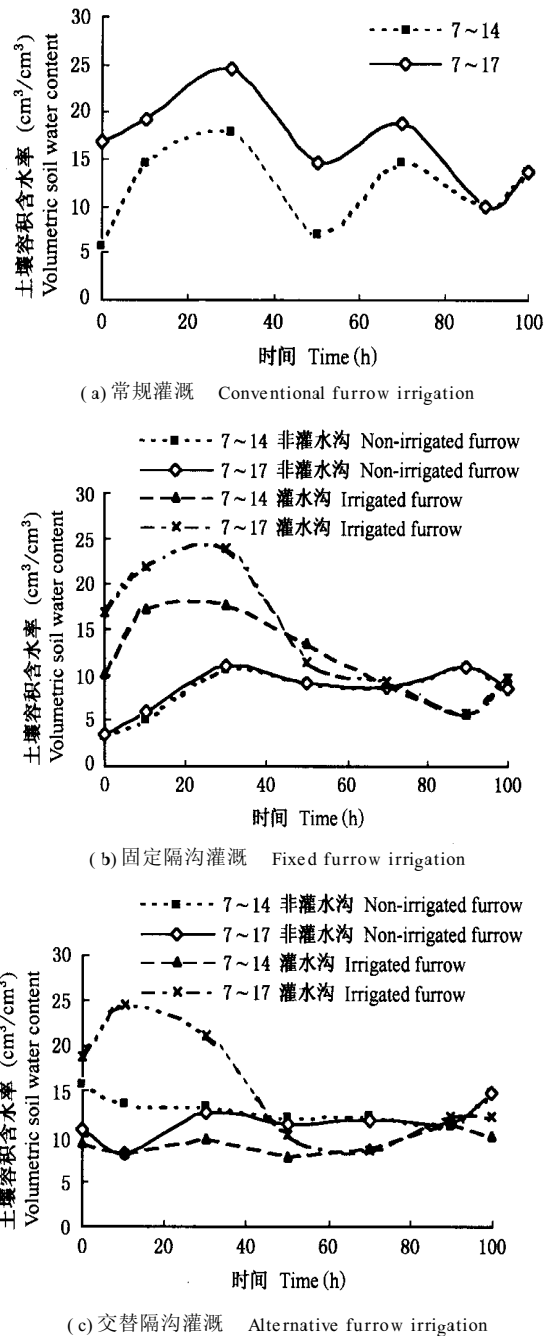


图 2 3 种灌水方式 1 次灌水前后土壤水分变化  
Fig.2 Soil water change of three irrigation systems before and after irrigation

用隔沟灌溉方式,可以保证作物根系一部分处于土壤含水率较高的湿润区,而另一部分处于土壤含水率较低的干燥区,使根系在整个生育期内都可经受一定程度的干旱锻炼,刺激根系的吸收补偿功能。

2.3 沿沟长方向土壤含水率分布情况

沿沟长方向土壤含水率分布情况由灌水均匀度表示,灌水均匀度采用克里斯琴森公式进行计算。公式形式为:

$$CU_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \bar{\theta}|}{N \bar{\theta}}$$

式中,  $CU_s$  为土壤含水率的克里斯琴森均匀度系数 (Christiansen uniformity coefficient);  $\theta_i$  为沿沟长方向各点的含水率,  $\bar{\theta}$  为沿沟长方向各点的平均含水率,  $N$  为沿沟长方向的测点数。

由表 2 可看出,采用交替隔沟灌溉对灌水均匀性没有影响,其灌水均匀性数值与常规灌溉相当。

表 2 3 种灌水方式各次灌水均匀度<sup>1)</sup>

Table 2 Uniformity of three irrigation systems

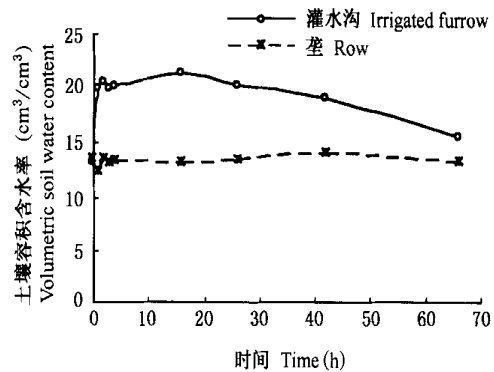
灌水日期 Date (d/ m)	灌水处理 Irrigation treatment	单沟灌水量 Irrigation use of each furrow (m <sup>3</sup> )	入沟流量 Inflow (m <sup>3</sup> /s)	灌水均匀度 Uniformity
17/6	CFI	1.86	0.95	0.85
	FFI	3.72	0.95	0.87
	AFI	3.72	0.95	0.88
2/7	CFI	1.86	0.95	0.83
	FFI	3.72	0.95	0.86
	AFI	3.72	0.95	0.88
16/7	CFI	1.86	0.95	0.86
	FFI	1.86	0.95	0.86
	AFI	1.86	0.95	0.87
30/7	CFI	1.86	0.95	0.85
	FFI	1.86	0.95	0.82
	AFI	1.86	0.95	0.85
10/8	CFI	1.86	0.95	0.88
	FFI	1.86	0.95	0.90
	AFI	1.86	0.95	0.93
19/8	CFI	1.86	0.95	0.89
	FFI	3.72	0.95	0.92
	AFI	3.72	0.95	0.91

<sup>1)</sup> 第 1 次灌水失败,故没有计算其灌水均匀度 Owing to the failure of the first irrigation, here is no data of its irrigation uniformity

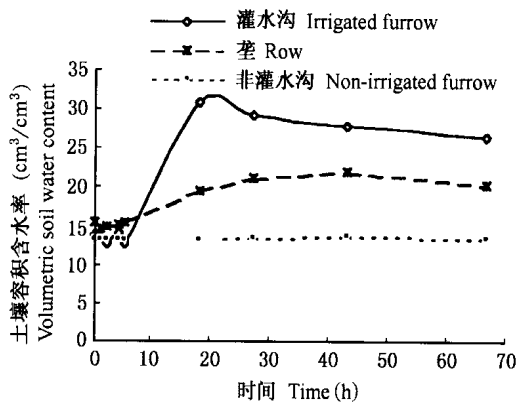
2.4 土壤水分动态变化

图 3 为 3 种灌水方式同一层次土壤水分的动态变化过程(7月14日~7月17日)。从图 3 可看出,对于 3 种灌水方式,同一层次土壤含水率随时间延

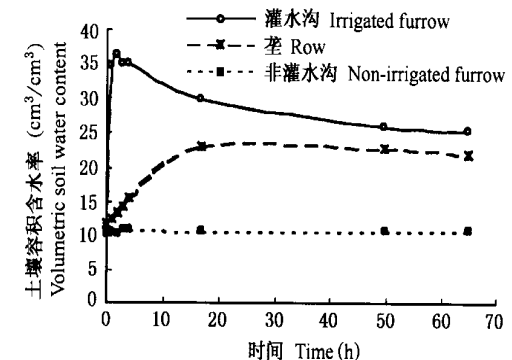
长有增大趋势。当灌水沟中水分入渗完毕后,由于植物根系的吸收、蒸发以及水分在土壤剖面上的再分布,含水率在达到一最大值后逐渐下降;在灌水沟、垄、非灌水沟之间由于含水率的差异,存在着水势梯度,水势梯度的存在使水分侧渗入垄中,利于植物对水分的吸收。常规灌溉垄上含水率变化微小,而固定隔沟灌溉和交替隔沟灌溉垄上含水率随时间延长有增大的趋势;交替隔沟灌溉与固定隔沟灌溉非灌水沟中含水率基本无变化,与灌水前沟中含水率基本保持在同一水平。



(a) 常规灌溉 Conventional furrow irrigation



(b) 固定隔沟灌溉 Fixed furrow irrigation



(c) 交替隔沟灌溉 Alternative furrow irrigation

图 3 剖面同一层次(Z=30cm)土壤水分动态

Fig.3 Soil water dynamic change of the same layer in the soil profile

### 3 结论

控制性交替隔沟灌溉灌水技术自提出以来,已进行了大量的室内和室外的研究工作。大田试验对其水分分布情况的分析研究表明,采用控制性交替隔沟灌溉技术,与常规灌溉相比,由于在玉米的整个生育期内都存在着土壤的干湿交替过程,可以使根系经受一定程度的干旱锻炼,从而提高其吸收功能,这也是交替灌溉概念提出的基本思路<sup>[1]</sup>;另外,由于在灌水沟和非灌水沟之间存在土壤含水率的差值,也促使土壤水分的侧向入渗能力增强;就其灌水均匀度而言,采用交替隔沟灌溉方式并不影响灌水均匀度。

另外,田间采用交替隔沟灌溉可提高作物的水分利用效率及光合速率,玉米产量不受影响,在获得相同产量的情况下,与常规灌溉相比,交替灌溉可节省约 1/3 的灌水量。相关资料见参考文献[5~7]。

#### References

- [1] Kang S Z, et al. The controlled alternative irrigation — A new approach for water saving regulation in farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 1 - 6. (in Chinese)  
康绍忠,等.控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路.干旱地区农业研究,1997,15(1):1 - 6.
- [2] Kang S Z, et al. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plants. *Agricultural Water Management*, 1998, 38: 69 - 76.
- [3] Liang Z S, et al. Effect of controlled roots-divided alternative irrigation on water use efficiency. *Transaction of CSAE*, 1997, 13(4): 58 - 64. (in Chinese)  
梁宗锁,等.控制性分根交替灌水节水效应.农业工程学报,1997,13(4):58 - 64.
- [4] Liang Z S, et al. Effect on water use efficiency and water saving by controlled root-divided alternative irrigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(5): 88 - 90. (in Chinese)  
梁宗锁,等.控制性分根交替灌水对作物水分利用率的影响及节水效应.中国农业科学,1998,31(5):88 - 90.
- [5] Kang S Z, et al. Soil water distribution, uniformity and water use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. *Irrigation Science*, 2000, 19: 181 - 190.
- [6] Kang S Z, et al. Alternate furrow irrigation for maize production in an arid area. *Agricultural Water Management*, 2000, 45: 267 - 274.
- [7] Pan Y H, et al. Irrigation water infiltration in furrows and crop water use of alternative furrow irrigation. *Transaction of CSAE*, 2000, 16(1): 39 - 43. (in Chinese)  
潘英华,等.交替隔沟灌溉水分入渗规律及其对作物水分利用的影响.农业工程学报,2000,16(1):39 - 43.

## 欢迎订阅 2003 年《中国生态农业学报》

《中国生态农业学报》是由中国科学院石家庄农业现代化研究所和中国生态经济学会主办的大农业学术期刊,本刊旨在探索与研究生态农业的理论、方法及研究进展等,推动学科发展,主要刊登生态学、生态经济学、农、林、牧、副、渔及资源与环境保护等领域创新的研究学术论文、研究技术报告(包括理论与应用研究、农业生态工程技术与实用生物技术、生物多样性保护、湿地保护、城镇绿地生态建设、无公害农产品生产技术、农业污染防治技术及农业可持续发展技术体系研究等方面)、研究简报及综述、生态农业建设和生态示范区典型模式与典型经验等,适于国内外从事生态学、生态经济学、农、林、牧、副、渔、资源与环境保护等领域科技人员、高等院校有关专业师生管理工作者和基层从事生态农业建设的广大技术人员等阅读与投稿。

国内外公开发行,国际刊号:ISSN 157 - 3990,国内刊号:CNI 3 - 1315/S,季刊,国际标准大 16 开本,每期定价 14.60 元,全年 58.40 元,自 2003 年由石家庄市报刊发行局改为北京报刊发行局发行,敬请广大读者订户届时从北京市报刊局发行目录中征订本刊(新邮发代号见《中国生态农业学报》2002 年第 3 期和第 4 期通知)。全国各地邮局均可订阅,漏订者可直接汇款至编辑部补订(若从编辑部补订全年需另加邮资 12.00 元)。

地址:050021 河北省石家庄市槐中路 286 号中国科学院《中国生态农业学报》编辑部,电话:0311-5818007, E-mail: editor@ms.sjzjam.ac.cn