

长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响

李世朋^{1,*}, 蔡祖聪¹, 杨 浩¹, 汪景宽²

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 沈阳农业大学, 沈阳 110161)

摘要: 采集沈阳农业大学棕壤定位实验站(1987 年设置)的土样, 测定土壤 pH、有机碳、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、微生物生物量碳、氮和 BIOLOG 碳源利用, 结合地上部分生物量, 系统分析了长期施肥与地膜覆盖对土壤肥力指标和微生物学性质的影响。结果表明, 传统栽培条件下, 土壤微生物群落平均吸光度(AWCD)与土壤有机碳含量、速效磷和有效钾显著相关($p < 0.01$), 表明施肥通过影响有机碳和速效磷、钾含量影响微生物功能。在覆膜栽培条件下, AWCD 与土壤 pH 和土壤碳氮比显著相关($p < 0.01$), 表明覆膜通过影响土壤 pH 和土壤碳氮比影响微生物功能。覆膜引起玉米生育期的变化, 影响有效碳的投入, 从而直接影响土壤微生物功能。与相应的传统栽培相比, 覆膜栽培后土壤 pH 的变化对微生物群落结构有一致影响。

关键词: 施肥; 地膜覆盖; 土壤性质; 微生物

文章编号: 1000-0933(2009)05-2489-10 中图分类号: S154.1 文献标识码: A

Effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties

LI Shi-Peng^{1,*}, CAI Zucong¹, YANG Hao¹, WANG Jing-Kuan²

1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China

2 Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2489 ~ 2498.

Abstract: Soil samples were collected from a long-term experiment site located at Shenyang Agricultural University initiated from 1987 and soil pH, organic carbon, total nitrogen, hydrolysable nitrogen, Olsen-P, available potassium, microbial biomass carbon and nitrogen, and average well color development (AWCD) of BIOLOG GN plate were analyzed to examine the complex effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties. Results showed that under conventional cultivation, microbial function indicated by AWCD was affected by fertilization through its impacts on soil organic carbon, Olsen-P and available potassium contents, indicated by the significant correlations between AWCD and these indices ($p < 0.01$). Compared to conventional cultivation, plastic film covering cultivation stimulated maize development and aboveground biomass, and changed soil pH and C/N ratio. Under the plastic film covering cultivation, AWCD was correlated significantly with soil pH and C/N ratio ($p < 0.01$), but not significantly with soil organic carbon and Olsen-P contents ($p > 0.05$), indicating that plastic film covering affected microbial function through its impacts on soil pH and C/N ratio.

Key Words: fertilization; plastic film covering; soil property; microbial

作为中国推广最快、增产效果最大的农业工程项目之一, 地膜覆盖栽培明显的保水增温效应促进了粮食

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40621001)

收稿日期: 2008-01-22; 修订日期: 2008-05-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: spli@issas.ac.cn; spli2003@yahoo.com.cn

增产,在提高经济效益的同时,也为我国的粮食安全做出了很大贡献。据预测,在地膜覆盖率小于 15% 的县域,只要地膜覆盖率提高 5 个百分点,中国粮食总产量就能增加 432.85 万 t^[1],对中国粮食增产起重要作用。但是,地膜覆盖栽培在增产增效的同时,也促进作物对土壤养分的吸收,地力消耗大为增加^[2,3],并影响土壤微生物群落结构与活性^[4],从而影响养分循环,因此,覆膜栽培条件下土壤的可持续利用就显得尤为重要。目前,国外关于长期施肥和地膜覆盖影响土壤的研究比较少,而我国的研究较多,包括施肥和地膜覆盖条件下土壤温度、水分含量及其动态的观测,土壤微生物生物量碳氮、微生物群落结构和活性的动态变化,土壤碳、氮的转化以及土壤离子的变化^[2~9],但这些研究局限于单项或者少数土壤性质的研究,而施肥与地膜覆盖同时影响多个土壤性质^[10],而且不同性质之间还存在相互作用^[11],因此,很有必要研究地膜覆盖对土壤性质的复合影响,揭示地膜覆盖与施肥影响土壤性质的机理。本文研究了沈阳农业大学的长期定位试验站土壤肥力指标和微生物学指标之间的内在联系,为覆膜栽培条件下土壤的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

土壤采自沈阳农业大学土壤肥力长期定位试验站(北纬 41°49',东经 123° 34'),该站土壤为发育在黄土性母质上的壤质棕壤。试验设置于 1987 年,连作玉米,试验设地膜覆盖栽培和传统栽培 2 组,3 次重复,随机排列。每年 4 月 25 日左右施肥、播种、覆膜,按传统进行田间管理,9 月 25 日左右收获。取其中的 12 个处理,包括对照(CK)、氮肥(N4)、氮肥磷肥配施(N4P2)、有机肥(M4)、有机肥配施氮肥(M2N2)、有机肥氮肥磷肥配施(M2N2P1)及相应的覆膜处理(表 1)。氮肥为尿素,磷肥为磷酸二铵,有机肥为猪厩粪。除对照外,其余处理施氮量相同,等氮量由尿素和磷酸二铵平衡实现。历年的有机肥含氮量为 10~15 g kg⁻¹,有机碳含量为 120~150 g kg⁻¹。样品于 2004 年 8 月 15 日(玉米灌浆期)采集,装入无菌塑料袋带回实验室,过 2mm 筛后置于冰箱内 4℃ 保存,于 7 d 内测定微生物 BIOLOG 吸光值。

表 1 试验土壤处理

Table 1 Description of the treatment

处理 Treatment	化肥氮用量 Inorganic N (kg hm ⁻²)	化肥磷用量 Inorganic P (kg hm ⁻²)	有机氮用量 Organic N (kg hm ⁻²)	总施氮量 Total N (kg hm ⁻²)
CK	0	0	0	0
CK-C*	0	0	0	0
N4	270	0	0	270
N4-C	270	0	0	270
N4P2	270	135	0	270
N4P2-C	270	135	0	270
M4	0	0	270	270
M4-C	0	0	270	270
M2N2	135	0	135	270
M2N2-C	135	0	135	270
M2N2P1	270	0	0	270
M2N2P1-C	270	0	0	270

* C 为地膜覆盖处理 Covered with plastic film

1.2 实验方法

1.2.1 土壤性质测定

土壤 pH(土:水=1:2.5)、有机碳、全氮、速效氮(碱解法)、Olsen 磷、速效钾(乙酸铵提取),具体测定方法参见《土壤农化分析》^[12]。微生物生物量碳氮采用氯仿熏蒸提取测定^[13]。

1.2.2 微生物群落底物利用测定(BIOLOG 法)

称取 10 g 鲜土置于 100 ml 0.1 mol·L⁻¹ 磷酸缓冲液中,振荡 20 min,静置 25 min,在超净台上稀释为 1000

倍。用加样器向 BIOLOG GN 盘的 96 孔板各孔中加入 150 μl 稀释后的悬液。25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养,每 12 h 用 BIOLOG 读板仪读取 590 nm 波长下的光吸收。每个样品 3 个重复。采用培养 48 h 的数据。

1.2.3 实验数据分析方法

数据用 SPSS 11.5 统计软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力性质

传统栽培条件下,只有 M4 处理在多年种植玉米后保持土壤 pH(6.39)与试验开始时相同,其余处理土壤 pH 都不同程度地降低,N4 处理降低最大(表 2)。与相应的传统栽培处理相比,CK 与 N 处理的土壤 pH 覆膜后升高,其余处理下降。植物吸收、酸沉降和施肥是土壤 pH 降低的主要原因^[14,15]。由于正常降水在引起土壤中阳离子净损失的同时也减少了活性酸,不会导致土壤 pH 降低^[16],而沈阳降水的平均 pH 高于 6.5^[17],不大可能引起土壤酸化,据此推断,各处理土壤 pH 的降低主要是植物吸收和施肥造成的。传统栽培条件下 N 处理生物量与 NP 处理接近(表 2),而土壤 pH 却最低,表明除了植物吸收以外,氮肥造成的土壤酸化加剧对土壤阳离子损失^[18]可能起一定作用。有机肥各处理的土壤 pH 都较高,M4 处理甚至保持了与试验设置前相同的土壤 pH,这主要是因为猪厩肥中丰富的矿物质,对植物吸收带出的阳离子起一定补充作用,延缓了土壤酸化^[19],表明有机肥具有延缓土壤酸化的作用。CK-C 与 N4-C 处理生物量高于相应传统栽培,其土壤 pH 分别低于相应传统栽培,这应该是覆膜后水分运移的改变造成的,因为实验条件下覆膜虽然降低了土壤棵间蒸发^[20],但在田间不灌水的条件下,地膜覆盖与否对土壤蒸散量的影响不大^[21,22],反而促进深层水向表层富集^[7,23],带来了可溶性盐基离子,而覆膜又降低了淋溶,使盐基离子在表层土壤积累^[6,24],造成土壤 pH 升高。CK-C 处理的土壤 pH 甚至比试验设置前还高,可能与生物量较小有关。覆膜栽培其他 4 个处理的土壤 pH 降低主要归因于生物量的大幅度增加。

表 2 各处理地上部分生物量平均值与土壤肥力性质

Table 2 Average aboveground biomass and chemical properties of treatments

处理 Treatment	生物量* Biomass (t hm^{-2})	pH	有机碳 SOC (g kg^{-1})	全氮 TN (g kg^{-1})	土壤 碳氮比 C/N	碱解氮 Hydrolysable N (mg kg^{-1})	速效磷 Olsen-P (g kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})
CK	11.6 a	6.14 h	9.27 c	1.36 a	6.82 fg	90 a	19.3 a	90.3 d
CK-C	12.0 a	6.49 k	9.59 d	1.34 a	7.16 h	97 ab	28.3 ab	74.3 b
N4	15.8 b	5.05 a	8.50 a	1.43 b	5.94 e	158 e	14.2 a	57.9 a
N4-C	16.2 b	5.44 d	9.69 e	2.20 f	4.40 b	199 fg	49.2 ab	82.2 c
N4P2	15.9 b	5.25 c	9.11 b	1.36 a	6.70 f	114 bc	24.2 ab	61.8 a
N4P2-C	18.3 bcd	5.16 b	9.63 de	2.65 h	3.63 a	374 h	56.0 b	86.3 cd
M4	18.4 bcd	6.39 j	16.86 j	2.30 g	7.33 h	189 f	245 ef	456 i
M4-C	21.0 d	5.94 g	10.32 f	1.93 d	5.35 c	135 d	110 c	184 f
M2N2	17.1 bc	6.24 i	16.16 h	2.35 g	6.88 fg	213 g	232 e	509 j
M2N2-C	20.1 cd	5.80 f	9.70 e	1.77 c	5.48 cd	107 ab	89 c	115 e
M2N2P1	18.7 bcd	6.14 h	16.28 i	2.33 g	6.99 g	196 fg	266 f	433 h
M2N2P1-C	20.1 cd	5.66 e	11.23 g	2.02 e	5.56 d	127 cd	156 d	210 g
平均值 Mean	17.1	5.81	11.36	1.92	6.02	167	107	197
标准差 SD	2.9	0.47	3.0	0.44	1.12	75.0	90.3	164
变异系数 CV (%)	16.8	8.1	26.4	23.0	18.6	45.0	84.2	82.6

* 生物量:地上部分生物量 1987~2003 年的平均值 Biomass; Mean value of aboveground biomass from 1987 to 2003; 同一列中字母相同表示数据差异不显著($n=3$, $P < 0.05$); The data in the same column with the same letter indicate no significance among treatments ($n=3$, $P < 0.05$); 下同 the same below

传统栽培条件下,与对照相比,除了 N4 处理外,其他施肥处理都增加了土壤有机碳(SOC)。与相应的传统栽培处理相比,覆膜条件下施用有机肥的处理 SOC 都降低,其他处理 SOC 都增加。耕地中,SOC 是土壤质量和农业可持续性最重要的指标,对土壤的物理、化学和生物指标都有影响^[25],但是长期化肥试验对不同地

点 SOC 的作用不一致^[26,27]。本研究中 N 处理 SOC 的降低可能与投入减少和矿化增加有关,因为同一试验地中氮肥降低了玉米根系生物量^[28],导致有机碳的投入减少;同时,由于 N 加剧植物其他必需养分的缺乏,导致玉米根分泌物对土壤原有机质矿化的激发作用更大^[29],从而可能降低 SOC。这支持了根系对 SOC 的影响比根际沉积更大的观点^[30],也与相似土壤上的研究结果一致^[31]。NP 处理的 SOC 低于 CK 可能与矿化增加有关。传统栽培施用有机肥的处理 SOC 都显著升高,这一方面归因于有机肥中的有机碳分解不完全^[5],另一方面也与有机肥处理的玉米根系生物量增加引起的有机质投入增加有关^[28]。这与中国徐州和美国东南部的研究结果一致^[26,32]。覆膜后施用有机肥的处理 SOC 都低于相应传统栽培,这可能是覆膜后水热状况引起的微生物活性增强导致矿化增加所致^[4,5];覆膜后其他 3 个处理的 SOC 都高于相应传统栽培处理,这与相同地块根系生物量的增加一致^[28],表明在覆膜条件下,根系生物量投入的碳增加对维持 SOC 有重要贡献。

传统栽培条件下,无论施用有机肥还是化肥都显著增加了全氮(TN)和碱解氮(HN)含量。与相应的传统栽培处理相比,覆膜后施用化肥的处理 TN 升高,其他处理 TN 都降低;而 HN 含量则是覆膜后有机肥处理降低,其他处理增加。传统栽培条件下,施用有机肥和化肥都促进了 TN 升高,但是有机肥处理的 TN 比化肥处理要高 50% 以上,这是由于不同处理的氮收支差异造成的。农田生态系统中,氮的主要支出是作物吸收带出、淋失和氨挥发^[33,34],而猪粪肥的氨挥发损失一般低于尿素^[35,36],而本试验站中,在等氮量条件下,有机肥处理的玉米吸氮量低于化肥处理^[2],而土壤剖面中硝态氮在玉米生长的大部分时期都低于化肥处理^[37],这使得有机肥处理的土壤氮素损失整体上大大低于化肥,引起土壤氮增加比化肥处理较多。这表明,传统栽培条件下,有机肥促进植物生长的同时也提高了土壤 TN,既增产又环保,是农业可持续发展的一项有效措施。由于覆膜后化肥处理的玉米吸氮量高于相应的传统栽培,而且表层的淋洗损失也较高^[2,37],因此,覆膜后化肥处理的 TN 高于相应的传统栽培,应该是覆膜后氮肥的挥发损失减少造成的;CK 处理 TN 降低主要是吸收增强所致,而有机肥的 3 个处理 TN 降低则受淋溶和吸收加强的影响^[2,37]有关。即使对照处理的生物量与籽粒产量都呈波动式增加^[38],对照处理的 TN 也比试验开始时(1.0 g kg^{-1})有所增加,这是很意外的发现,由于本试验地是雨养农业,没有灌溉水带入的氮,而不施肥处理每年由生物吸收带出的 N 高达 50 kg hm^{-2} 以上^[2],但通过降水补充的 N 为每年仅为 20 kg N hm^{-2} 左右^[39],那么, TN 的增加很可能来自生物固氮,因为在大尺度水平上,农田中生物固氮量甚至高于肥料氮投入^[40]。碱解氮(HN)是国内长期应用的土壤供氮指标,由于生育期内玉米吸收导致土壤碱解氮下降^[41],传统栽培化肥处理的 HN 增加幅度较有机肥小,可能与化学氮肥进入土壤后迅速转化^[42]后损失较多有关;有机肥各处理的 HN 大幅度增加,表明施用有机肥可以大大增加植物容易利用的氮储量。与相应的传统栽培处理相比,覆膜后土壤碱解氮含量变化的原因主要有两方面:一是氮损失降低和有机氮矿化增加^[9],二是生物量增加引起氮吸收增加,前者引起碱解氮含量增加,后者相反。覆膜后化肥处理的土壤碱解氮含量增加可能受氮损失降低的影响更大,因为生物量增加幅度不大,而有机肥处理的土壤碱解氮含量降低可能受生物量增加的影响更大,因为有机肥各处理的生物量在覆膜后幅度增加较大。这表明土壤碱解氮含量受到矿化、吸收和损失的复合影响。

与对照相比,传统栽培条件下施用化肥降低了土壤 C/N 比,施用有机肥增加了 C/N 比。与相应的传统栽培处理相比,覆膜后除了对照处理的 C/N 比升高以外,其他处理的 C/N 比都降低。对于特定的土壤,其 C/N 比基本是一个常数^[43],而本研究结果表明,施肥与地膜覆盖对土壤 C/N 比的影响还是比较大的(变异系数达 18.6%),尤其是地膜覆盖。传统栽培化肥处理的 C/N 比低于对照主要是 SOC 降低所致;有机肥处理的 C/N 比高于对照可能与有机肥的碳氮比较高,而有机肥当年的分解不完全^[5]有关。对照处理覆膜后 C/N 比升高,是根系投入的有机质增加与植物吸 N 量增加共同导致,化肥处理覆膜后 C/N 比降低主要是 N 增加所致(TN 增加 50% 以上, SOC 增加小于 15%),而有机肥处理则主要是 SOC 减少所致(SOC 下降 30% 以上, N 含量降低于 25%)。这表明化肥处理的覆膜效应主要是 N 的损失降低,而有机肥处理的覆膜效应主要是 SOC 的矿化增加。

除 N4 处理以外,传统栽培其他处理的有效磷(OP)含量都比对照高,有机肥各处理 OP 含量增加较大。

与相应的传统栽培处理相比,覆膜后有机肥处理 OP 含量降低,其他处理升高。传统栽培条件下,化肥处理土壤有效钾(AK)含量降低,尤其是 N4 处理;有机肥处理的土壤 AK 含量升高。与相应的传统栽培处理相比,覆膜后化肥处理土壤的 AK 含量升高,其余处理降低。传统栽培长期施氮肥对速效磷(OP)的影响不是很大,施用磷肥导致 OP 增加 1 倍以上,而有机肥处理 OP 增加 10 倍以上,充分表明了有机肥对土壤磷素肥力的巨大效果。覆膜后化肥处理土壤 OP 含量高于相应传统栽培,这很可能与覆膜后水热条件改善导致的磷活化有关,尤其是土壤温度的提高可能对 OP 含量增加起主要作用,因为即使在短时间的提取过程中,温度都对 OP 含量有明显影响^[44]。有机肥处理覆膜后 OP 含量大幅降低可能主要由植物吸收速效磷所致,因为玉米在生长期的吸收会引起 OP 的降低^[41]。速效钾(AK)包括水溶性钾和交换性钾两种形态,传统栽培化肥处理的土壤 AK 含量降低,主要原因是化肥促进生物量增加,引起钾的吸收增加所致。但 N4 处理的生物量低于氮磷处理,而速效钾反而低于氮磷处理,这很可能是由于氮肥导致土壤酸化,从而促进了钾淋溶损失^[14,18]。由于有机肥中钾含量丰富^[19],有机肥各处理的生物量虽然增加很大,这些处理的 AK 含量也都大大增加,表明有机肥的补钾作用很大。其他长期定位也有相似结果^[45]。与相应的传统栽培处理相比,覆膜后化肥处理土壤 AK 含量升高,其余处理降低。化肥处理覆膜后土壤 AK 含量升高很可能是水分运动^[6,20]和植物吸收双重作用的结果。但长期定位施肥会引起不同形态钾的动态转化^[45],因此覆膜后化肥处理更高的速效钾含量到底是哪一种机理还有待于进一步研究。有机肥各处理覆膜后 AK 含量下降与各处理覆膜后表土 pH 降低相对应,表明生物量增加导致的吸收增加起主导作用。

2.2 土壤生物学性质

传统栽培条件下,N4 处理土壤微生物生物量碳(MBC)、氮(MBN)含量降低幅度最大(表3),N4P2 处理 MBC 降低,而 MBN 增加;有机肥各处理的 MBC 与 CK 基本持平或有所增加,而 MBN 则增加 1 倍以上。与相应的传统栽培处理相比,CK-C 处理 MBC 显著降低,而 MBN 稍有增加,N4-C 处理的 MBC 和 MBN 覆膜后增加,其他处理的 MBC 和 MBN 覆膜后都显著降低。传统栽培条件下,CK 与 N4 处理的微生物生物量 C/N 比显著高于其他 4 个处理,有机肥各处理的微生物生物量 C/N 比很接近。与相应的传统栽培处理相比,CK-C 与 N4-C 处理的微生物生物量 C/N 比显著降低,M2N2P1-C 处理的微生物生物量 C/N 比升高幅度最大,其他处理的微生物生物量 C/N 比略有升高。传统栽培条件下,AWCD 与 SOC 的相关系数最高($r = 0.985$, $P < 0.001$),其次是 OP($r = 0.974$, $P = 0.001$)和 AK($r = 0.956$, $P = 0.001$);氮肥降低了微生物群落对

表 3 试验处理土壤的微生物指标

Table 3 Microbial parameters of treatments

处理 Treatment	微生物碳 MBC* (mg kg ⁻¹)	微生物氮 MBN (mg kg ⁻¹)	微生物 C/N 比 Rcnm	平均吸光值 AWCD
CK	112 i	5.8 bc	19.4 f	0.42 def
CK-C	60.9 f	7.0 c	8.71 d	0.53 f
N4	47.7 d	2.5 a	19.1 f	0.39 def
N4-C	55.4 e	9.7 d	5.72 a	0.11 ab
N4P2	71.5 g	11.5 e	6.22 ab	0.47 ef
N4P2-C	21.9 a	3.0 a	7.30 c	0.02 a
M4	107 h	14.4 f	7.46 c	0.78 g
M4-C	33.1 b	3.5 a	9.46 d	0.35 de
M2N2	145 k	20.5 h	7.14 c	0.69 g
M2N2-C	41.6 c	5.5 b	7.56 c	0.29 cd
M2N2P1	119 j	17.6 g	6.74 bc	0.71 g
M2N2P1-C	105 h	6.5 bc	16.1 e	0.17 bc
平均值 Mean	76.7	9.0	10.1	0.41
标准差 SD	37.8	5.7	4.85	0.23
变异系数 CV (%)	49.3	63.1	48.1	56.3

* MBC: microbial biomass carbon; MBN: microbial biomass nitrogen; Rcnm: ratio of microbial biomass carbon to nitrogen; AWCD: average well color development

BIOLOG 碳源的利用(AWCD), NP 处理的 AWCD 稍有增加, 有机肥处理的 AWCD 大幅度增加。覆膜栽培条件下, AWCD 与 SOC 的相关不显著($r = -0.107$, $P = 0.420$), 而与土壤 pH 的相关性最高($r = 0.990$, $P < 0.001$), 其次是土壤 C/N 比($r = 0.929$, $P = 0.004$)。与相应的传统栽培处理相比, 覆膜后仅 CK-C 处理的 AWCD 增加, 其余处理显著降低。

传统栽培条件下有机肥各处理的微生物量碳(MBC)都高于化肥处理, 表明有机肥对保持微生物量有良好作用。玉米农田中 MBC 主要来自玉米残体^[46], 表明根系及其分泌物的生物有效性较高, 由于高肥力土壤中玉米根系在开花期达到高峰, 而低肥力土壤中在灌浆期达到高峰^[47], 因此, 对照处理的 MBC 高于 M4 处理, 很可能是不同肥力影响玉米根系生长动态造成的, 这与本研究取样时期在玉米灌浆期对应。传统栽培条件下有机肥处理的 MBN 含量较高, 可能是因为农田生态系统中 MBN 主要来自于土壤和有机肥, 而化肥氮对 MBN 的贡献较小, 同时, 施用有机肥的处理有机碳更丰富, 对氮的竞争能力更强^[48]。覆膜后, 除对照与氮肥处理以外, 矿化加强可能是其他处理 MBC 和 MBN 都下降的原因, 这与张成娥等在黑垆土上的研究结果一致^[49]。传统栽培条件下 AWCD 与 SOC、OP 和 AK 的相关较高, 表明 SOC、OP 和 AK 是决定微生物群落底物利用的重要因素; 而覆膜条件下 AWCD 与土壤 pH 和 C/N 比的相关性较高, 表明覆膜条件下微生物功能主要受土壤酸碱性和 C/N 比影响。传统栽培条件下, AWCD 与土壤有机碳的相关性最高, 表明有机碳是影响微生物功能的最重要因素; 而覆膜栽培条件下, 除了对照之外, 其余各处理以 AWCD 表征的土壤功能都显著低于相应的传统栽培处理, 而 N4-C 和 N4P2-C 处理的有机碳含量分别高于 N4 和 N4P2 处理, 由此推断, 生物有效性碳, 而不是有机碳总量, 是影响微生物功能的关键因素。土壤有机碳含量较高的 3 个有机肥处理在覆膜后 AWCD 显著降低, 表明覆膜后微生物转化功能总体上高于传统栽培, 由此推断, 覆膜后土壤呼吸强度在玉米生育期大多低于传统栽培^[4]可能是生物有效性碳耗竭引起的假象。

真菌的碳氮比一般比细菌高^[50,51], 而且土壤微生物 C/N 比与 PLFA 显著相关^[52], 表明微生物量碳氮比可粗略的表征微生物群落结构。传统栽培条件下对照与氮肥处理的微生物量 C/N 比远高于其他处理, 表明真菌占优势, 这与传统耕作土壤中微生物群落以细菌占优势^[53]的现象不同, 这很可能是由于这两种处理的土壤肥力与水分含量较低有关, 尤其是有效氮、磷严重不足, 因为真菌的竞争能力在养分贫乏的条件下比细菌更强^[54], 而且对较低水分的适应性也强于细菌^[55], 其他研究也发现在肥力较低的土壤中, 真菌的比例较高^[56]。覆膜后对照和氮肥处理的微生物量 C/N 比显著低于传统栽培, 与有效氮、磷的增加相对应。另外, 覆膜与相应的传统栽培处理相比, 较高的微生物量 C/N 比与较低的土壤 pH 表现出一致的对应, 表明 pH 较高的土壤中细菌的比例较高, 表明土壤 pH 对试验地微生物群落结构也有一定影响。

覆膜后对照和氮肥处理的 MBC、MBN 和 AWCD 的反常变化, 除了受矿化的影响外, 玉米生物学特性的变化可能更重要。由于微量有效碳的加入就会引起微生物底物利用的迅速增加^[57], 所有覆膜处理中对照的 AWCD 最高而 SOC 却最低的事实表明, 有效碳的投入是最可能的原因。由于对照处理的碳投入主要靠死亡根系和根际沉积, 采样时期处于玉米吐丝灌浆期, 是玉米根系衰亡量最大的时期^[58,59], 而春玉米覆膜后吐丝期提前 12d^[60], 这可能会使土壤中有效碳的含量大大增加, 从而引起微生物对有效碳的响应, 导致覆膜对照和氮肥处理的 MBC、MBN 和 AWCD 比较反常。这也支持了活体植物直接影响通过微生物进行的 C 流通的理论^[61], 这揭示了覆膜改变微生物功能的一种可能机理: 覆膜通过影响玉米生物学特性的方式影响微生物结构及其功能。

3 讨论

鉴于我国人多地少的国情, 地膜覆盖栽培在我国的普及不但提高了经济效益, 也对我国的粮食安全起到重要的保障作用, 但关于地膜覆盖栽培的研究, 尤其是长期定位系统的研究还不是很多, 这对推广这项技术造成了一定制约。本研究表明, 长期施肥和覆膜对土壤肥力指标和微生物学性质存在复合作用。长期施用化肥与有机肥在传统栽培和覆膜栽培情况下对土壤 pH 的影响正好相反: 传统栽培情况下施用化肥降低了土壤 pH, 施用有机肥则可以延缓甚至避免土壤酸化; 但在覆膜栽培情况下, 由于土壤水分和盐基离子的运动方向

发生了改变,施用化肥导致表层土壤 pH 高于传统栽培,施用有机肥则由于矿化和吸收增强导致表层土壤 pH 低于传统栽培。施用有机肥无论在传统栽培还是在覆膜栽培情况下都降低了土壤氮素的损失,是一种可持续发展的管理措施。综合来看,覆膜和不同施肥引起的土壤化学性质和养分状况变化影响了微生物群落结构和功能:传统栽培条件下施肥主要是通过影响 SOC 和速效养分(OP 和 AK)影响微生物功能,覆膜栽培条件下主要是通过影响土壤 pH 和 C/N 比影响微生物功能。与相应的传统栽培相比,覆膜栽培后土壤 pH 的变化对微生物群落结构有一致影响。另外,覆膜对玉米生物学进程的影响改变了有效碳投入,直接影响微生物功能。

4 结论

长期施肥和覆膜对土壤性质有复合作用。长期不同施肥和覆膜改变了土壤 pH、养分状况和玉米发育动态,从而影响了微生物群落的结构功能:(1)传统栽培条件下,施肥通过影响土壤有机碳和速效磷、钾来影响微生物功能;(2)覆膜栽培条件下,施肥通过影响土壤 pH 和土壤碳氮比来影响微生物功能;(3)与传统栽培相比,覆膜栽培后土壤 pH 的变化对微生物群落结构有一致影响,较高的土壤 pH 对应较高的细菌比例;(4)覆膜改变了玉米生物学进程,影响有效碳的投入,直接影响了微生物功能。

References:

- [1] Wang X F, Chen B M, Bi J Y. Analysis of potential of grain yield increase under film-mulching condition on a county scale. Transactions of the CSAE, 2005, 21 (11): 146—149.
- [2] Zhang J H, Wang J K, Xu X C, *et al.* Effect of manure on soil nitrogen and biomass of maize under plastic-film mulching cultivation. Chinese Journal of Soil Science, 1990, 21: 162—165.
- [3] Zhang J H, Wang J K, Xu X C, *et al.* Effect of manure on phosphorus uptake by maize and soil phosphorus fractions under plastic-film mulching cultivation. Chinese Journal of Soil Science, 1990, 21: 211—215.
- [4] Chen X S, Guo S F, Wang J K, *et al.* Effect of mulching cultivation with plastic film on soil microbial population and biological activity. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9: 435—439.
- [5] Wang J K, Zhang X D, Zhang J H, *et al.* Effects of covering with plastic film on decomposition of organic materials and characteristics of soil organic matter. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1 (3-4): 22—28.
- [6] Zu R, Wang J K, Zhang J H, *et al.* Effect of plastic film mulching on ion balance in brown earth. Journal of Shenyang Agricultural University, 1995, 26: 408—411.
- [7] Liu S G, Fu S F, Wang J K, *et al.* Effect of long-term covering with plastic film on dynamic changes of soil water in brown earth. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37: 725—728.
- [8] Wang J K, Liu S G, Li S Y. Effect of long-term plastic film mulching and fertilization on inorganic N distribution and organic N mineralization in brown earth. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20 (6): 107—110.
- [9] Yu S, Wang J K, Gao Y M. Effect of plastic mulching and different fertilization treatments on soil microbial biomass carbon and nitrogen. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37: 602—606.
- [10] Zhang D G, Yan X Y, Bian X Z. Research on integrated effects of film mulching cultivation on maize seed product field. Journal of Maize Science, 6: 41—45.
- [11] Hou X J, Wang J K, Li S P. Effects of different fertilization and plastic-mulching on functional diversity of soil microbial community. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27: 655—661.
- [12] Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing. China Agricultural Press, 2000.
- [13] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19: 703—707.
- [14] McAndrew D W, Malhi S S. Long-term N fertilization of a solonchic soil: effects on chemical and biological properties. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24: 619—623.
- [15] Blake L, Goulding K W T, Mott C J B, *et al.* Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station, UK. European Journal of Soil Science, 1999, 50: 401—412.
- [16] Wu Y, Yang J H, Ci E. Effect of simulated continuously rainwater leaching on soil chemical character. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36: 206—210.
- [17] Xie W, Li C B, Jin Y M. Chemical composition analysis of precipitation in Liaoning Province. Environmental Protection Science, 1998, 24 (3):

- 13—15.
- [18] Haynes R J, Swift R S. Effects of soil acidification and subsequent leaching on levels of extractable nutrients of soil. *Plant and Soil*, 1986, 95: 327—336.
- [19] Dorado J, Zancada M C, Almendros G, *et al.* Changes in soil properties and humic substances after long-term amendments with manure. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166: 31—38.
- [20] Men Q, Li Y, Feng G P. Effect of plastic film mulch patterns on soil surface evaporation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22 (2): 17—20.
- [21] Chen Y X, Liu X Y. Studies on the dynamics and movement mechanism of soil water under cultivation with plastic mulching. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1997, 28: 283—287.
- [22] Wang J, Li F M, Song Q H, *et al.* Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14: 205—210.
- [23] Wang X Q, Li S X, Gao Y J. Effect of plastic film mulching on ecophysiology and yield of the spring maize's on the arid land. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24 (3): 348—353.
- [24] Li Y, Wang Q J, Wang W Y, *et al.* Distribution and movement characteristics of soil water and soil salt during evaporation from perforated plastic mulch. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11 (2): 187—193.
- [25] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 1997, 43: 131—167.
- [26] Jiang D, Hengsdijk H, Dai T B, *et al.* Long-Term Effects of Manure and Inorganic Fertilizers on Yield and Soil Fertility for a Winter Wheat-Maize System in Jiangsu, China. *Pedosphere*, 2006, 16: 25—32.
- [27] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, *et al.* Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94: 397—409.
- [28] Xue J F, Wang J K, Li S Y, *et al.* Studies on changes of corn biomass yield and its components under the condition of long-term plastic film-mulching and fertilization. *Journal of Maize Science*, 2006, 14 (5): 66—70.
- [29] Yang L F, Cai Z C. Effects of growing maize and N application on the renewal of soil organic carbon. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26: 280—286.
- [30] Molina J A E, Clapp CE, Linden DR, *et al.* Modeling the incorporation of corn (*Zea mays* L.) carbon from roots and rhizodeposition into soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 83—92.
- [31] Yin H B, Han X R, Xie F, *et al.* Effect of long term fertilization on soil organic carbon of Burozem. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37: 1102—1105.
- [32] Franzluebbers A J. Soil organic carbon sequestration and agricultural greenhouse gas emissions in the southeastern USA. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83: 120—147.
- [33] Webb J, Harrison R, Ellis S. Nitrogen fluxes in three arable soils in the UK. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13: 207—223.
- [34] Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil and Environmental Science*, 2000, 9: 1—6.
- [35] Hoff J D, Nelson D W, Sutton A L. Ammonia Volatilization from Liquid Swine Manure Applied to Cropland. *J. Environ. Qual.*, 1981, 10: 90—95.
- [36] Zhang J, Wang D J. Ammonia volatilization in gleyed paddy field soils of Taihu Lake region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (6): 84—87.
- [37] Liu S G, Wang J K. Effect of long-term covering with plastic film on NH_4^+ -N and NO_3^- -N in depth profile of brown earth. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37: 443—446.
- [38] Xue J F, Wang J K, Li S Y, *et al.* Studies on changes of corn biomass yield and its components under the condition of long-term plastic film-mulching and fertilization. *Journal of Maize Science*, 2006, 14 (5): 66—70.
- [39] Yu W T, Ma Q, Zhang L, Zhou H. Dynamic changes of nitrogen in precipitation in lower reach of Liaohe River Plain. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27: 33—37.
- [40] Van Breemen N, Boyer E W, Goodale CL, *et al.* Where did all the nitrogen go? fate of nitrogen inputs to large watersheds in the Northeastern U. S. A. *Biogeochemistry*, 2002, 57: 267—293.
- [41] Yu S, Wang J K, Wang X, *et al.* Dynamical changes of soil fertility and microbial biomass carbon and nitrogen in different fertilizations within corn development period. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (4): 137—140.
- [42] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of various nitrogen forms in soil and nitrogen utilization under application urea and different organic

- materials. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7 (3): 52—56.
- [43] Brady A C, Weil R R. *The Nature and Properties of Soils* (13eds). New Jersey, Prentice Hall, 2002.
- [44] Zhang H H, Shi J. Discussion on the influence of temperature in testing available phosphorus in Chao soil by Olsen method and its correction. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1995, 10: 109—114.
- [45] Cui D J, Liu Y H, Sui F G, *et al.* Effects of long-term located fertilization on potassium forms. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 2005, 22 (3): 165—167.
- [46] Gregorich E G, Liang B C, Drury C F, *et al.* Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 581—587.
- [47] Li Y Y, Liu W Z. Effects of soil moisture and nitrogen fertilizer on root growth of corn. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9 (1): 13—15.
- [48] Han X R, Zheng G D, Liu X Y, *et al.* Dynamics, sources and supply charecteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40: 765—772.
- [49] Zhang C E, Liang Y L, He X B. Effects of plastic cover cultivation on soil microbial biomass. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22: 508—512.
- [50] Fagerbakke K M, Haldal M, Norland S. Content of carbon, nitrogen, oxygen, sulfur and phosphorus in native aquatic and cultured bacteria. *Aquatic Microbial Ecology*, 1996, 10: 15—27.
- [51] Wallander H, Nilsson L O, Hagerberg D, *et al.* Direct estimates of C:N ratios of ectomycorrhizal mycelia collected from Norway spruce forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35: 997—999.
- [52] Cookson W R, Abaye D A, Marschner P, *et al.* The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 1726—1737.
- [53] Frey S D, Elliott E T, Paustian K. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 573—585.
- [54] Gulis V, Suberkropp K. Interactions between stream fungi and bacteria associated with decomposing leaf litter at different levels of nutrient availability. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, 30: 149—157.
- [55] Schnürer J, Clarholm M, Boström S, *et al.* Effects of moisture on soil microorganisms and nematodes: a field experiment. *Microbial Ecology*, 1986, 12: 217—230.
- [56] Innes L, Hobbs P J, Bardgett R D. The impacts of individual plant species on rhizosphere microbial communities varies in soils of different fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40: 7—13.
- [57] Schutter M, Dick R. Shifts in substrate utilization potential and structure of soil microbial communities in response to carbon substrates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 1481—1491.
- [58] E Y J, Dai J Y, Gu W L. Studies on the relationship between root growth and yield in maize (*Zea mays*) I. relationship between growth and adsorption ability of the roots and the growth and development of the above-ground parts of maize. *Acta Agronomica Sinica*, 1988, 14: 149—154.
- [59] Su C H, Weng H Y, Ren P H. The effects of the fertility, moisture content and temperature of soil on the root system and top of the maize. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 1996, 24 (1): 42—46.
- [60] Yang W B, Bai D C, Dong X C, *et al.* Effect of soil accumulative temperature on growth and development of root system and above-ground part of maize in plastic film mulched field. *Journal of Plant Ecology*, 1989, 13 (3): 282—288.
- [61] Ruf A, Kuzyakov Y, Lopatovskaya O. Carbon fluxes in soil food webs of increasing complexity revealed by ^{14}C labelling and ^{13}C natural abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38, 2390—2400.

参考文献:

- [1] 王秀芬, 陈百明, 毕继业. 基于县域的地膜覆盖粮食增产潜力分析. *农业工程学报*, 2005, 21 (11): 146~149.
- [2] 张继宏, 汪景宽, 须湘成, 等. 覆膜栽培条件下有机肥对土壤氮和玉米生物量的影响. *土壤通报*, 1990, 21: 162~165.
- [3] 张继宏, 汪景宽, 须湘成, 等. 覆膜栽培条件下有机肥对玉米植株吸磷量和土壤磷组分的影响. *土壤通报*, 1990, 21: 211~215.
- [4] 陈锡时, 郭树凡, 汪景宽, 等. 地膜覆盖栽培对土壤微生物种群和生物活性的影响. *应用生态学报*, 1998, 9: 435~439.
- [5] 汪景宽, 张旭东, 张继宏, 等. 覆膜对有机物料的腐解及土壤有机质特性的影响. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1 (3-4): 22~28.
- [6] 祖蓉, 汪景宽, 张继宏, 等. 地膜覆盖影响土壤离子平衡规律的研究. *沈阳农业大学学报*, 1995, 26: 408~411.
- [7] 刘顺国, 付时丰, 汪景宽, 等. 长期地膜覆盖对棕壤水分含量和储量动态变化的影响. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37: 725~728.
- [8] 汪景宽, 刘顺国, 李双异. 长期地膜覆盖及不同施肥处理对棕壤无机氮和氮素矿化率的影响. *水土保持学报*, 2006, 20 (6): 107~110.
- [8] 于树, 汪景宽, 高艳梅. 地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物量碳和氮的影响. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37: 602~606.
- [10] 张大光, 闫晓艳, 边秀芝, 等. 玉米种子田地膜覆盖栽培的综合效应. *玉米科学*, 6: 41~45.

- [11] 侯晓杰, 汪景宽, 李世朋. 不同施肥处理与地膜覆盖对土壤微生物群落功能多样性的影响. 生态学报, 2007, 27: 655 ~ 661.
- [12] 鲍士旦主编.《土壤农化分析》. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 吴云, 杨剑虹, 慈恩. 模拟雨水连续淋洗下土壤化学性动态变化特征的研究. 土壤通报, 2005, 36: 206 ~ 210.
- [17] 谢维, 李传波, 金永民. 辽宁省降水化学组份分析. 环境保护科学, 1998, 24 (3): 13 ~ 15.
- [20] 门旗, 李毅, 冯广平. 地膜覆盖对土壤棵间蒸发影响的研究. 灌溉排水学报, 2003, 22 (2): 17 ~ 20.
- [21] 陈永祥, 刘孝义. 覆膜栽培条件下土壤水分动态及运行机制分析. 沈阳农业大学学报, 1997, 28: 283 ~ 287.
- [22] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响. 应用生态学报, 2003, 14: 205 ~ 210.
- [23] 王喜庆, 李生秀, 高亚军. 地膜覆盖对旱地春玉米生理生态和产量的影响. 作物学报, 1998, 24 (3): 348 ~ 353.
- [24] 李毅, 王全九, 王文焰, 等. 覆膜开孔土壤蒸发的水盐分布特征及运移规律研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (2): 187 ~ 193.
- [28] 薛菁芳, 汪景宽, 李双异, 等. 长期地膜覆盖和施肥条件下玉米生物产量及其构成的变化研究. 玉米科学, 2006, 14 (5): 66 ~ 70.
- [29] 杨兰芳, 蔡祖聪. 玉米生长和施氮水平对土壤有机碳更新的影响. 环境科学学报, 2006, 26: 280 ~ 286.
- [31] 阴红彬, 韩晓日, 谢芳, 等. 长期定位施肥对棕壤有机碳的影响. 土壤通报, 2006, 37: 1102 ~ 1105.
- [34] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9 (1): 1 ~ 6.
- [36] 张静, 王德建. 太湖地区乌栅土稻田氨挥发损失的研究. 中国生态农业学报, 2007, 15 (6): 84 ~ 87.
- [37] 刘顺国, 汪景宽. 长期地膜覆盖对棕壤剖面中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 动态变化的影响. 土壤通报, 2006, 37: 443 ~ 446.
- [38] 薛菁芳, 汪景宽, 李双异, 等. 长期地膜覆盖和施肥条件下玉米生物产量及其构成的变化研究. 玉米科学, 2006, 14 (5): 66 ~ 70.
- [39] 宇万太, 马强, 张璐, 周桦. 下辽河平原降雨中氮素的动态变化. 生态学杂志, 2008, 27: 33 ~ 37.
- [41] 于树, 汪景宽, 王鑫, 等. 不同施肥处理的土壤肥力指标及微生物碳、氮在玉米生育期内的动态变化. 水土保持学报, 2007, 21 (4): 137 ~ 140.
- [42] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用. 中国农业大学学报, 2002, 7 (3): 52 ~ 56.
- [44] 张鹤肪, 石军. 温度对 Olsen 法测定潮土速效磷的影响和校正方法的探讨. 华北农学报, 1995, 10: 109 ~ 114.
- [45] 崔德杰, 刘永辉, 隋方功, 等. 长期定位施肥对土壤钾素形态的影响. 莱阳农学院学报, 2005, 22 (3): 165 ~ 167.
- [47] 李秧秧, 刘文兆. 土壤水分与氮肥对玉米根系生长的影响. 中国生态农业学报, 2001, 9 (1): 13 ~ 15.
- [48] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕, 等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征. 中国农业科学, 2007, 40: 765 ~ 772.
- [49] 张成娥, 梁银丽, 贺秀斌. 地膜覆盖玉米对土壤微生物量的影响. 生态学报, 2002, 22: 508 ~ 512.
- [58] 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: 149 ~ 154.
- [59] 苏彩虹, 翁惠玉, 任平合. 土壤肥水热状况与玉米根系及地上部生长发育关系的研究. 山西农业科学, 1996, 24 (1): 42 ~ 46.
- [60] 杨文彬, 白栋才, 董心澄, 等. 玉米覆膜栽培地积温效应对根系及植株生长发育的影响. 植物生态学报, 1989, 13 (3): 282 ~ 288.