

董京铭,张耀鸿,田思颢,等. 夜间模拟增温对大豆生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(4):112-115.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.04.040

# 夜间模拟增温对大豆生长及产量的影响

董京铭,张耀鸿,田思颢,楚岱蔚,谢晓金,刘尔宁,杨世琼

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室,江苏南京 210044)

**摘要:**利用被动式增温系统进行夜间模拟增温,采取常温+翻耕、夜间增温+翻耕、常温+免耕、夜间增温+免耕4种处理,研究长江中下游地区夜间增温对夏大豆生长及产量的潜在影响。结果表明,与常温+翻耕处理相比,夜间增温+翻耕处理下大豆植株的生物量、光合速率均显著下降( $P < 0.05$ ),氮磷养分积累量也降低,籽粒产量降幅为25%,单株粒数、单株粒质量均显著减小;常温+免耕处理下大豆植株的生物量、株高、光合速率、氮和磷积累量、籽粒产量和产量构成各指标都有显著提高,其中生物量在全生育期内增加20%~46%,光合速率在结荚期增幅最大,为26%,籽粒产量增幅为30%;夜间增温+免耕处理下,大豆植株的生物量、氮磷积累量有一定程度的提高,在生长中后期大豆株高略有增加,光合速率、籽粒产量及产量构成各指标则无显著变化。总体结果表明,在夜间增温条件下采用免耕措施,将减少增温对作物带来的不利影响。

**关键词:**夜间增温;免耕;光合速率;氮积累;产量构成;大豆

**中图分类号:** S565.104 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)04-0112-04

根据跨政府气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第4次评估报告显示,全球气温呈现非对称性增加,夜间增温幅度大于白天,日较差呈现减小的趋势<sup>[1]</sup>。温度是影响农作物生长发育的主要环境因素之一,昼

收稿日期:2014-05-14

基金项目:国家自然科学基金(编号:41103039,41205087);江苏省农业气象重点实验室开放课题(编号:KYQ1307);江苏省大学生实践创新训练计划(编号:201410300008);江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划;江苏省杰出青年教师聘外专家项目。

作者简介:董京铭(1989—),男,江苏连云港人,硕士,主要从事农业应对全球变化研究。E-mail: djm331487563@163.com。

通信作者:张耀鸿,博士,副教授,主要从事地气交换与全球变化研究。E-mail: yhzhang@nuist.edu.cn。

1/3 在实际生产中较难控制,而且其地上部生长发育也较全覆土差,因此,在烤烟井窖式移栽时,烟苗根系应以泥土全部覆盖为宜。

## 参考文献:

- [1] 刘国顺,刘建利. 中国烟草生产实用技术指南[M]. 北京:农业出版社,2007:15-17.
- [2] 杨俊,黄贵萍. 试论贵州烟叶生产优势和发展对策[J]. 耕作与栽培,1994(1):59-62,65.
- [3] 李洪勋. 贵州地貌与烤烟生产[J]. 中国农学通报,2007,23(7):525-528.
- [4] 王绍坤,晋艳,李庆平,等. 烟草湿润托盘育苗技术研究与应用 I. 育苗基质配方筛选及育苗效果比较[J]. 西南农业大学学报,2000,22(5):428-431.
- [5] 邹小玲. 烤烟湿润育苗技术[J]. 福建农业,2009(8):22-23.
- [6] 陈维林,马莹,龚德勇,等. 烤烟托盘浅水密播育苗及其配套移栽技术研究[J]. 现代农业科技,2014(5):9-11,13.
- [7] 邹焱,谢已书,陈尧,等. 贵州烤烟省工栽培方法与措施探讨

夜增温的不对称性会对作物的生长发育以及经济产量产生潜在影响。房世波等利用田间开放式增温系统进行试验,结果表明,夜间增温导致冬小麦生育期缩短,各物候期提前,产量显著降低<sup>[2]</sup>;田云录等研究发现,夜间增温条件下冬小麦籽粒产量提高18%,旗叶面积、开花期总绿叶面积分别提高26%、17%<sup>[3]</sup>。目前,国内外对于夜间增温对农作物生长影响的研究尚未形成定论,须要进一步深入研究。

保护性耕作可以大大缓解沙尘的危害,降低我国北方沙尘暴天气发生的可能性<sup>[4]</sup>。免耕具有保持土壤水分、保护耕层土壤结构、节省劳力等优点,在全世界范围内得到广泛的应用<sup>[5]</sup>,免耕的持续效应受到气候、作物、土壤、栽培管理等综合影响<sup>[6]</sup>。目前,关于免耕对农作物生长的影响已有广泛研究。董百舒等试验结果表明,少耕、免耕平均可使农作物增产

[J]. 贵州农业科学,2009,37(9):65-68.

- [8] Hawks S N. Principles of flue-cured tobacco production[D]. North Carolina: NC State University, 1970.
- [9] 程多福. 美国北卡罗莱纳州优质烟生产概况与研究进展[J]. 中国烟草科学,1998(2):45-46.
- [10] 徐亚中. 美国马里兰州烤烟生产概况[J]. 中国烟草科学,1984(4):21-23.
- [11] 刘爱民. 浏阳烟区烟田耕作制度改良研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2006.
- [12] 李长权,杨文钢,黄占平,等. 六盘水烟区烤烟井窖式移栽配套技术研究[J]. 现代农业科技,2012(22):9-11,13.
- [13] 罗会斌. 烤烟井窖式移栽技术[J]. 农技服务,2012,29(3):344,353.
- [14] 李喜旺,周为华,蒋卫,等. 烤烟“井窖式”移栽技术推广总结[J]. 安徽农业科学,2013,41(2):545-546,563.
- [15] 覃鹏,刘叶菊,刘飞虎. 干旱处理对烟草叶片 SOD 和 POD 活性的影响[J]. 中国烟草科学,2005,26(2):28-30.
- [16] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯,1991,27(2):84-90.

10%以上<sup>[7]</sup>;晋凡生等研究发现,山西省旱地农田在免耕方式下的玉米产量达 4 500 kg/hm<sup>2</sup> 以上,比传统耕作增产 22%~26%<sup>[8]</sup>;胡立峰等研究发现,相对于翻耕而言,免耕方式下玉米产量降低 17.6%<sup>[9]</sup>。

本试验以夏大豆为对象,将夜间增温与土壤处理相结合,研究分析对夏大豆生物量、株高、光合作用、氮磷元素吸收利用、籽粒产量和产量构成要素的影响,以期对未来气候变化条件下预测长江下游地区农田系统生产潜力提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N,118.86°E),属亚热带湿润气候,常年平均气温为 15.6℃,降水量为 1 100 mm,试验地 0~20 cm 土层土壤的有机质、氮、速效磷、速效钾含量分别为 14 100、1 160、15.6、64.2 mg/kg,pH 值为 6.7。

### 1.2 试验设计

1.2.1 大豆种植 供试大豆品种为泗豆 4 号,该品种属于中熟类型,春夏皆可播种。2013 年 7 月 6 日播种,株行距为 20 cm×25 cm,每穴播种 3~4 粒,出苗期为 7 月 14 日。在大豆全生育期,由于降水充沛,可满足大豆的用水需求,故试验期间不进行人工浇灌。

1.2.2 增温方式 试验参照陈金等被动式夜间增温的方法<sup>[10]</sup>进行,使用反光膜将地面发出的长波辐射反射回地表,以减少热量损失,达到增温的目的。装置由支架、反光膜、温度记录仪等组成,反光膜材质为铝铂玻纤布,反射率达 97% 以上,在大豆全生育期内每天 19:00 展开进行增温,次日 06:00 卷起,降雨和大风天气不进行盖膜处理以保证水分条件一致性、避免损坏增温装置。为避免增温装置对遮光的影响,常温组也架设增温装置,但不铺设反光膜。用泽大仪器有限公司生产的温度记录仪(精度±0.1℃)记录 5 cm 深的土壤温度,每 15 min 记录 1 次。在大豆全生育期,夜间增温处理区域的夜间均温比不增温处理平均增加 1.3℃(图 1)。

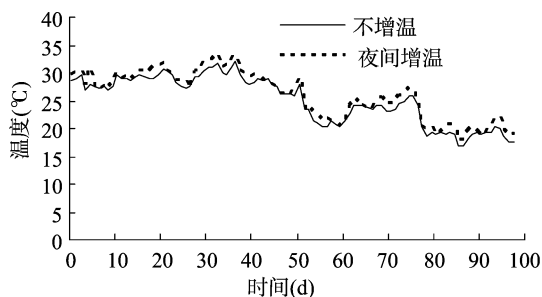


图1 夜间增温和不增温处理 5 cm 土层夜间均温的变化特征

1.2.3 试验处理 试验共设 4 个处理:CK——常温+翻耕;W——夜间增温+翻耕;NT——常温+免耕;WNT——夜间增温+免耕,每处理重复 3 次,共计 12 个小区,小区面积为 3 m×4 m,随机分布,其中有效增温区域为 2 m×3 m。翻耕处理使用旋耕机翻耕 20 cm,翻耕 2 次,翻耕后进行人工平整;免耕处理为小麦、大豆轮作,不进行常规耕作,直接播种作物。

### 1.3 测定内容

1.3.1 营养元素含量测定 分别在大豆分枝期(8 月 9 日)、

开花期(8 月 19 日)、结荚期(8 月 29 日)、鼓粒期(9 月 21 日)、成熟期(10 月 16 日),除 1 m×1 m 区域不采样用于成熟期测产外,每试验小区随机选取大豆植株 5 株,先测定株高;后将植株分为茎、叶、荚、籽粒,105℃杀青 0.5 h,70℃烘干至恒质量,测定生物量;再将样品粉碎,采用半微量-凯氏定氮法、钼锑黄比色法<sup>[11]</sup>分别测定全氮、全磷含量。植物氮(磷)素积累量为该生育期各器官实测氮(磷)素含量(%)与其干物质质量(g)乘积之和。

1.3.2 光合速率测定 在大豆分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期 10:00—11:00,使用 LI-6400 测定每处理小区植株顶部完全展开叶片的光合速率,每植株测定 3 张叶片,每张叶片重复测定 5 次。另外,选取相同位置的叶片,使用 SPAD 仪测定叶片的叶绿素含量。

1.3.3 产量测定 在大豆成熟期,每小区随机选取植株 10 株,分别测定单株空秕荚数、1 粒荚、2 粒荚、3 粒荚、4 粒荚的数量及单株粒数、粒质量、百粒质量、粒径;在 1 m×1 m 测产面积内,记录有效株数,收获所有大豆籽粒,折算籽粒产量。籽粒产量(g/m<sup>2</sup>)=每株籽粒质量(g)×1 m<sup>2</sup> 有效株数(株/m<sup>2</sup>)。

### 1.4 数据处理

用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件对数据进行处理和统计,用 LSD 法进行差异显著性检验分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对植株生物量、株高的影响

由图 2 可见,与 CK 相比,W 处理的大豆在不同生育期内植株生物量下降,降幅为 6%~26%,且差异基本达显著水平( $P<0.05$ );NT 处理的大豆植株生物量显著增加,分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期、成熟期分别比 CK 增加 28%、46%、36%、23%、20%;WNT 处理的大豆植株生物量也有明显增加,各生育期分别比 CK 增加 11%、3%、10%、7%、6%;在各生育期,NT 处理的大豆植株生物量均高于 WNT 处理,可能由于夜间增温对大豆植株生物量的增加有一定程度的抑制作用,免耕处理可以显著提高大豆植株的生物量。

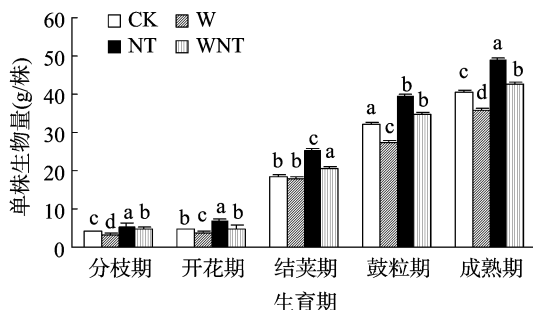


图2 不同处理对大豆单株生物量的影响  
同一生育期内不同处理间标有不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。图5同

由表 1 可见,W 处理的大豆与 CK 相比,株高相对较低,且未达到显著水平;在各生育期,NT 处理的大豆株高都高于 CK,在开花期、结荚期、鼓粒期、成熟期的差异均达到显著水平( $P<0.05$ );WNT 处理的大豆株高也都高于 CK,且在结荚期、鼓粒期、成熟期的差异达到显著水平( $P<0.05$ );NT 处理与 WNT 处理的大豆株高间无显著差异。

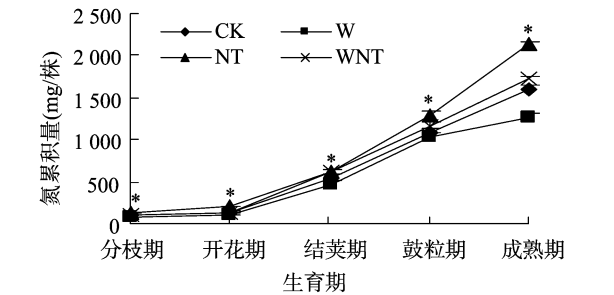
表 1 不同处理对大豆各生育期株高的影响

处理	株高 (cm)				
	成熟期	分枝期	开花期	结荚期	鼓粒期
CK	53.3 ± 1.2a	79.5 ± 3.8b	87.0 ± 1.6b	90.3 ± 0.9b	90.5 ± 0.8b
W	53.5 ± 0.1a	78.4 ± 4.3b	86.2 ± 1.2b	89.3 ± 0.9b	89.9 ± 0.7b
NT	54.2 ± 0.6a	87.6 ± 2.0a	93.8 ± 1.7a	95.9 ± 1.1a	96.7 ± 1.5a
WNT	54.6 ± 1.2a	83.4 ± 2.5ab	91.6 ± 1.4a	94.9 ± 0.6a	95.9 ± 0.8a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

2.2 不同处理对植株氮、磷积累量的影响

由图 3 可见,4 个处理的地上部氮积累量均随着生育期的推进而增加;与 CK 相比,W 处理大豆植株的氮积累量在各生育期均有所下降,降幅为 6% ~ 35%,其中在分枝期和开花期下降最为明显;NT 处理下,大豆植株的氮积累量在分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期、成熟期分别比 CK 增加 13%、53%、14%、19%、34%;在各生育期,WNT 处理的大豆植株氮积累量与 CK 处理无差异。夜间增温明显抑制大豆植株的氮积累量,且在前期抑制效应更为明显;在大豆各生育期内,免耕处理均明显提高植株的氮积累量,且在开花期和成熟期提高最为明显。



“\*”表示同一生育期不同试验处理间差异显著( $P < 0.05$ )。图4同  
图3 大豆植株地上部分不同时期的氮积累量变化

由图 4 可见,在各生育期内,W 处理与 CK 相比,大豆植株的磷积累量都有所下降,在分枝期、开花期降幅最大,分别为 31%、40%;NT 处理的大豆植株磷积累量均有明显增加,与 CK 相比,增幅为 17% ~ 51%;WNT 处理与 CK 相比,大豆植株的磷积累量也有所增加,但差异未达显著水平。与氮积累量相似,夜间增温显著降低植株的磷积累量;免耕处理和增温加免耕条件,大豆植株的磷积累量均有不同程度的提高,免耕处理的提升幅度大于后者。

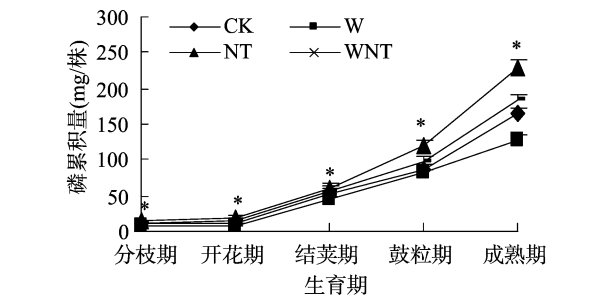


图4 大豆植株地上部分不同时期的磷积累量变化

2.3 不同处理对植株叶片光合速率和叶绿素含量的影响

由图 5 可见,W 处理与 CK 相比,大豆植株叶片的光合速率下降 10% ~ 14%,其中在鼓粒期降幅最为明显;NT 处理与 CK 相比,叶片的光合速率在分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期

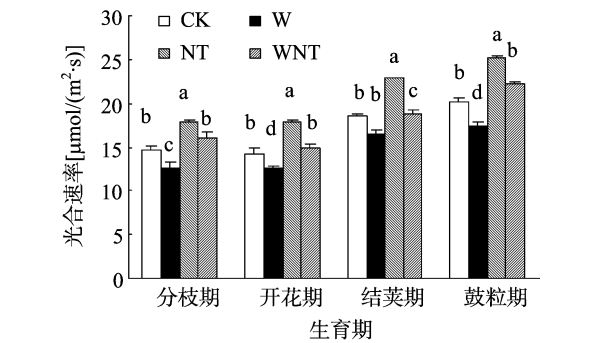


图5 不同处理方式下大豆植株叶片的光合速率变化  
分别增加 23%、26%、23%、25%;WNT 处理下,大豆结荚期的叶片光合速率显著增加。

由表 2 可见,与 CK 相比,W 处理的大豆植株 SPAD 值在各生育期均有一定程度的下降,分枝期、开花期、鼓粒期 SPAD 值与 CK 差异均达显著水平;NT 处理的大豆植株,其 SPAD 值比 CK 增加 4% ~ 13%;WNT 处理与 CK 相比,叶片 SPAD 值变化不明显。

表 2 不同处理对大豆不同生育期 SPAD 值的影响

处理	SPAD 值			
	鼓粒期	分枝期	开花期	结荚期
CK	38.2 ± 0.6b	41.4 ± 0.6b	47.9 ± 0.7bc	52.7 ± 0.2b
W	35.7 ± 0.5c	39.3 ± 0.6c	47.3 ± 0.3c	50.7 ± 0.7c
NT	42.3 ± 0.5a	46.8 ± 0.9a	49.7 ± 0.7a	54.7 ± 0.4a
WNT	38.5 ± 0.5b	41.6 ± 0.5b	48.7 ± 0.3b	52.6 ± 0.3b

2.4 不同处理对大豆籽粒产量、产量构成及单株荚数的影响

由表 3 可见,W 处理下大豆的单株粒数、单株粒质量、粒径、籽粒产量均显著减小;NT 处理下大豆的单株粒数、单株粒质量、百粒质量、粒径、产量分别比 CK 提高 28%、31%、3%、2%、30%;WNT 处理与 CK 相比,大豆的籽粒产量和产量构成无显著变化。W 处理的籽粒产量和产量构成各指标均有所降低,NT 处理籽粒产量和产量构成各指标均有所提高。

由表 4 可见,W 处理导致总荚数比 CK 下降 11%,且 2 粒荚数、3 粒荚数、4 粒荚数均显著减小( $P < 0.05$ );NT 处理时大豆总荚数比 CK 提高 23%,2 粒荚数、3 粒荚数分别增加 41%、34%;WNT 处理时大豆总荚数比 CK 显著增加,2 粒荚数、3 粒荚数分别增加 23%、18%。

3 结论与讨论

夜间增温条件下,大豆植株的生物量、光合速率、SPAD 值、氮磷的积累量都有一定程度的下降,成熟期时籽粒产量和产量构成各指标也下降;在分枝期、开花期,夜间增温植株的氮积累量分别下降 35%、29%,磷积累量分别下降 31%、

表 3 不同处理对大豆籽粒产量和产量构成的影响

处理	单株粒数 (粒)	单株粒质量 (g)	百粒质量 (g)	粒径 (mm)	产量 (g/m <sup>2</sup> )
CK	70.1 ± 0.6b	19.3 ± 0.4b	27.5 ± 0.6ab	7.05 ± 0.03b	860.4 ± 27.2b
W	57.0 ± 5.5c	15.2 ± 1.1c	26.8 ± 0.5b	6.90 ± 0.41c	645.8 ± 53.7c
NT	89.8 ± 2.5a	25.3 ± 1.3a	28.2 ± 0.8a	7.19 ± 0.26a	1 114.4 ± 55.5a
WNT	75.5 ± 2.8b	20.6 ± 0.7b	27.3 ± 0.2ab	7.03 ± 0.02b	872.0 ± 52.8b

表 4 不同处理对大豆单株荚数的影响

处理	总荚数 (个)	空荚数 (个)	1 粒荚数 (个)	2 粒荚数 (个)	3 粒荚数 (个)	4 粒荚数 (个)
CK	31.3 ± 0.3c	1.8 ± 0.3ab	5.1 ± 0.2a	11.0 ± 0.6c	10.5 ± 0.4c	2.9 ± 0.3a
W	27.9 ± 0.6d	2.3 ± 0.5a	4.7 ± 0.2a	9.7 ± 0.4d	9.0 ± 0.5d	2.1 ± 0.4c
NT	38.6 ± 1.4a	1.3 ± 0.3b	4.8 ± 0.5a	15.5 ± 0.5a	14.1 ± 0.7a	2.9 ± 0.1a
WNT	36.3 ± 1.0b	2.4 ± 0.4a	5.2 ± 0.2a	13.5 ± 0.5b	12.4 ± 0.8b	2.8 ± 0.2b

39%。这可能是由于夜间增温处理时,植株前期对氮磷营养元素的吸收量较小,从而致使生物量减小、籽粒产量降低,与楚岱蔚等研究结论<sup>[12]</sup>一致。Lee 等研究发现,长期夜间增温可导致新陈代谢产生副反应,致使叶肉细胞过氧化反应增加,光合速率减弱<sup>[13]</sup>。本试验叶片的 SPAD 值有所下降,这是大豆光合速率下降的重要原因之一。张贤泽等认为,大豆主要生育期的平均光合速率与产量呈正相关<sup>[14]</sup>,本试验长期夜间增温,导致光合速率下降,最终导致籽粒产量减小。

免耕处理条件下大豆植株的生物量、株高、光合速率、SPAD 值、氮磷积累量、籽粒产量及产量构成各指标都增加,这与陈甲瑞等对玉米的结论<sup>[15]</sup>一致。陈军胜等研究认为,免耕减少了土壤蒸发,有利于提高水分的利用效率,从而促进作物生长<sup>[16]</sup>,同时,免耕土壤结构、土壤微生物数量与活性相对稳定,有利于提高养分利用效率和作物生长,这可能是大豆氮磷积累量增加的原因之一。另外,彭文英研究发现,长期实施免耕才可提高土壤的增水效应,改善土壤的理化性质<sup>[17]</sup>。楚岱蔚等早期研究发现,免耕处理显著减小大豆的地上生物量,对籽粒产量也有一定的抑制效应<sup>[12]</sup>,与本试验结果不同,这可能是由试验大豆品种不同及免耕的持续期短所致。

夜间增温叠加免耕条件下,大豆植株的生物量、株高、氮磷的积累量都略有提高,但各项指标都低于免耕处理,且高于夜间增温处理。与传统耕作相比,免耕可有效增加土壤含水量,增加土壤的比热值,使土壤对温度扰动的缓冲性提升<sup>[18]</sup>,进而使得夜间增温处理对土壤温度扰动的敏感性减小,从而降低了夜间增温对大豆的负面影响。因此,在未来夜间温度升高条件下实施免耕方式,可有效降低夜间增温对作物生长带来的抑制作用。

需要强调的是,不同农作物在不同年份、不同生长季对夜间增温及免耕的响应特征可能存在差异,这需要开展长期的田间试验进行深入研究,用多年份试验数据证实夜间增温及耕作方式对农作物的潜在影响。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change, impact, adaptation and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.  
[2] 房世波, 谭凯炎, 任三学, 等. 气候变暖对冬小麦生长和产量影响

的大田实验研究[J]. 中国科学:地球科学, 2012, 42(7): 1069 - 1075.  
[3] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 681 - 686.  
[4] 陈印军, 张燕卿, 徐斌, 等. 调整治沙方略 抑制沙尘暴危害[J]. 中国农业资源与区划, 2002, 23(4): 7 - 9.  
[5] 李素娟, 陈继康, 陈阜, 等. 华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究[J]. 作物学报, 2008, 34(2): 290 - 296.  
[6] 庄恒扬, 刘世平, 沈新平, 等. 长期少免耕对稻麦产量及土壤有机质与容重的影响[J]. 中国农业科学, 1999, 19(4): 39 - 44.  
[7] 董百舒, 贡伯兴, 朱宗武. 江苏少、免耕种麦的研究[J]. 中国农业科学, 1987(1): 46 - 52.  
[8] 晋凡生, 张宝林. 免耕覆盖玉米秸秆对旱地土壤环境的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(3): 49 - 52.  
[9] 胡立峰, 胡春胜, 安忠民, 等. 不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 188 - 191.  
[10] 陈金, 杨飞, 张彬, 等. 被动式夜间增温设施设计及其增温效果[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2288 - 2294.  
[11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264 - 268.  
[12] 楚岱蔚, 张耀鸿, 赵娟, 等. 夜间土壤增温和免耕对大豆生长及 N、P 养分吸收利用的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(1): 42 - 47.  
[13] Lee B H, Won S H, Lee H S, et al. Expression of the chloroplast - localized small heat shock protein by oxidative stress in rice [J]. Gene, 2000, 245(2): 283 - 290.  
[14] 张贤泽, 马占峰, 赵淑文, 等. 大豆不同品种光合速率与产量关系的研究[J]. 作物学报, 1986, 12(1): 43 - 48.  
[15] 陈甲瑞, 梁银丽, 周茂娟, 等. 免耕和施肥对玉米光合速率的影响[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 72 - 74.  
[16] 陈军胜, 苑丽娟, 呼格·吉乐图. 免耕技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(5): 184 - 190.  
[17] 彭文英. 免耕措施对土壤水分及利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 379 - 383.  
[18] 秦红灵, 高旺盛, 李春阳. 北方农牧交错带免耕对农田耕层土壤温度的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 40 - 47.