doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.020

秸秆覆盖对高海拔寒区土壤温度和春青稞生长的影响

时学双[1,2]　李法虎[1]　普布多吉[3]　高建新[3]　李永峰[4]　曲　珍[3]

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 拉孜县水利水电局, 拉孜 858100;
3. 西藏自治区日喀则地区农业科学研究所, 日喀则 857000; 4. 西藏自治区水文水资源勘测局, 拉萨 850000)

摘要: 为探明秸秆覆盖对高海拔寒区农田土壤温度和作物生长的影响,对春青稞进行了田间小区试验研究。秸秆覆盖量设置为 0(CK)、5 000(M1)、10 000(M2)、15 000 kg/hm^2(M3),共 4 个处理。试验结果显示,地表秸秆覆盖可显著调节土壤温度。与 CK 处理相比,秸秆覆盖可降低春青稞苗期日均土壤温度 2.8 ~ 3.9℃,而提高其他生育期土壤温度 0.4 ~ 1.8℃。秸秆覆盖显著降低了春青稞苗期和拔节期株高(2.29% ~ 16.53%)和干物质量(3.98% ~ 25.93%),增大了灌浆期和成熟期的株高(3.12% ~ 10.31%)和干物质量(2.17% ~ 18.26%)。秸秆覆盖显著减小了 0 ~ 20 cm 土层的根密度,增大了其他深度的根密度。秸秆覆盖显著增大了春青稞千粒质量(4.65% ~ 13.95%)和籽粒产量(4.30% ~ 13.50%),但在一定程度上也降低了穗长和穗粒数。整体而言,秸秆覆盖量(M1 ~ M3)对土壤温度的影响不显著而对春青稞生长参数(除穗长和穗粒数外)的影响显著。秸秆覆盖有利于春青稞幼苗的茁壮生长及其籽粒产量的提高。

关键词: 春青稞; 高海拔寒区; 秸秆覆盖; 土壤温度; 籽粒产量

中图分类号: S152.8; S512.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2016)02-0151-10

Effects of Straw Mulching on Tillage Soil Temperature and Growth of Spring Highland Barley in High Altitude Cold Region

Shi Xueshuang[1,2]　Li Fahu[1]　Pubu Duoji[3]　Gao Jianxin[3]　Li Yongfeng[4]　Qu Zhen[3]

(1. *College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Lazi Water Authority*, *Lazi* 858100, *China*
3. *Institute of Agricultural Sciences of Rikaze District*, *Tibet Autonomous Region*, *Rikaze* 857000, *China*
4. *Hydrology and Water Resources Survey Bureau*, *Tibet Autonomous Region*, *Lhasa* 850000, *China*)

Abstract: Soil temperature influences crop growth and its grain formation in high altitude cold region. Field plot experiments were conducted in order to investigate the effects of straw mulching on tillage soil temperature and the grain yield of spring highland barley in high altitude cold region of Tibet, China. Four experimental treatments, including straw mulching application rates of 0 (control), 5 000 (M1), 10 000 (M2), and 15 000 kg/hm^2 (M3), were designed. The results showed that straw mulching on soil surface could adjust soil temperature significantly. Compared with the control treatment, average daily soil temperature was lowered by 2.8 ~ 3.9℃ at seedling stage but it was raised by 0.4 ~ 1.8℃ at other growth stages of spring highland barley after straw mulching application. Straw mulching significantly reduced plant height (2.29% ~ 16.53%) and dry matter weight (3.98% ~ 25.93%) at seedling and jointing stages, but it increased plant height and dry matter weight by 3.12% ~ 10.31% and 2.17% ~ 18.26% at the filling and mature stages of spring highland barley, respectively, and it significantly decreased root mass density in 0 ~ 20 cm soil layer, but it was increased in other soil depths. Straw

收稿日期: 2015-06-03　修回日期: 2015-07-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203077-03-04)

作者简介: 时学双(1975—),男,博士生,主要从事农业水土工程研究,E-mail: 645278900@qq.com

通信作者: 李法虎(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: lifahu@cau.edu.cn

mulching significantly increased the thousand seed weight (4.65% ~13.95%) and grain yield (4.30% ~ 13.50%) of spring highland barley. To a certain extent, straw mulching also lowered the spike length and the grain number in each spike of spring highland barley. Generally, there was no significantly statistical difference among different straw mulching application rates (M1 ~ M3) in soil temperature, but significant differences existed among M1 ~ M3 in the growth parameters (except ear length and seeds per ear) of spring highland barley. Straw mulching is advantageous to the thriving growth of seedlings and the increase of grain yield of spring highland barley.

Key words: spring highland barley; high altitude cold region; straw mulching; soil temperature; grain yield

引言

西藏自治区平均海拔高度在 4 000 m 左右,气温低,年内和年际间变率小,日温差较大,属于典型的高海拔寒区[1]。日喀则地区是西藏自治区的主要商品粮基地,其粮食生产对自治区粮食自给自足起着至关重要的作用[2]。日喀则地区干旱少雨,蒸发量大,无霜期短,在作物生长早期的 3—5 月份和后期的 9—10 月份常发生低温霜冻天气[3-4],对农业生产构成严重威胁。因此,如何通过农田管理措施调节土壤温度,减小低温对农作物生长的威胁,对推动西藏高海拔寒区的农业生产发展具有重要的现实意义。

土壤温度是土壤热状况的综合表征指标。作为作物生长的重要环境因素之一,土壤温度影响农田土壤水分状况[5]、碳平衡[6-7]、养分吸收与利用[8]、微生物[9]以及酶活性[10],从而影响作物的生长发育状况[11-14]。地表秸秆覆盖可以在农田土壤表面形成阳光、降水、气流相互作用的缓冲层,增强太阳光的反射率,降低其直接辐射和热传导率[15],从而对土壤温度起到一定的调节作用[16-17],在气温高时降低土壤温度,而在气温低时提高土壤温度[18]。研究结果显示,秸秆覆盖后的冬小麦农田,其冬季土壤温度提高而春季土壤温度降低[19]。表层 0 ~ 15 cm 土层的降温效果在春玉米生长前期较大而后期较小[20]。作物残茬覆盖可提高寒区表层 5 cm 的土壤温度 1.5 ~ 2.1℃[21]。此外,秸秆覆盖还可改善农田水分状况[22],减少土壤水分蒸发[23],改善土壤结构以及提高土壤水分利用效率等[24],从而影响作物生长。秸秆覆盖对春玉米有一定的增产作用,覆盖处理的春玉米其籽粒产量比未覆盖处理的增加 11.3%[25];秸秆还田可提高冬小麦有效穗数或地上干物质量,增加作物产量 17.85%[26]。秸秆覆盖量应根据田间操作的可行性以及生产实际情况确定,一般将单位耕地面积上生产的作物秸秆覆盖在单位耕地面积上较为适宜[18]。

土壤温度受气候、海拔高度、纬度、土壤类型、植被和耕作等因素影响[27]。覆盖措施对土壤温度的影响随土壤类型、气候条件、覆盖材料及其覆盖量的不同而有显著差异[28]。目前,秸秆覆盖对土壤温度及作物产量影响的研究主要集中在低海拔暖温带地区的玉米和小麦等粮食作物[18],而对水土流失严重、昼夜温差大、生态环境脆弱的高海拔寒区,有关秸秆覆盖对土壤温度以及春青稞生长影响的研究鲜见报道。鉴于此,本文通过秸秆覆盖对农田土壤温度以及春青稞生长状况影响的研究,以期为改善西藏高海拔寒区农作物的生产管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2014 年 5—10 月在西藏自治区日喀则地区农业科学研究所灌溉试验站的防雨棚内进行。试验站位于 88°53′E、29°15′N,海拔高度 3 836 m。该地区年均日照时数为 3 248 h,年均气温 6.5℃,无霜期 103 d,年降水量和蒸发量分别为 433.2、2 249.6 mm。试验地平均土层厚度约为 1.0 m,下垫层为砂砾石层,地下水埋深大于 4.0 m。土壤质地为粉砂壤土,平均容重为 1.60 g/cm^3,田间持水率(质量含水率)为 17.3%。

1.2 试验设计

为保证各试验小区土壤和水分条件的一致性,在试验小区布设前对试验地统一翻耕平整,且在试验区周围设置 2 m 宽的保护区。地表覆盖材料为 2 ~ 3 cm 长的碎青稞秸秆。试验共设 4 个处理,秸秆覆盖量分别为 0(对照,CK)、5 000(M1)、10 000(M2)、15 000 kg/hm^2(M3)。试验小区采用随机区组排列布置(图 1),每个小区面积为 3 m ×3 m。各小区之间设 40 cm 宽的土埂隔离。为防止灌溉水分侧渗,各小区间设置塑料膜隔水,塑料膜埋深为 80 cm。每个处理 3 次重复。

春青稞供试品种为喜玛拉 22 号,于 2014 年 5 月 17 日播种,10 月 14 日收获,共 150 d。春青稞

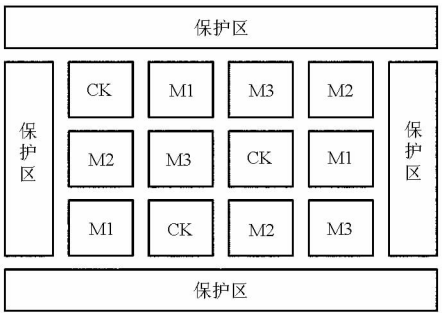

图 1　试验小区布置示意图

Fig. 1　Experimental plot layout

全生育期分为苗期(5 月 17 日—6 月 22 日)、拔节期(6 月 23 日—7 月 23 日)、抽穗期(7 月 24 日—8 月 10 日)、灌浆期(8 月 11 日—9 月 22 日)和成熟期(9 月 23 日—10 月 14 日)。根据当地生产习惯,试验小区播前灌水,待土壤蒸发至适宜含水率后翻耕。根据所用青稞品种推荐的施肥量,翻耕时施用磷酸二氢铵(N 质量分数 18%、P_2O_5 质量分数 46%)150 kg/hm^2 和尿素(N 质量分数 46%)150 kg/hm^2 作为底肥。春青稞采用人工沟播,等行距(25 cm)种植,播种量为 300 kg/hm^2。按照试验设计的秸秆覆盖量,在播种后的第 2 天将粉碎后的青稞秸秆均匀地覆盖在每个小区的地表。春青稞生育期内不追肥,除草、病虫害防治等田间管理措施按照当地传统习惯实施。根据土壤水分监测数据,采用低压管道对春青稞实施充分灌溉,灌水量通过水表计量。灌溉定额为 691.4 mm。在试验期间,防雨棚每天 08:00 打开,20:00 关闭。日喀则地区夜间降水概率在 80% 以上。若白天偶遇降水,则临时关闭防雨棚,降水停止后重新打开。

1.3　测定指标与测定方法

在播种时将直角地温计分别布设埋入各小区中部行间的 5、10、15、20、25 cm 深度处。由于时间延续较长且大气温度是连续变化的,因此根据春青稞生育期长度以及考虑阴雨天对土壤温度的可能影响,在各生育期内分别选择晴朗天气连续 3 d 定时测定各层土壤温度和田间 50 cm 高度处的气温,取 3 d 的平均值分析不同处理土壤温度日变化过程和季节性变化趋势。温度测定时间分别为 6 月 8—10 日(苗期,播种后 22 ~ 24 d)、7 月 8—10 日(拔节期,播种后 52 ~ 54 d)、8 月 8—10 日(抽穗期,播种后 83 ~ 85 d)、9 月 6—8 日(灌浆期,播种后 112 ~ 114 d)以及 10 月 3—5 日(成熟期,播种后 139 ~ 141 d)的 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00 和 20:00。气象资料通过灌溉试验站内的自动气象站连续监测,观测项目包括辐射强度、气温、风速、降水量和相对湿度等[29]。

在春青稞苗期,调查单位面积上的基本苗状况。在各生育期,每小区选取 10 株有代表性植株,测定其株高,并割去地面以上部分干燥称量。在收获时,每小区随机取 30 穗青稞测定其穗长和穗粒数。各小区全部实收,单独脱粒,测定其千粒质量和籽粒产量等指标。收获后,用根钻对各小区分层取土,20 cm 一层,取至 100 cm 深度。用冲洗法洗根,然后干燥称量,测定根密度。

1.4　数据处理

各处理平均值之间的差异显著性采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差(ANOVA)分析。当 ANOVA 的 F 值统计显著($P < 0.05$)时,采用最小显著差异(LSD)检验法区分其平均值的差异显著性。

2　结果

2.1　秸秆覆盖对土壤温度的影响

2.1.1　土壤温度日变化过程

不同试验处理条件下春青稞各生育期在 5、15、25 cm 深度处连续 3 d 的平均土壤温度和田间气温日变化过程见图 2。10、20 cm 深度处的土壤温度变化趋势介于 5、15 cm 以及 15、25 cm 之间,因此未给出数据。土壤温度观测符合《地面气象观测规范》要求,不同重复之间一致性较好。为清晰起见,图中未给出标准差。表层(5 cm)土壤温度与田间气温变化趋势基本相似,整体上呈先增大后减小的趋势,在 16:00 左右达到最大值(图 2),这与黄洁等的研究结果一致[30]。5 cm 深度处的日最高土壤温度出现时间比已有研究结果滞后约 2 h[20],这主要是由时差引起的。随着土层深度的增加,土壤温度日变化过程逐渐趋缓,在 25 cm 深度处其峰值基本消失。整体而言,每日早(08:00)、晚(20:00)以及整个苗期的土壤温度均高于田间气温,而其他时间则低于田间气温。不同秸秆覆盖量(M1 ~ M3)对土壤日温度变化的影响不显著。

2.1.2　土壤温度随土层深度的变化

不同试验处理条件下春青稞苗期、抽穗期和成熟期连续 3 d 的平均土壤温度随土层深度的变化见图 3。拔节期和灌浆期的土壤温度随土层深度的变化趋势介于苗期与抽穗期以及抽穗期与成熟期之间(数据未给出)。08:00 土壤温度随土层深度的增加而增大;此后,土壤温度随土层深度的增加呈减小趋势;至 20:00,土壤温度在整个土壤剖面上近似均匀分布(图 3)。所有试验处理的表层土壤温度在日内的变化幅度均大于深层土壤,且其变化深度可影响至 25 cm 以下(图 3)。不同秸秆覆盖量(M1 ~ M3)对土壤温度随土层深度变化的影响不显著。在春青

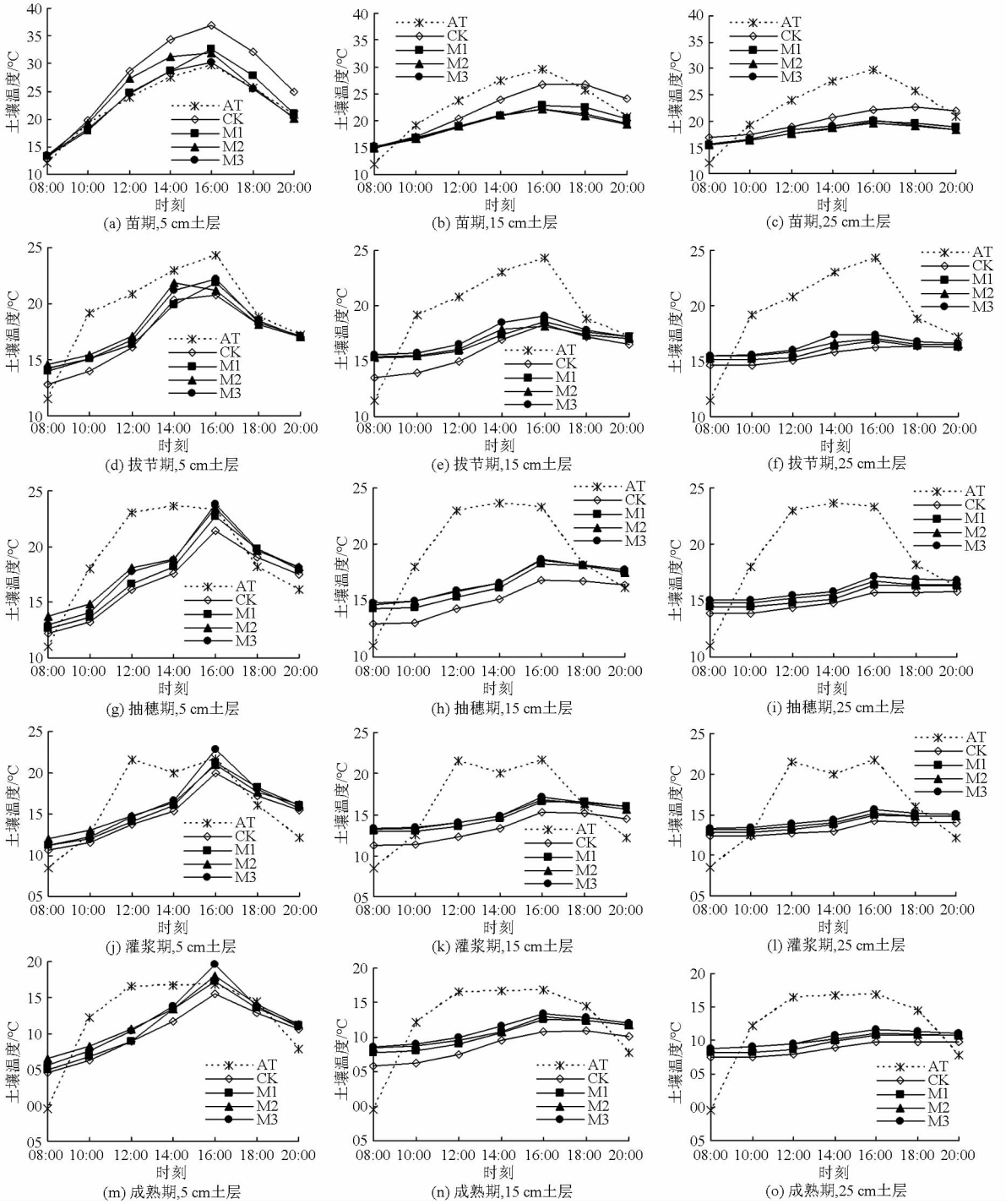

图 2 不同处理春青稞各生育期在 5、15、25 cm 深度连续 3 d 平均土壤温度和田间气温(AT)日变化

Fig. 2 Diurnal changes of mean soil temperature at 5 cm, 15 cm, 25 cm depths during consecutive 3 d and air temperature in farmland at various growth stages of spring highland barley under different treatments

稞苗期,5、10、15、20、25 cm 深度处秸秆覆盖后的土壤温度分别比对照处理降低 2.9 ~ 4.2℃、3.9 ~ 4.0℃、2.4 ~ 2.9℃、1.9 ~ 2.4℃和 1.9 ~ 2.2℃。而在抽穗期和成熟期,其值分别比对照处理增加 0.6 ~ 1.4℃、0.2 ~ 0.4℃、1.2 ~ 1.6℃、0.9 ~ 1.8℃、0.5 ~ 1.2℃和 0.8 ~ 1.7℃、0 ~ 1.0℃、1.6 ~ 2.4℃、1.3 ~ 2.5℃、0.9 ~ 1.6℃。

2.1.3 土壤温度随生育期的变化

不同试验处理条件下 5、15、25 cm 深度处连续 3 d 的平均土壤温度以及田间气温随生育期的变化见图 4。10、20 cm 深度处的土壤温度变化趋势与此相似,未给出数据。在春青稞生育期内(5 月—10 月),随着作物生长时间的延长,田间气温与土壤温度整体呈下降趋势(图 4)。在苗期至抽穗期,08:00 土壤温度的变化幅度较小,而进入灌浆期后则快速降低;在苗期至拔节期以及灌浆至成熟期,12:00—20:00 的土壤温度下降较快。08:00 土壤温度在春青稞整个生育期内高于田间 50 cm 高度处的气温。

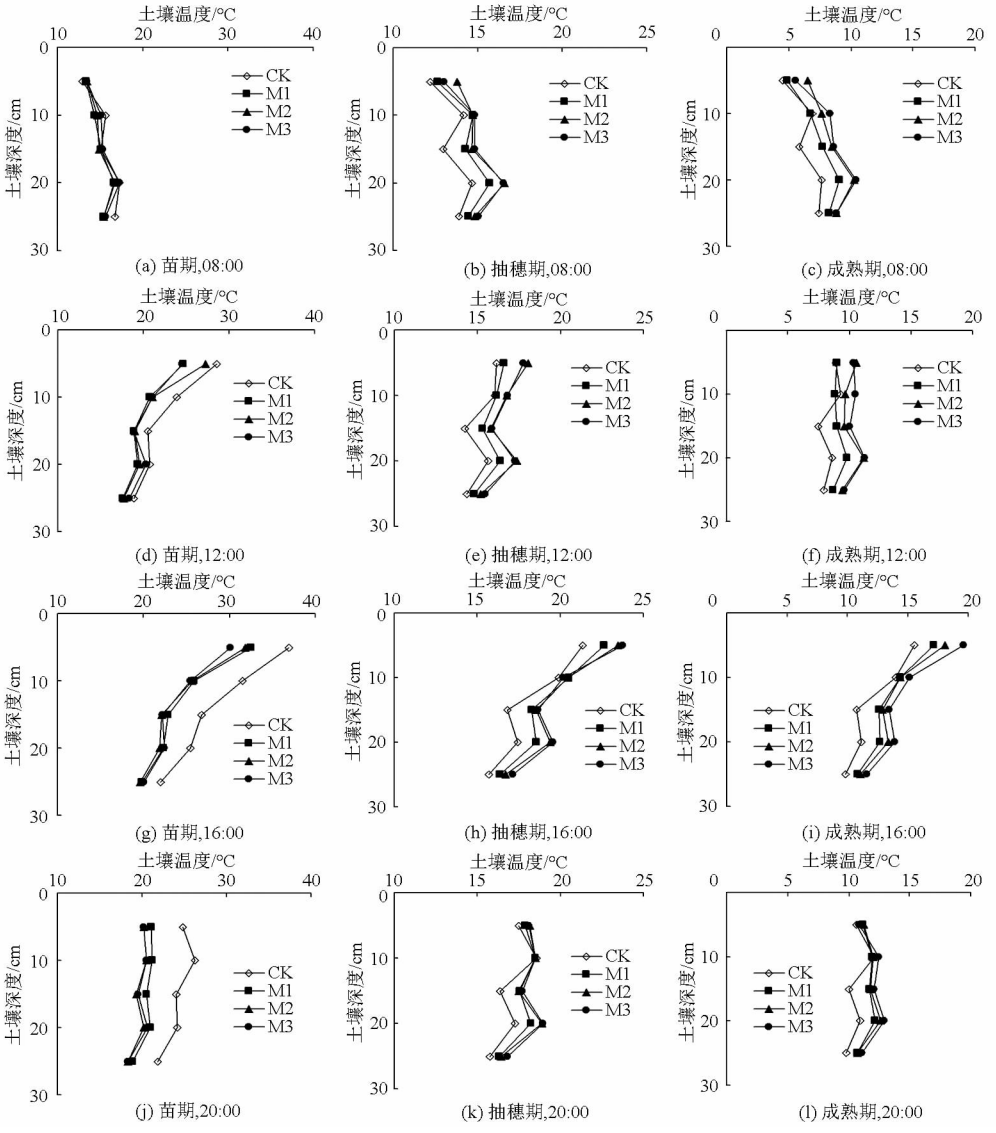

图 3　不同处理春青稞苗期、抽穗期和成熟期在 08:00、12:00、16:00 和 20:00 连续 3 d 平均土壤温度随土层深度的变化

Fig. 3　Changes of mean soil temperature at 08:00, 12:00, 16:00 and 20:00 during consecutive 3 d with soil depth at seedling, heading and ripening stages of spring highland barley under different treatments

除苗期 5 cm 深度外,12:00—16:00 土壤温度在整个生育期内一般低于田间气温,而 20:00 土壤温度在拔节期以后的生育期内高于田间气温。苗期 5 cm 深度处的日间土壤温度均高于田间气温。在春青稞全生育期内,秸秆覆盖显著降低了春青稞苗期耕作层(0 ~ 25 cm)的土壤温度($P < 0.05$),提高了其他各生育期的土壤温度,这有利于春青稞幼苗的健康生长和籽粒产量的形成[31-32]。不同覆盖量(M1 ~ M3)对春青稞整个生育期内土壤温度的影响不显著(图 4)。与对照处理相比,秸秆覆盖在春青稞苗期降低了日平均土壤温度 2.8 ~ 3.9℃;而在拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期,日平均土壤温度分别比对照处理提高 0.5 ~ 1.0℃、0.4 ~ 1.2℃、0.4 ~ 1.2℃和 0.6 ~ 1.8℃。

2.2　秸秆覆盖量对植株高度与地上部分干物质量的影响

表 1 给出了不同处理条件下春青稞各生育期的植株高度和干物质量。从表中可以看出,在春青稞苗期和拔节期,秸秆覆盖后的株高显著矮于对照处理($P < 0.05$),株高分别比对照处理降低了 7.20% ~ 16.53% 和 2.29% ~ 8.61%。这些数据表明秸秆覆盖有利于培育壮苗以及防止春青稞的后期倒伏。抽穗期、灌浆期和成熟期的株高在秸秆覆盖后均高于对照处理(1.01% ~ 10.31%)。不同秸秆覆盖量(M1 ~ M3)对抽穗期株高以及 M2 与 M3 对各生育期株高的影响不显著。

各处理条件下地上部分干物质量在整个生育期内的变化规律与株高相似(表 1)。在春青稞苗期和拔节期,秸秆覆盖处理的地上部分干物质量显著小于对照处理($P < 0.05$),其干物质量分别比对照处理减小了 7.41% ~ 25.93% 和 3.98% ~ 13.72%。而在抽穗期、灌浆期和成熟期,秸秆覆盖处理的干物质量分别比对照处理增大了 0.28% ~ 5.04%、

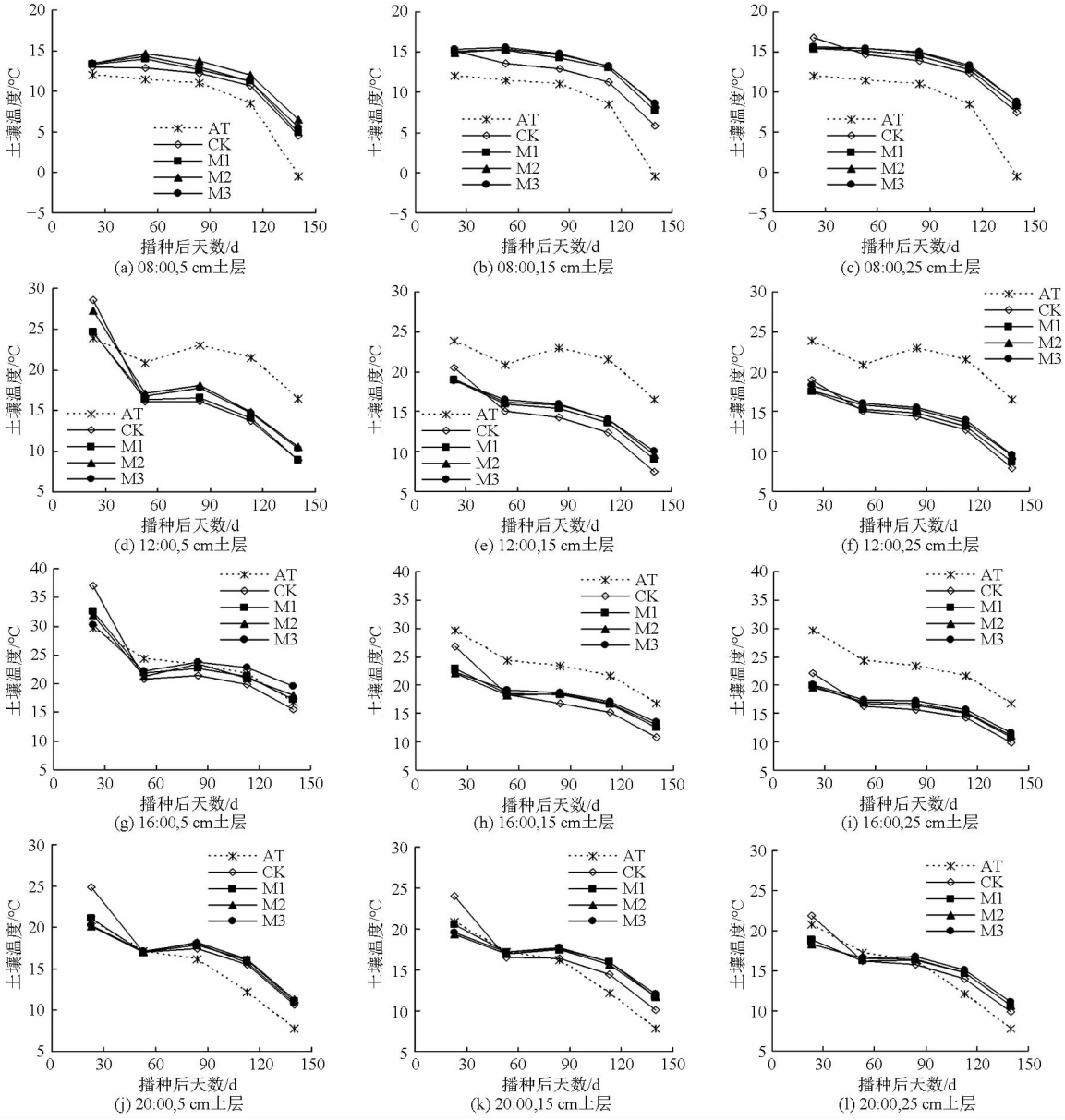

图 4 不同处理 5、15、25 cm 深度连续 3 d 平均土壤温度和田间气温(AT)随播种后天数的变化

Fig. 4 Changes of mean soil temperature at 5 cm, 15 cm, 25 cm depth during consecutive 3 d and air temperature (AT) with days after sowing under various treatments

表 1 不同生育期春青稞植株高度和干物质量

Tab. 1 Plant height and dry matter mass of spring highland barley at different growth stages

指标	处理	苗期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
株高/cm	CK	47.2 ± 1.2^{a}	91.8 ± 2.3^{a}	98.7 ± 2.4^{a}	105.7 ± 2.5^{a}	105.7 ± 2.7^{a}
	M1	43.8 ± 2.4^{b}	89.7 ± 1.6^{a}	99.7 ± 2.5^{a}	109.0 ± 1.3^{a}	109.4 ± 2.2^{a}
	M2	40.2 ± 1.3^{c}	85.3 ± 2.5^{b}	101.3 ± 2.8^{a}	114.8 ± 2.5^{b}	115.3 ± 3.3^{b}
	M3	39.4 ± 1.5^{c}	83.9 ± 2.5^{b}	103.0 ± 2.4^{a}	115.8 ± 2.5^{b}	116.6 ± 2.1^{b}
干物质量/(g·株$^{-1}$)	CK	0.54 ± 0.01^{a}	2.26 ± 0.05^{a}	3.57 ± 0.54^{a}	5.06 ± 0.32^{a}	6.19 ± 0.21^{a}
	M1	0.50 ± 0.04^{b}	2.17 ± 0.05^{a}	3.58 ± 0.32^{a}	5.17 ± 0.17^{a}	6.46 ± 0.33^{a}
	M2	0.42 ± 0.01^{c}	1.98 ± 0.06^{b}	3.62 ± 0.21^{a}	5.77 ± 0.29^{b}	7.11 ± 0.09^{b}
	M3	0.40 ± 0.01^{c}	1.95 ± 0.04^{b}	3.75 ± 0.38^{a}	5.89 ± 0.26^{b}	7.32 ± 0.41^{b}

注:数据为平均值±标准偏差;同一列数值后不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。

2.17% ~16.40% 和 4.36% ~18.26%,这一结果与蔡太义等的结论一致[25]。

2.3 秸秆覆盖量对春青稞根密度沿土层深度分布的影响

各试验处理条件下 0 ~100 cm 土层深度范围内

的根密度见表 2。从表中可以看出，0 ~ 20 cm 土层的根密度随着秸秆覆盖量的增加而降低，而 20 ~ 100 cm 土层的根密度则随之增大。这表明秸秆覆盖可能有助于促进春青稞根系的深扎，有利于提高深层土壤水分和养分的利用效率，从而提高春青稞的抗旱和抗倒伏能力。数据分析结果显示，春青稞根系主要集中在 0 ~ 20 cm 耕作层，占总根量的(57.97 ± 4.03)%，20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 土层的根系量分别占总根量的(16.80 ± 1.76)%、(10.48 ± 1.03)%、(8.28 ± 0.86)% 和(6.47 ± 0.85)%。春青稞根密度随土层深度的增加呈幂函数减小。对所有试验处理，成熟期的春青稞根密度随土层深度的变化可表示为

$$R_D = 43.237 S_D^{-1.352} \quad (n = 60,\ R^2 = 0.955) \quad (1)$$

式中　R_D——春青稞根密度，kg/m^3

S_D——土壤深度，cm

n——样本个数

2.4　秸秆覆盖量对籽粒产量及其构成因子的影响

表 3 给出了不同试验处理条件下的春青稞籽粒产量及其构成因子。表 3 数据显示，春青稞穗长和穗粒数随着秸秆覆盖量的增加而稍微减小，各试验处理对春青稞穗长和穗粒数的影响不显著。秸秆覆盖增大了春青稞千粒质量和籽粒产量，且千粒质量和籽粒产量随着秸秆覆盖量的增加而增大，这与蔡太义等的研究结论一致[25]。与对照处理相比，M1、M2 和 M3 处理的千粒质量分别增加了 4.65%、11.24% 和 13.95%，籽粒产量分别提高了 4.30%、10.97% 和 13.50%。

表 2　各试验处理条件下 0 ~ 100 cm 土层剖面的根密度

Tab. 2　Root mass density at 0 ~ 100 cm soil depth under different treatments　kg/m^3

处理	土壤深度/cm				
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100
CK	0.916 ± 0.020^a	0.215 ± 0.004^a	0.137 ± 0.015^a	0.107 ± 0.003^a	0.081 ± 0.008^a
M1	0.888 ± 0.015^a	0.230 ± 0.023^a	0.147 ± 0.009^{ab}	0.114 ± 0.008^{ab}	0.087 ± 0.008^a
M2	0.818 ± 0.021^b	0.269 ± 0.013^b	0.160 ± 0.006^b	0.129 ± 0.014^{bc}	0.104 ± 0.004^b
M3	0.808 ± 0.034^b	0.282 ± 0.006^b	0.179 ± 0.007^c	0.140 ± 0.002^c	0.112 ± 0.005^b

表 3　不同处理的春青稞产量及其构成因子

Tab. 3　Grain yield and its constitution factors of spring highland barley under different treatments

处理	穗长/cm	穗粒数/(粒·穗$^{-1}$)	千粒质量/g	籽粒产量/(kg·hm^{-2})
CK	7.1 ± 0.6^a	64.0 ± 6.8^a	51.6 ± 0.7^a	10 436.3 ± 373.4^a
M1	6.7 ± 0.2^a	62.8 ± 1.1^a	54.0 ± 1.6^a	10 885.5 ± 145.5^a
M2	6.3 ± 0.3^a	62.0 ± 2.8^a	57.4 ± 1.6^b	11 581.4 ± 209.9^b
M3	6.2 ± 0.7^a	59.3 ± 4.8^a	58.8 ± 1.3^b	11 844.7 ± 407.0^b

3　分析与讨论

3.1　气温对春青稞生长过程的影响

太阳辐射、地表植被等因素影响土壤热平衡从而导致土壤温度的不同变化。日出后，土壤吸收太阳辐射热量，表层土壤温度开始升高，且热量逐渐向土壤深处传递。随着日照时间的延长，表层土壤温度较快增加而深处土壤温度缓慢增加，从而导致土壤温度沿深度呈上大下小的分布(图 3)。而日落后，由于失去热量来源大气温度降低，土壤则向大气释放热量，表层土壤温度快速降低而深层土壤温度缓慢回落，从而导致土壤温度随土壤深度的分布逐渐过渡呈上小下大的分布(图 3)。随着土壤深度的增加，土壤与外界交换的热量逐渐减少，土壤温度随土壤深度的增减幅度也随之减小(图 3)[23]。

由于春青稞在苗期的叶片郁蔽度小，土壤温度主要由太阳的直接辐射量控制，因此土壤温度和气温随着日照时间的延长而逐渐升高，在中午时日照角和辐射强度最大，土壤温度和气温也最高(图 2)，且在苗期 5 cm 处的表层土壤温度与田间气温的日变化趋势基本一致(图 2)。土壤的温度升降程度不仅取决于进入或流出土体的热量数量，同时也与土壤本身的热力学性质如热容量、热导率或导温率有关。虽然空气的容积热容量(约 1.2×10^{-3} J/(cm^3·K))远小于土壤(约 1.9 J/(cm^3·K))，但其热导率(约 2.3×10^{-4} J/(cm^2·s·K))只有土壤的 1/100 左右($8.4 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-2}$ J/(cm^2·s·K))。况且，近地层空气的增热主要依靠吸收地面的长波辐射以及乱流输送，而对太阳直接辐射几乎不能吸收[33]。随着太阳辐射的增强，地表获得热量，地表温度以及地表释放出的长波辐射量随之增大，并通过湍流输送和平流运动等方式将热量输送给大气，从而提升近地面温度[34]。因此，在接受太阳辐射能后，春青稞苗期表层 5 cm 处土壤温度的增加速度比气温快且

其温度高于田间气温(图 2)而深处的土壤温度低于田间气温。夏季白天的表层土壤温度高于气温的现象已有较多报道[34-36]。而进入拔节期以后,随着青稞叶面积指数的增大,地面直接接受太阳直接辐射的强度和数量逐渐减少,此时土壤温度主要取决于气温[18],从而导致土壤温度低于田间气温(图 4)。

3.2 秸秆覆盖与覆盖量对土壤温度和春青稞生长的影响

秸秆覆盖不仅可减少太阳的直接辐射,增强光波反射,同时也可降低土壤热量向大气的散发[15,37],从而调节土壤温度,即在春青稞苗期降低而在其他生育期增大土壤温度(图 2~4)。秸秆覆盖量对土壤温度的影响不显著(图 2~4),可能是由于本试验处理条件下秸秆在地表的覆盖程度相差不大,因相似的地表太阳净辐射量所导致;但其对春青稞株高、干物质量、根系密度分布、千粒质量以及籽粒产量等的影响显著(表 1~3),表明增大秸秆覆盖量有利于改善春青稞的生长状况。由于涉及耕作和灌溉等农田管理以及作物病虫害问题,适宜的秸秆覆盖量需进一步进行大田试验研究。青稞为喜凉作物,苗期温度过高会导致青稞幼苗快速生长,不利于培育壮苗以及作物高产。赵艳等的研究结果显示[31],在 10~25℃范围内,青稞的发芽势、发芽率和发芽指数均随温度的升高而增强,在 25℃时达到最大值,而更高的温度将导致种子萌发指标下降。青稞幼苗的生长状况和生物量在 25℃时达到最佳状态[31]。秸秆覆盖降低了春青稞生长早期的土壤温度(图 4),抑制了青稞幼苗的过速生长,这有利于培育壮苗和防止青稞的后期倒伏。而在春青稞其他生长阶段特别是灌浆期和成熟期,由于较高的叶面积指数以及相对较低的太阳直接辐射量,土壤温度较低。而秸秆覆盖则提高了此阶段的土壤温度,使春青稞的生长环境优于对照处理,从而促进了春青稞的健康成长,这可能是秸秆覆盖条件下春青稞后期株高、干物质量、深层土壤根密度以及籽粒产量显著高于对照处理的主要原因(表 1~3)。在西藏高海拔寒区,由于秋季气温低、无霜期短,秸秆覆盖在耕作层的增温效果对保证春青稞的籽粒形成及其产量的提高具有积极的促进作用[32]。

4 结论

(1)秸秆覆盖可显著调节土壤温度。与对照相比,秸秆覆盖可降低春青稞苗期土壤温度 2.8~3.9℃,而提高其他生育期土壤温度 0.4~1.8℃。

(2)秸秆覆盖显著降低了春青稞苗期和拔节期的株高(2.29%~16.53%)和干物质量(3.98%~25.93%),而增大了灌浆期和成熟期的株高(3.12%~10.31%)和干物质量(2.17%~18.26%)。

(3)秸秆覆盖显著减小了 0~20 cm 土层的根密度而增大了其他深度的根密度。春青稞 57.97% 的根系集中在 0~20 cm 的耕作层。

(4)秸秆覆盖显著增大了春青稞千粒质量(4.65%~13.95%)和籽粒产量(4.30%~13.50%),但也在一定程度上降低了穗长和穗粒数。

(5)秸秆覆盖量(M1~M3)对土壤温度的影响不显著,但对春青稞株高、干物质量、根密度、千粒质量和籽粒产量的影响显著。高海拔寒区的昼夜温差大,秸秆覆盖在夜间对土壤温度的影响值得关注。

参 考 文 献

1 王先明. 西藏高原农业气候特点[J]. 西南农业学报,1995, 8(3):100-106.
Wang Xianming. Characteristics of agro-climate in Tibetan Plateau[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 1995, 8(3):100-106. (in Chinese)

2 西藏自治区统计局,国家统计局西藏调查总队. 西藏统计年签 2012[M]. 北京:中国统计出版社,2012.

3 艾俊峰,曹仲华. 西藏农业气候资源特点及主要气象灾害分析[J]. 安徽农学通报,2011, 17(23):158-160.

4 李惠,朗杰次仁,拉珍,等. 西藏雅鲁藏布江流域农区春季低温冷害气候特征分析[J]. 安徽农业科学,2007, 35(20):6222-6230.

5 付强,李铁男,李天霄,等. 秸秆覆盖对季节性冻融期土壤水分特征的影响[J]. 农业机械学报,2015, 46(6): 141-146.
Fu Qing, Li Tienan, Li Tianxiao, et al. Influence of straw mulching on soil moisture characteristics during seasonal freeze-thaw period[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 141-146. (in Chinese)

6 王进,白洁,陈曦,等. 新疆绿洲滴灌棉田碳通量特征研究[J]. 农业机械学报,2015, 46(2): 70-78.
Wang Jin, Bai Jie, Chen Xi, et al. Carbon fluxes in cotton field with plastic mulched drip irrigation in Xinjiang oasis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 70-78. (in Chinese)

7 郑智旗,王树东,何进,等. 耕作措施对京郊冬小麦农田 CO_2、CH_4 排放通量的影响[J]. 农业机械学报,2014, 45(增刊): 189-195.
Zheng Zhiqi, Wang Shudong, He Jin, et al. Influences of tillage methods on carbon dioxide and methane fluxes from winter wheat fields in Beijing's suburb[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 189-195. (in

Chinese)
8 Inselsbacher E, Nasholm T. A novel method to measure the effect of temperature on diffusion of plant-available nitrogen in soil[J]. Plant and Soil, 2012, 354(1-2):251-257.
9 Carranca C, Rocha I, De Varennes A, et al. Effect of tillage and temperature on nitrogen mineralization and microbial activity and microbial numbers of lupine amended soil[J]. Agrochimica, 2009, 53(3):183-195.
10 Das S, Bhattacharyya P, Adhya T K. Interaction effects of elevated CO_2 and temperature on microbial biomass and enzyme activities in tropical rice soils[J]. Environment Monitoring and Assessment, 2011, 182(1-4):555-569.
11 Sidhu A S, Sekhon N K, Thind S S, et al. Soil temperature, growth and yield of maize (*Zea mays* L.) as affected by wheat straw mulch[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2007, 53(1):95-102.
12 Gouranga K, Ashwani K. Effects of irrigation and straw mulch on water use and tuber yield of potato in Eastern India[J]. Agricultural Water Management, 2007, 97(1-3):109-116.
13 Olasantan F. Effect of time mulching on soil temperature and moisture regime and emergence, growth and yield of white yam in western Nigeria[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50(3-4):215-221.
14 汪可欣,付强,姜辛,等. 秸秆覆盖模式对玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2014, 45(12): 181-186.
Wang Kexin, Fu Qiang, Jiang Xin, et al. Effect of straw mulching mode on maize physiological index and water use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 181-186. (in Chinese)
15 Horton R, Bristow K, Kluitenberg G, et al. Crop residue effects on surface radiation and energy balance—review[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1996, 54(1):27-37.
16 Fabrizzi K, Garcia F, Costa J, et al. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 81(1):57-69.
17 Zhang S, Lovdahl L, Grip H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(1):78-86.
18 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展 I.不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应[J].干旱地区农业研究,2011, 29(5):63-74.
Cai Taiyi, Jia Zhikuan, Huang Yaowei, et al. Research progress of comprehensive effect under different rates straw mulch on the rainfed farming areas, China Ⅰ. effect of different rates of straw mulch on farmland eco-environment[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5):63-74. (in Chinese)
19 陈素英,张喜英,裴冬,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2005, 21(10): 171-173.
Chen Suying, Zhang Xiying, Pei Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 171-173. (in Chinese)
20 蔡太义,陈志超,黄会娟,等.不同秸秆覆盖模式下农田土壤水温效应研究[J].农业环境科学学报,2013, 32(7):1396-1404.
Cai Taiyi, Chen Zhichao, Huang Huijuan, et al. Effects of different modes of cropping systems using straw mulch on the soil temperature and soil water on the Weibei highland region of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(7):1396-1404. (in Chinese)
21 张伟,汪春,梁远,等.残茬覆盖对寒地旱作区土壤温度的影响[J].农业工程学报,2006, 22(5):70-73.
Zhang Wei, Wang Chun, Liang Yuan, et al. Effect of crop residue cover on soil temperature in cold and dry farming areas[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5):70-73. (in Chinese)
22 余坤,冯浩,李正鹏,等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J]. 农业机械学报,2014, 45(10): 116-123.
Yu Kun, Feng Hao, Li Zhengpeng, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 116-123. (in Chinese)
23 Chen S, Zhang X, Pei D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 150(3):261-268.
24 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2011, 42(11): 60-67.
Xie Wenyan, Fan Guisheng, Zhou Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 60-67. (in Chinese)
25 蔡太义,贾志宽,孟蕾,等.渭北旱塬不同秸秆覆盖量对土壤水分和春玉米产量的影响[J].农业工程学报,2011, 27(3):43-48.
Cai Taiyi, Jia Zhikuan, Meng Lei, et al. Effects of different rates of straw mulch on soil moisture and yield of spring maize in Weibei Highland area of China[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 43-48. (in Chinese)
26 余坤,冯浩,王增丽,等.氨化秸秆还田改善土壤结构增加冬小麦产量[J].农业工程学报,2014, 30(15):165-173.
Yu Kun, Feng Hao, Wang Zengli, et al. Ammoniated straw improving soil structure and winter wheat yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15):165-173. (in Chinese)
27 冯学民,蔡德利.土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究[J].土壤学报,2004, 41(3):489-491.
Feng Xuemin, Cai Deli. Soil temperature in relation to air temperature, altitude and latitude[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004,

41(3):489 - 491. (in Chinese)
28 Ghosh P K, Dayal D, Bandyopadhyay K K, et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2 - 3):76 - 86.
29 中华人民共和国水利部. 灌溉试验规范 SL13—2004[S]. 北京:中国水利水电出版社出版,2004.
30 黄洁,金莉莉,李振杰,等. 南疆沙漠腹地地温变化特征[J]. 干旱区资源与环境,2013, 27(1):148 - 153.
Huang Jie, Jin Lili, Li Zhenjie, et al. Variation of soil temperature characteristics at Tazhong, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1):148 - 153. (in Chinese)
31 赵艳,王连芬,杨青松. 萌发温度及品种对青稞种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子,2013, 32(11):34 - 41.
Zhao Yan, Wang Lianfen, Yang Qingsong. Effects of temperature and variety on germination and seedling growth of naked barley [J]. Seed, 2013, 32(11):34 - 41. (in Chinese)
32 Lin Rinuan, Zhang Yong. Relationship between temperature and grain formation in later development period of winter wheat in Lhasa[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(3):321 - 326.
33 刘助. 近地面气温和土壤温度的观测[J]. 气象,1976(1):27 - 28.
34 李超,刘厚通,迟如利,等. 草地下垫面地表温度与近地面气温的对比研究[J]. 光学技术,2009, 35(4):635 - 639.
Li Chao, Liu Houtong, Chi Ruli, et al. Comparative study of grass land surface temperature and near-surface air temperature[J]. Optical Technique, 2009, 35(4):635 - 639. (in Chinese)
35 周斌,陈鹏狮,李晶,等. 辽宁省春季表层地温变化特征及其与气温的关系[J]. 中国农学通报,2014, 30(36):275 - 280.
Zhou Bin, Chen Pengshi, Li Jing, et al. Variation characteristics of surface ground temperature of Liaoning in spring[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(36):275 - 280. (in Chinese)
36 阿帕尔,叶尔克江,冯俊平. 昌吉市地温与气温关系初探[J]. 沙漠与绿洲气象,2007, 1(3):53 - 56.
Apar, Erkejan, Feng Junping. Analysis on the relation between soil temperature and air temperature of Changji City[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(3):53 - 56. (in Chinese)
37 付强,马梓舅,李天霄,等. 北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J]. 农业机械学报,2014, 45(12): 152 - 159.
Fu Qing, Ma Ziao, Li Tianxiao, et al. Variability of soil temperature under different coverage conditions in alpine region of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 152 - 159. (in Chinese)

(上接第 150 页)

27 Kuscu H, Turhan A, Ozmen N, et al. Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.)[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2014, 55(2): 103 - 114.
28 周罕觅, 张富仓, 李志军, 等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 171 - 180.
Zhou Hanmi, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12):171 - 180. (in Chinese)
29 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉量对小麦氮素吸收和运转的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(10): 1002 - 1007.
Xu Zhenzhu, Yu Zhenwen, Wang Dong, et al. Effects of irrigation amount on absorbability and translocation of nitrogen in winter wheat [J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(10): 1002 - 1007. (in Chinese)
30 王建伟, 周凌云, 柯用春. 土壤水分对金银花中硝酸盐和绿原酸含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(4):721,731.
Wang Jianwei, Zhou Lingyun, Ke Yongchun. Effect of soil moisture on the content of nitrate and chlorogenic acid in honeysuckle [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(4):721,731. (in Chinese)
31 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量, 品质和水氮利用的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 713 - 726.
Xing Yingying, Zhang Fucang, Zhang Yan, et al. Effect of irrigation and fertilizer coupling on greenhouse tomato yield, quality, water and nitrogen utilization under fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 713 - 726. (in Chinese)
32 郝文雅, 刘德辉, 徐飞, 等. 施肥对栽培菊花土壤的有机无机复合性状和菊花产量与品质的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4): 616 - 621.
Hao Wenya, Liu Dehui, Xu Fei, et al. Fertilization effects on organo-mineral complex status in soil and on yield and quality of *Chrysanthemum morifolium*[J]. Soils, 2008, 40(4): 616 - 621. (in Chinese)
33 李学俊. 小粒种咖啡栽培与初加工[M]. 昆明: 云南大学出版社, 2014.
34 刘小刚,符娜,李闯,等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J]. 农业机械学报,2015,46(9):188 - 197.
Liu Xiaogang, Fu Na, Li Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(9):188 - 197. (in Chinese)