文章编号:1000-7601(2019)04-0193-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.04.26

秸秆覆盖下油菜间作紫云英的土壤微环境效应

周 泉[1,2],陈 娇[1],石 超[1],邢 毅[1],马淑敏[1],张小短[1],王龙昌[1]

(1.西南大学农学与生物科技学院/三峡库区生态环境教育部重点实验室/南方山地农业教育部工程研究中心,重庆 400716;
2.江西农业大学生态科学研究中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,江西 南昌 330045)

摘 要:为探索绿肥紫云英在我国西南地区旱地的应用前景,通过秸秆覆盖下种植紫云英,探讨其对土壤微环境的影响。结果表明:秸秆覆盖可显著提高 10 cm 土层农田土壤温度,在整个生育期内平均可提高 0.11℃,同时间作紫云英显著提高了油菜苗期 10 cm 处的土壤温度,且在秸秆覆盖下表现更为明显;秸秆覆盖对 0~5 cm 土层土壤含水量和土壤电导率的影响较小,紫云英单作显著提高了 0~5 cm 土层土壤含水量,其平均土壤含水量为 0.26 $m^3 \cdot m^{-3}$,而紫云英油菜间作则降低了 0~5 cm 土层土壤含水量和土壤电导率,其平均土壤含水量和土壤电导率分别为 0.24 $m^3 \cdot m^{-3}$和 0.16 $dS \cdot m^{-1}$。另外,不同种植模式对农田土壤养分的影响主要体现在玉米季,而且种植紫云英对油菜季和玉米季的土壤养分综合评价均较好,秸秆覆盖下紫云英单作评价值最高,其中油菜季为 1.101,玉米季为 1.214。可见,西南旱地秸秆覆盖下种植紫云英可改善农田土壤水热环境,同时有较好的土壤养分综合评价效果。

关键词:紫云英;油菜;秸秆覆盖;土壤水热因子;土壤养分

中图分类号:S181;S344.2;S55 **文献标志码**:A

Effects of Chinese milk vetch intercropping with rapeseed under straw mulching on soil microenvironment

ZHOU Quan[1,2], CHEN Jiao[1], SHI Chao[1], XING Yi[1], MA Shu-min[1], ZHANG Xiao-duan[1], WANG Long-chang[1]

(1. *College of Agronomy and Biotechnology*, *Southwest University / Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region*, *Ministry of Education / Engineering Research Center of South Upland Agriculture*, *Ministry of Education*, *Chongqing*, 400716, *China*;
2. *Research Center on Ecological Sciences*, *Jiangxi Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology*, *Ecology and Genetic Breeding*, *Ministry of Education*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330045, *China*)

Abstract: In order to explore the application of green manure on upland in southwestern China through plantingChinese milk vetch under straw mulching, we compared effects on soil microenvironment. The purpose was to provide a theoretical basis for the feasibility of planting Chinese milk vetch in rapeseed field. The soil hydrothermal factor and soil nutrient were examined. Results showed that straw mulching significantly improve the soil temperature of farmland at 10 cm, 0.11℃ in the whole growth stage. And intercropping can significantly improve the soil temperature of farmland at 10 cm in the seedling stage, more significantly with straw mulching. The effect of straw mulching on soil moisture and soil conductivity in 0~5 cm was small, but the soil moisture content of the soil was improved by 0.26 $m^3 \cdot m^{-3}$ in Chinese milk vetch monoculture and the soil moisture and soil conductivity were decreased by 0.24 $m^3 \cdot m^{-3}$ and 0.16 $dS \cdot m^{-1}$ inintercropping. Furthermore, the effects of different planting patterns on soil nutrients were mainly reflected in maize season. The comprehensive effect of soil nutrients in rape season and maize season by planting Chinese milk vetch was better than any other treatments. The nutrient comprehensive evaluation value(NCEV)was 1.101 in rape season and 1.214 in maize season with Chinese milk vetch mono-

收稿日期:2018-10-30 **修回日期**:2018-01-06
基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201503127);国家自然科学基金项目(31271673)
作者简介:周泉(1987-),男,山东济宁人,助理研究员,主要研究方向为生态农业与可持续发展。E-mail: zhouquanyilang@163.com
通信作者:王龙昌(1964-),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为生态农业与可持续发展。E-mail: wanglc2003@163.com

culture and straw mulching treatment. In conclusion, the soil hydrothermal microenvironment was improved effectively by planting Chinese milk vetch under straw mulching, and the comprehensive effect of soil nutrient was preferably.

Keywords: Chinese milk vetch; rape; straw mulching; soil hydrothermal factor; soil nutrient

土壤是作物生长发育的基础,改善土壤微环境是调控作物生长发育,提高作物产量的重要措施。土壤微环境包括土壤物理性状、养分含量、土壤微生物数量等指标[1],通过对土壤的水、肥、气、热及其物理、化学和生物学过程等因素的调控,进而影响植物对养分吸收和植株的生长发育,实现作物高产[2-3]。

研究表明,间作可以促进作物利用深层土壤水分,增强土壤保水性,对土壤水分的年际平衡没有负影响,同时还可降低高温期的土壤温度[4-5],而对于土壤养分,间作则可以改善当季土壤速效养分变化情况及提高植物养分吸收性能[6]。秸秆覆盖条件下土壤温度的季、日变化均趋向缓和,在低温时具有“增温效应”,而高温时则有“低温效应”,两种效应在作物不同生育时期,对其生长均十分有利,可有效地减缓地温剧变对作物造成的伤害[7-8]。总体而言,秸秆覆盖的“低温效应”更受研究者关注。而对土壤水分的影响则主要是促进降水入渗、减少土壤水分蒸发、提高土壤含水率、增加土壤贮水量等。对土壤养分的影响则主要是来自农作物秸秆自身的有机质及营养元素,也是土壤养分及有机质的重要补充来源,同时还会影响作物对土壤养分的吸收利用[9]。

目前,学者对种植紫云英和秸秆覆盖条件下的土壤微生物和土壤呼吸特征已进行了探讨[10-11],但对影响土壤微生物和土壤呼吸较大的土壤微环境因子(土壤水热因子和土壤养分)还未进行深入分析。实际上,土壤微生物受环境影响敏感,土壤营养状况、pH 值、温度、水分等都会对其产生影响,环境变化会导致土壤微生物多样性及其生态功能的变化[12];土壤呼吸与土壤微环境的关系同样是土壤呼吸研究的重点,主要集中在温度和水分对土壤呼吸的影响,例如土壤温度与土壤呼吸的关系常采用 Q10 值表示,是呼吸速率对温度变化的敏感性指标[13]。因此,本研究在前期研究的基础上,进一步分析种植紫云英和秸秆覆盖对油菜田间土壤微环境的影响,以期为我国西南旱地种植紫云英的可行性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015 年 10 月至 2016 年 9 月在重庆市北碚区西南大学教学试验农场进行。当地多年平均降雨量 1 156.8 mm,其中春、夏、秋、冬降雨量分别为全年的 25.3%、46.8%、22.5%和 5.4%(试验期间降水量如图 1),年蒸发量 1 181.1 mm,年日照时数 888.5~1 539.6 h,日照百分率仅为 25%~35%,冬季日照更少,仅占全年的 10%左右。试验所用土壤为西南旱地紫色土,地力相对均匀。试验前土壤 pH 值 6.3,土壤有机碳 8.6 g · kg^{-1},碱解氮 80.4 mg · kg^{-1},速效磷 41.1 mg · kg^{-1},速效钾 106.2 mg · kg^{-1}。

1.2 试验设计

采取大田试验,随机区组排列,2×3 双因素试验设计,设 2 种覆盖方式:无秸秆覆盖(T),作物生长期内均不进行秸秆覆盖;秸秆覆盖(S),于作物播种期将 3 750 kg · hm^{-2}玉米秸秆均匀覆盖(11.25 kg · $30m^{-2}$)。设 3 种种植方式:油菜单作(R),采用宽窄行穴播方式,株距 20.0 cm,宽行距 80.0 cm,窄行距 20.0 cm;紫云英单作(A),紫云英单作,采用撒播方式,播种量为 45 kg · hm^{-2};紫云英间作油菜(AR),紫云英撒播在宽行内,播种量为 45 kg · hm^{-2},油菜穴播。共 6 个处理:TR(油菜单作+无秸秆覆盖)、TA

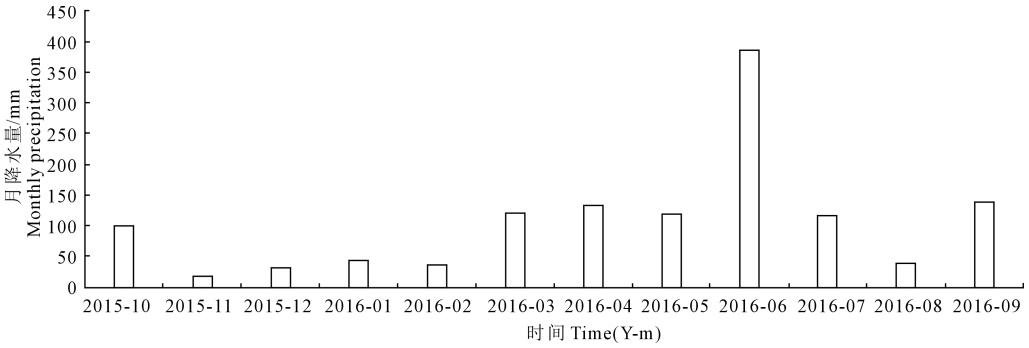

图 1 试验期间降水量概况

Fig.1 Precipitation during the test period

(紫云英单作+无秸秆覆盖)、TAR(紫云英油菜间作+无秸秆覆盖)、SR(油菜单作+秸秆覆盖)、SA(紫云英单作+无秸秆覆盖)、SAR(紫云英油菜间作+秸秆覆盖)。

大田小区试验为 3 次重复,小区面积 3.5 m×7.8 m,施肥、播种(移栽)等其他田间管理均按丰产栽培要求设计。施氮肥(N)180 kg·hm^{-2},磷肥(P_2O_5)180 kg·hm^{-2},钾肥(K_2O)180 kg·hm^{-2},复合肥为三洋牌 16-16-16 三元素复合肥,所有肥料均于播种前一次施入。紫云英和油菜播种时间为 2015 年 10 月,收获时间为 2016 年 5 月;玉米播种时间为 2016 年 5 月,收获时间为 2016 年 8 月。紫云英于开花期收割还田,翻耕于宽行内,油菜收获后于宽行内种植玉米,玉米穴播。

1.3　测定指标与方法

土壤水热因子的测定:于油菜生育期从 2015 年 11 月 1 日起,每隔 15 d 在 9∶00—11∶00 测定一次。用 LI6400-09 自带的温度探针测定深度 10 cm 处的土壤温度,用 ProCheck 手持式多功能读表(Decagon 公司)连接的 GS3 传感器测定土层深度 0~5 cm 的体积含水量和电导率,每个处理每个重复均测定 5 个原始值。

土壤样品采集:于油菜收获季和玉米收获季采用五点法采集耕层土壤样品,并将取得的土样弄碎混匀,按 4 分法取样,用无菌塑料袋包好,带回实验室后,自然晾干过筛后用于油菜季和玉米季土壤养分的测定。

土壤养分的测定:土壤 pH 值用 pH 计测定;土壤全氮用半微量开氏法,使用全自动凯氏定氮仪(Kjeltec™ 2300, FOSS)进行分析测定;土壤全磷用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定;土壤全钾用 NaOH 熔融-原子分光光度法测定;土壤碱解氮用碱解扩散法测定;土壤有效磷用 Black 法(HCl-NH_4F)测定;土壤速效钾用 NH_4Ac 浸提-原子分光光度法测定。

土壤养分综合评价值(Nutrient comprehensive evaluation value, NCEV)计算公式如下:

$$NCEV = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i \quad (n = 1,2,\cdots,7)$$

$$R_i = A_i / A_{i0}$$

式中,$NCEV$ 是土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾 7 个指标的综合评价值;R_i 是某处理第 i 个指标的相对值;A_i 是某处理第 i 个指标的测定值;A_{i0} 是对照处理第 i 个指标的测定值。

1.4　数据统计与分析

用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 软件进行数据整理、分析,采用 General Linear Model 进行单变量双因素方差分析,多重比较采用 Duncan's 新复极差法。

2　结果与分析

2.1　秸秆覆盖下油菜间作紫云英对土壤水热因子的影响

2.1.1　土壤温度　由表 1 可知,间作紫云英和秸秆覆盖对农田土壤温度影响显著,尤其是秸秆覆盖的影响更为明显。在油菜整个生育期,主要表现为秸秆覆盖提高了农田土壤温度。在油菜苗期前期(2015 年 11 月),秸秆覆盖可显著提高 10 cm 处的土壤温度,而在苗期中期(2015 年 12 月)紫云英油菜间作可显著提高土壤温度。在油菜蕾薹期(2016 年 2 月),处于油菜生育期的最低温,仍表现为秸秆

表 1　间作紫云英和秸秆覆盖对土壤温度的影响/℃

Table 1　Effects of intercropping Chinese milk vetch and straw mulching on soil temperature

日期 Date(Y-m-d)	TR	TA	TAR	SR	SA	SAR
2015-11-01	12.52±0.59d	12.50±0.36d	12.64±0.45cd	12.88±0.16bc	13.19±0.39a	13.09±0.31ab
2015-11-15	13.86±0.18c	13.82±0.03c	14.08±0.08ab	14.10±0.11ab	14.02±0.12b	14.21±0.02a
2015-12-01	12.61±0.68a	12.37±0.32a	12.63±0.51a	12.31±0.34a	12.42±0.43a	12.65±0.63a
2015-12-15	6.87±0.42b	7.11±0.10ab	7.32±0.24a	7.36±0.06a	7.21±0.14ab	7.38±0.06a
2016-01-01	11.75±0.44a	11.90±0.19a	12.04±0.17a	11.71±0.06a	11.83±0.15a	11.78±0.26a
2016-01-15	9.55±1.80a	9.52±1.69a	9.62±1.65a	9.65±1.67a	10.48±0.33a	10.38±0.36a
2016-02-01	1.91±0.35abc	1.49±0.38c	1.70±0.57bc	1.83±0.08abc	2.16±0.44ab	2.35±0.70a
2016-02-15	7.36±1.29a	7.23±1.29a	6.88±1.53a	5.98±0.90a	5.77±0.11a	5.77±0.27a
2016-03-01	8.62±0.12b	9.04±0.24ab	9.07±0.62ab	9.13±0.39ab	9.30±0.37a	9.15±0.05b
2016-03-15	11.60±0.27a	11.89±0.19a	11.80±0.10a	11.90±0.35a	11.87±0.15a	11.81±0.05a
2016-04-01	10.47±0.66b	10.54±0.08b	10.55±0.45b	10.72±0.63ab	11.00±0.40ab	11.60±1.17a
2016-04-15	19.08±1.98a	18.00±0.28a	18.08±0.43a	18.09±0.37a	18.24±0.11a	18.59±0.90a
2016-05-01	17.43±0.19ab	17.49±0.06ab	17.38±0.12b	17.54±0.07a	17.58±0.04a	17.55±0.05a

注:TR 为油菜单作+无秸秆覆盖;TA 为紫云英单作+无秸秆覆盖;TAR 为紫云英油菜间作+无秸秆覆盖;SR 为油菜单作+秸秆覆盖;SA 为紫云英单作+秸秆覆盖;SAR 为紫云英油菜间作+秸秆覆盖。不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: TR: rape monoculture + no straw mulching; TA: Chinese milk vetch monoculture + no straw mulching; TAR: rape intercropped with Chinese milk vetch + no straw mulching; SR: rape monoculture + straw mulching; SA: Chinese milk vetch monoculture + straw mulching; SAR: rape intercropped with Chinese milk vetch + straw mulching. Different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

覆盖可显著提高 10 cm 处的土壤温度。在油菜开花期(2016 年 3 月),紫云英和秸秆覆盖对 10 cm 处的土壤温度无显著影响。在油菜角果期(2016 年 4-5 月),秸秆覆盖下紫云英油菜间作可显著提高 10 cm 处的农田土壤温度。总的来看,除油菜花期之外,秸秆覆盖可显著提高其他各生育期 10 cm 处的土壤温度,而紫云英油菜间作对土壤温度的影响较小。

2.1.2 土壤水分 由图 2 可知,油菜生育期内 0~5 cm 土层土壤水分含量出现 4 个峰值,其中最高值出现在 2016 年 1 月 1 日,最低值出现在 2015 年 12 月 15 日,不同处理之间土壤含水量的差异性主要表现在 2015 年 11 月-2016 年 1 月,集中在油菜苗期。总的来看,紫云英单作处理的土壤水分含量处在较高水平,紫云英油菜间作处理的土壤水分含量处在较低水平。

2.1.3 土壤电导率 由图 3 可知,不同处理间 0~5 cm 土层土壤电导率的差异主要体现在 2015 年 11 月-2016 年 1 月,集中在油菜苗期,整个生育期呈现不断下降的趋势,仅在 2016 年 1 月 1 日出现一个峰值。总的来看,单作处理的土壤电导率要显著高于间作处理,同时与土壤水分含量之间呈现出一定的相关性。

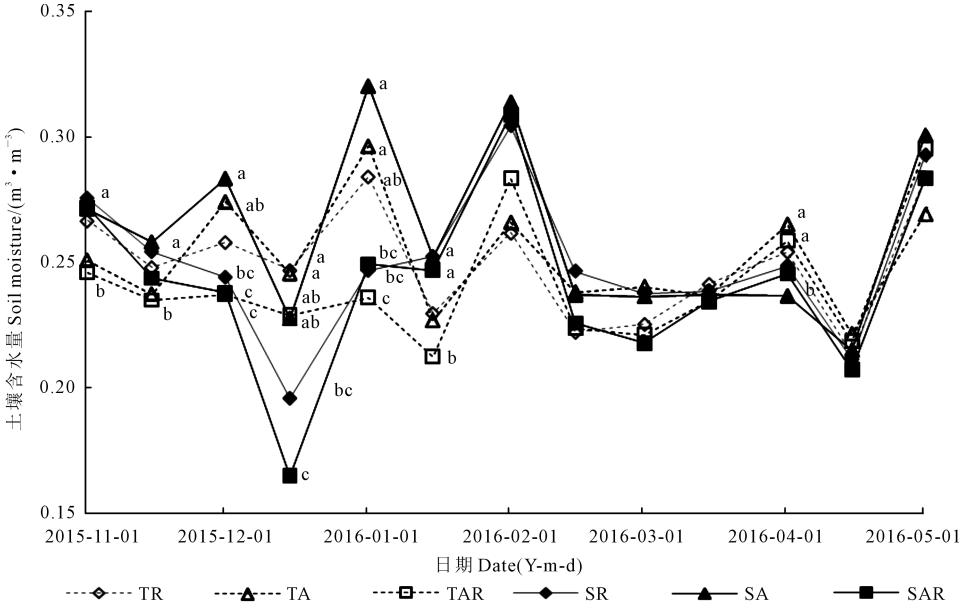

图 2 间作紫云英和秸秆覆盖对土壤水分的影响

Fig.2 Effects of intercropping Chinese milk vetch and straw mulching on soil moisture

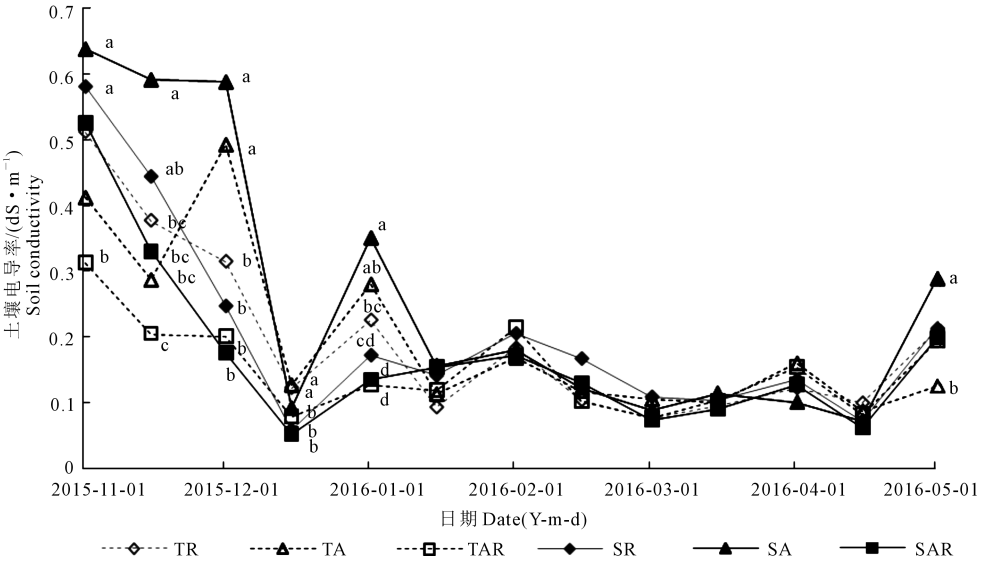

图 3 间作紫云英和秸秆覆盖对土壤电导率的影响

Fig.3 Effects of intercropping Chinese milk vetch and straw mulching on soil electrical conductivity

2.2　秸秆覆盖下油菜间作紫云英对土壤养分的影响

2.2.1　油菜季土壤养分　由图 4 可知,不同处理对油菜季土壤养分的影响较小,对土壤 pH 值、有机质、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾的影响均不显著,仅对土壤全氮含量的影响差异显著($P<0.05$)。对土壤 pH 值,紫云英单作时有所降低,但差异并不显著;对土壤有机质,各处理间也无显著差异;对土壤全氮,紫云英单作显著提高了土壤全氮含量;对土壤全磷,无秸秆覆盖时紫云英单作最低,秸秆覆盖时则最高,但差异也不显著;对土壤全钾、碱解氮和速效钾,则表现为紫云英单作时最高;对土壤有效磷,则是在紫云英油菜间作时表现最低。

2.2.2　玉米季土壤养分　由图 5 可知,不同处理之间对玉米季土壤养分的影响不同,除了对土壤 pH 值和全钾影响不显著之外,对土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾的影响均达到显著水平($P<0.05$)。对土壤有机质,秸秆覆盖处理的表现高于无秸秆覆盖,同时紫云英单作表现较高,且差异显著;对土壤全氮,紫云英单作显著提高了土壤全氮含量,而且在无秸秆覆盖时表现更明显;对土壤全磷,则是秸秆覆盖下紫云英油菜间作显著降低了其含量;对土壤碱解氮、有效磷和速效钾,同样是紫云英单作显著提高了其含量。

总的来看,紫云英和秸秆覆盖对土壤养分的影响在油菜季影响较小,其影响在玉米季表现的更为明显。紫云英单作在年内就可显著提高土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾的含量,但秸秆覆盖和紫云英油菜间作在年内对土壤养分的影响有限。

2.2.3　土壤养分综合评价　由表 2 可知,不同处理油菜季土壤养分综合评价排列次序为:SA>TA>SR>SAR>TAR>TR,说明不同处理与油菜单作相比,均提高了油菜季土壤养分综合评价值,综合效果均优于油菜单作,其中紫云英单作最好。不同处理玉米季土壤养分综合评价排列次序为:SA>TA>SR>SAR

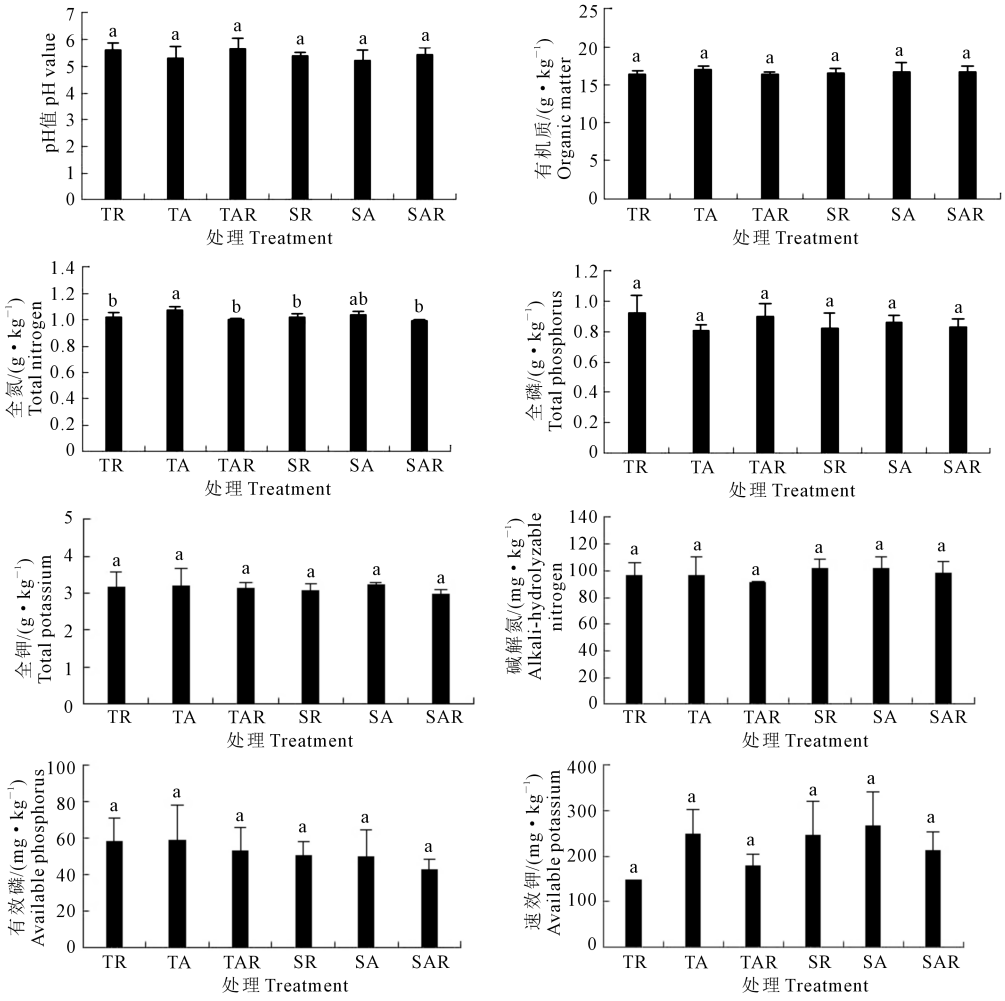

图 4　间作紫云英和秸秆覆盖对油菜季土壤养分的影响

Fig.4　Effects of intercropping Chinese milk vetch and straw mulching on soil nutrients in rape season

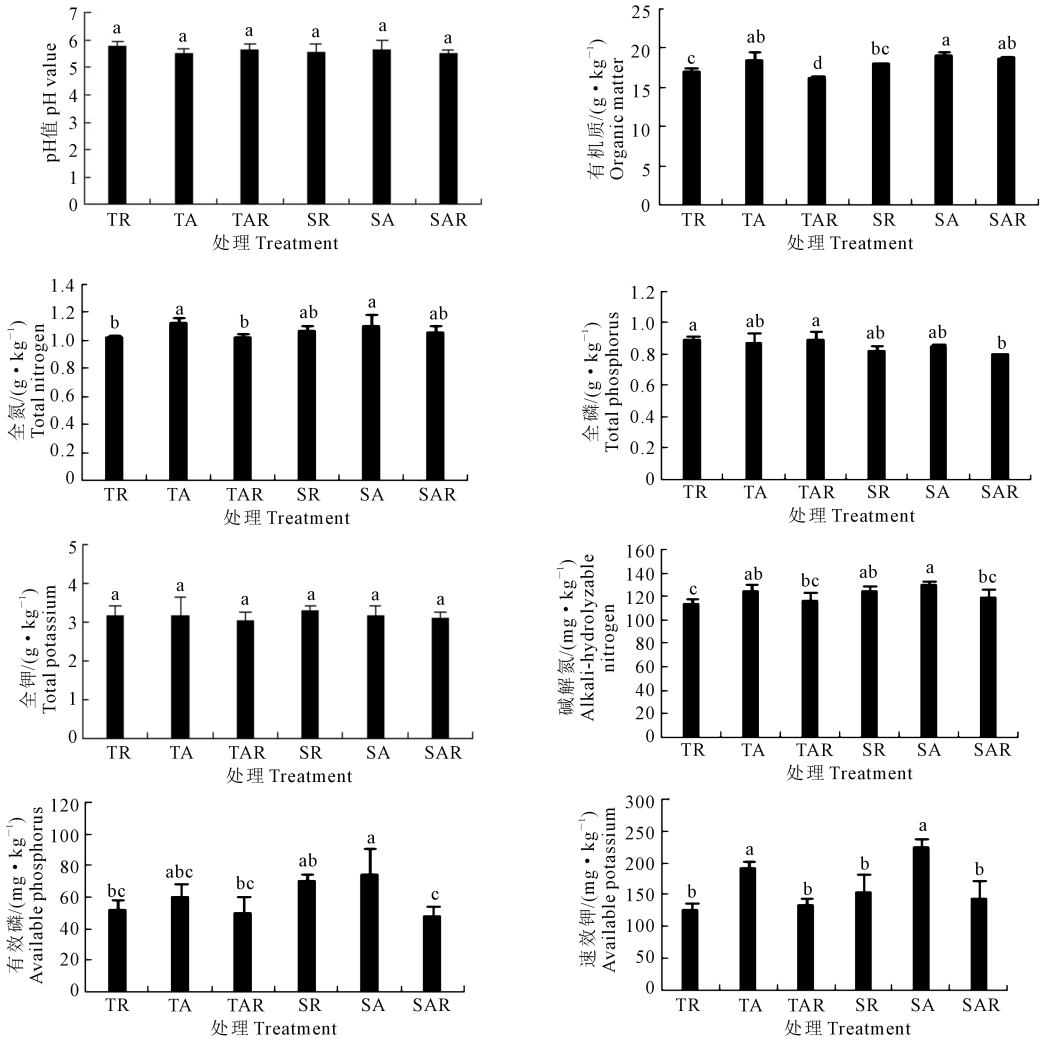

图 5 间作紫云英和秸秆覆盖对玉米季土壤养分的影响

Fig.5 Effects of intercropping Chinese milk vetch and straw mulching on soil nutrients in maize season

表 2 不同处理的土壤养分综合评价

Table 2 Effects of different treatments on nutrient comprehensive evaluation value(NCEV)

处理 Treatment	油菜季 Rape season	玉米季 Maize season
TR	1.000	1.000
TA	1.099	1.134
TAR	1.004	0.993
SR	1.067	1.104
SA	1.101	1.214
SAR	1.006	1.017

>TR>TAR,说明除无秸秆覆盖下的紫云英油菜间作之外,其他处理均提高了玉米季土壤养分综合评价值,综合效果均优于油菜单作,紫云英单作效果最好。由此可见,从土壤养分综合评价的角度来讲,不同处理对油菜季和玉米季的土壤养分综合评价较好,其中紫云英单作评价值最高,效果最优。

3 讨 论

本研究发现,秸秆覆盖可提高冬季农田土壤温度,而绿肥间作在一定程度上削弱了秸秆覆盖的增温效应。一般来讲,秸秆覆盖在低温下具有保温作用,在高温下具有降温作用[14],目前,在小麦、棉花、玉米、大豆等作物上发现,秸秆覆盖与无覆盖相比,都会出现前期低温季节增温、后期高温季节降温的双重效应,并能平抑地温在季节间和昼夜间的剧烈变化,这种双重效应被认为是覆盖增产的重要机制[15-18]。本研究得出的秸秆覆盖在冬季低温下可提高土壤温度的结果与一般研究结果一致[15-18]。另外,目前对果麦、林草等农林间作系统的研究结果表明,间作能够降低土壤温度[19-21],这与本研究中绿肥间作对土壤增温有削弱作用一致。因此,当绿肥间作与秸秆覆盖相结合,可以平稳地抑制土壤温度在季节间和昼夜间的剧烈变化,增强了土壤温

度的稳定性。

单作紫云英还提高了农田土壤含水量,并在秸秆覆盖下保水效应更加明显,这主要是因为紫云英作为一种农田绿色覆盖措施增加了农田地表覆盖率,减少了水分流失。但研究同时发现,当紫云英与油菜混作时反而降低了土壤含水量,这主要是因为紫云英促进了油菜生长,两者共同作用增加了对水分的吸收利用。另外,各处理土壤电导率变化特征与土壤含水量的变化特征基本一致,主要是因为土壤电导率与土壤含水量之间有一定的正相关关系[22]。秸秆覆盖条件下种植紫云英的土壤电导率较高,说明土壤总盐量升高,这主要是由于季节性覆盖(秸秆覆盖、绿色覆盖)改变了土壤自然状态下的水热平衡,土壤得不到雨水充分淋洗,致使盐分在土壤表层上聚集。

目前,对农田绿肥的研究发现,种植绿肥可以提高农田土壤养分[23],这与本研究中发现种植紫云英可提高玉米季的土壤养分含量一致。之所以没有显著提高油菜季的土壤养分,主要是因为本试验是紫云英与油菜间作,在油菜季并没有进行绿肥还田。总的来看,种植紫云英提高了农田土壤养分的综合评价值。

4　结　论

秸秆覆盖可显著提高 10 cm 处的土壤温度,而间作紫云英对土壤温度影响较小;秸秆覆盖对 0~5 cm 土层的土壤含水量和土壤电导率的影响较小,紫云英单作提高了土壤含水量,而紫云英油菜间作则降低了土壤含水量和土壤电导率。不同种植模式对农田土壤养分的影响主要体现在玉米季,而且种植紫云英对油菜季和玉米季的土壤养分综合评价均较好,其中紫云英单作评价值最高,效果最优。

参 考 文 献:

[1] 刘福德, 孔令刚, 安树青, 等. 连作杨树人工林不同生长阶段林地内土壤微生态环境特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 121-125.

[2] Arvidsson J. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction[J]. Plant and Soil, 1999,208(1):9-19.

[3] Buttery B R, Tan C C, Drury C F, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil typeon growth and nodulation of soybean and common bean[J]. Revue canadienne De phytotechnie, 1998,78(4):571-576.

[4] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 不同种植模式对南方丘陵旱地土壤水分利用与作物周年生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3606-3617.

[5] 张绪成, 王红丽, 于显枫, 等. 半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J]. 中国农业科学, 2016, 49(3): 468-481.

[6] 杜青峰, 王党军, 于翔宇, 等. 玉米间作夏季绿肥对当季植物养分吸收和土壤养分有效性的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 225-233.

[7] 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): 63-68.

[8] 毛瑞洪. 夏闲地麦糠覆盖增产效果分析[J]. 中国农业气象, 1993, 14(4): 36-38.

[9] 蔡太义. 渭北旱塬不同秸秆覆盖量对农田环境和春玉米生理生态的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.

[10] 周泉, 张小短, 马淑敏, 等. 间作绿肥对油菜根际土壤碳氮及根际微生物的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(23): 7965-7971.

[11] 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 等. 绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1114-1120.

[12] 胡水金. 土壤微生物对全球变化的响应[C]//第三届现代生态学讲座暨国际学术研讨会论文集.北京:国家自然科学基金委员会, 2009: 155-179.

[13] Simmons J A, Fernandez I J, Briggs R D, et al. Forest floor carbon pools and fluxes along a regional climate gradient in Maine, USA[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 84(1-3):81-95.

[14] 刘炜, 高亚军, 杨君林, 等. 旱地冬小麦返青前秸秆覆盖的土壤温度效应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(4): 197-201.

[15] Cao J S, Zhou X, Zhang W J, et al. Effects of mulching on soil temperature and moisture in the rainfed farmland of summer corn in the Taihang Mountain of China[J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2012, 10(1):519-523.

[16] Gan Y T, Siddique K H M, Turner N C, et al. Chapter Seven-Ridge-Furrow Mulching Systems-An Innovative Technique for Boosting Crop Productivity in Semiarid Rain-Fed Environments[J]. Advances in Agronomy (Book series), 2013, 118:429-476.

[17] Yuan X F, Wu P T, Wang Y K, et al. Soil moisture conserving irrigation under straw mulch with no-tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(7):22-26.

[18] Zhang S L, 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 & Tillage Research, 2009,102(1): 78-86.

[19] 黄爱军, 乔旭, 陈兴武, 等. 果麦间作系统小气候特征研究[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 88-95.

[20] 彭晚霞, 宋同清, 肖润林, 等. 覆盖与间作对亚热带丘陵茶园地温时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 778-782.

[21] 宋同清, 王克林, 彭晚霞, 等. 亚热带丘陵茶园间作白三叶草的生态效应[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3647-3655.

[22] 曹巧红, 龚元石. 土壤电导率对时域反射仪测定土壤水分的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(4): 483-490.

[23] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区春玉米-冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 1005-1011.