

# 不同地表覆盖物对城郊农业区葡萄园土壤呼吸及水热环境的影响

郝旺林<sup>1,2,3</sup>, 梁银丽<sup>1,2,4</sup>, 穆兰<sup>5</sup>, 印宁<sup>4</sup>, 许明祥<sup>1,2,4</sup>

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100190; 3.吕梁学院 生命科学系, 山西 吕梁 033000; 4.西北农林科技大学

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.陕西师范大学 西北历史环境与经济社会发展研究院, 西安 710061)

**摘要:**为探讨不同覆盖物对城郊农业区葡萄园土壤呼吸及水热环境影响,设置对照 CK(露地),种植酢浆草、白三叶草,覆盖黑膜、白膜 5 个处理,监测生长—生产期土壤呼吸、水热环境,然后分析了其响应关系。结果表明:(1) 4 种不同覆盖处理下相比露地(CK)显著提高了葡萄园土壤呼吸速率( $p < 0.05$ ),呼吸速率总体表现为:白三叶 > 黑膜 > 白膜 > 酢浆草。各处理土壤呼吸速率变化峰值均出现在 8 月份;(2) 4 种不同覆盖处理下葡萄园土壤水分在不同时期呈现出较为明显的剖面垂直分异特征,各处理相比露地(CK)表现出明显的土壤水分保持能力,林下覆膜(黑膜、白膜)相比林下生草(酢浆草、白三叶)表层持水保水能力表现突出,林下覆膜处理(黑膜、白膜)平均温度均高于 CK(露地),而林下生草覆盖处理(酢浆草、白三叶)平均温度均低于 CK,林下覆膜处理增温效果整体强于林下生草覆盖处理。黑膜的增温效果相对较强,在维持土壤温度稳定也要优于其他处理,而露地维持温度稳定相对最差;(3) 林下覆膜模式土壤呼吸与土壤水分呈现显著二次函数关系( $p < 0.05$ ),而林下生草模式土壤呼吸与土壤水分呈现指数函数关系( $p < 0.05$ ),各处理土壤温度(5 cm)与土壤呼吸速率呈现指数函数关系,且各处理温度敏感系数表现为:黑膜 > CK(露地) > 白膜 > 白三叶 > 酢浆草。从节能减排、涵养水源角度出发,酢浆草与黑膜是较为适宜的覆盖模式;但如果进一步考虑减少环境污染、提高植物生产碳源,保持城郊农业高效可持续发展,酢浆草与白三叶草覆盖模式,更适宜于新型城郊农业生产。

**关键词:**城郊农业; 土壤呼吸; 水分; 温度; 覆盖模式

中图分类号:S663.1; S152

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0065-10

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2021.06.006

## Effects of Different Surface Mulches on Soil Respiration and Hydrothermal Environment in Urban Vineyards

HAO Wanglin<sup>1,2,3</sup>, LIANG Yinli<sup>1,2,4</sup>, MU Lan<sup>5</sup>, YIN Ning<sup>4</sup>, XU Mingxiang<sup>1,2,4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Department of Life Sciences, Lüliang University, Lüliang, Shanxi 033000, China; 4. Institute of Soil and

Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Northwest Institute of

Historical Environment and Socio-Economic Development, Shaanxi Normal University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To explore the effects of different mulches on the soil respiration and hydrothermal environment of orchards in urban vineyards, five field treatments including CK (open field), planting *Oxalis corniculata* L. and *Trifolium repens* L., covering with black film and white film were designed, soil respiration and hydrothermal environment during growth-production period were monitored, and the response relationship between them were analyzed. The results showed that: (1) compared with bare ground surface (CK), the soil respiration rate of vineyards under four different mulches significantly increased ( $p < 0.05$ ), and the respiration rate of vineyards was as follows: *Trifolium repens* L. > black film > white film > *Oxalis cornicu-*

收稿日期:2020-11-13

修回日期:2020-11-29

资助项目:国家科技支撑计划子课题(2014BAD14B006);国家自然科学基金(41771318, 41830758);山西省高等学校科技创新项目(2020L0680);吕梁市重点研发项目(2020SHFZ45)

第一作者:郝旺林(1984—),男,山西五寨人,讲师,博士,主要从事土壤生态与碳循环研究。E-mail:haowanglin@nwsuaf.edu.cn

通信作者:许明祥(1972—),男,陕西吴县人,研究员,博士,主要从事土壤生态与碳循环研究。E-mail:xumx@nwsuaf.edu.cn

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

*lata* L.; the peak soil respiration rate in each treatment occurred in August; (2) the soil moisture of the vineyards under 4 different mulches and CK showed obvious vertical cross-section characteristics at different periods; the soil under 4 different mulches had significant water conservation capacity, film mulch (black film, white film) showed stronger water retention capacity than grass mulch (*Oxalis corniculata* L., *Trifolium repens* L.); the average temperature of mulching treatment (black film, white film) was higher than that of CK (open field), while the average temperature of grass planting treatment (*Oxalis corniculata* L., *Trifolium repens* L.) was lower than that of CK, effect of raising soil temperature in mulching treatment was stronger than grass planting treatment; black film treatment had a relatively strong effect of raising soil temperature, and it was better than other treatments in maintaining soil temperature stability; (3) soil respiration and soil moisture showed a significant quadratic function relationship in vineyards under film mulch ( $p < 0.05$ ), while soil respiration and soil moisture showed an exponential function relationship in vineyards under grass mulch ( $p < 0.05$ ); the soil temperature (5 cm) of all treatment had an exponential function relationship with the soil respiration, and the temperature sensitivity coefficient ( $Q_{10}$ ) of each treatment was showed as follows: black film > CK (open field) > white film > *Trifolium repens* L. > *Oxalis corniculata* L.. From the perspective of carbon reduction and water conservation, *Oxalis corniculata* L. mulch and black film mulch are more suitable mulch; however, if further consideration is given to reducing environmental pollution and maintaining sustainable development of suburban agriculture, *Oxalis corniculata* L. mulch is much more suitable for new urban agricultural production rather than other three types of mulch patterns.

**Keywords:** urban agriculture; soil respiration; moisture; temperature; mulch pattern

城郊农业是位于城市边缘一定动态范围内的农业地域类型,被誉为“城市后花园”<sup>[1]</sup>。城郊农业自工业革命以来就被纳入城市景观当中。作为一种以生产服务功能为基础,生态涵养功能为重点,文化休憩功能为发展方向的新型农业,城郊农业担负着维护城市生态和谐与保障农产品健康质量的双重功能,因此,城郊农业生态系统的可持续发展受到前所未有的关注。

土壤呼吸被认为是第二大陆地碳通量<sup>[2-4]</sup>,受到了许多学者的关注<sup>[5-7]</sup>。农业生态系统作为陆地上最活跃、人为因素干扰最强的生态系统,对全球碳循环研究有极其重要的作用<sup>[8]</sup>。近年来国内外就农业管理措施对土壤呼吸及微环境的影响开展了大量研究<sup>[9-17]</sup>,但多数集中在农田生态系统中,针对果园尤其是城郊农业区果园的研究则较少,城郊农业区果园对区域经济和生态系统碳平衡发挥着不可或缺的作用,因此,探讨城郊农业区果园生态系统土壤呼吸及环境响应对提高土壤固碳减排能力具有重要意义。

农田覆盖是一种重要的作物栽培技术,主要包括秸秆、地膜、地布、草帘覆盖以及林下生草等栽培模式<sup>[18-19]</sup>。它具有保持土壤温度<sup>[20]</sup>、改变土壤理化性质<sup>[21-22]</sup>、改善生态环境<sup>[23]</sup>、增加作物产量和品质的作用<sup>[24-27]</sup>,是粮食、果蔬高产的有力保障之一。关于秸秆、地膜等覆盖模式研究多见于大田作物和设施蔬菜当中<sup>[28-32]</sup>,而果园覆盖研究相对较少。因此,掌握覆盖模式下果园土壤环境效应的演变规律,可为制定果

园科学合理管理模式提供理论依据。

本研究通过对比不同地膜覆盖和林下生草覆盖模式下城郊农业区葡萄园土壤呼吸以及水热环境特征,探讨林下地表覆盖模式对城郊农业区葡萄园生态系统碳循环与水热环境变化过程的影响,以期探索可操作的农业增汇减排技术、合理规划城郊农业生态系统生产模式、提升双重服务功能提供一定理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本研究于 2015 年在陕西省西安市长安区宏府现代农业科技示范园(109°08′07″—109°09′12″E, 34°03′14″—34°06′23″N)进行,该区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候区,雨量适中,四季分明,气候温和,秋短春长。年平均气温 15.5℃,降水量约 600 mm,湿度 69.6%,无霜期 216 d,平均日照约 1 377 h。最冷的 1 月份平均气温 -0.9℃,最热的 7 月份平均气温 26.8℃。雨量主要分布在 7—9 月。年平均降雪日为 13.8 日,初雪日一般在 11 月下旬,终雪日一般在 3 月中旬。受地形影响,该区全年多东北风,年平均风速为 1.3~2.6 m/s,试验区土壤为壤土,土壤基本理化性质状况见表 1。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,葡萄林下设置 5 个覆盖处理:对照 CK(未覆盖,裸露地表)(处理 1),分别引

种酢浆草(*Oxalis corniculata* L.)(处理 2)、白三叶草(*Trifolium repens* L.)(处理 3),覆盖黑膜(处理 4)、白膜(处理 5)(图 1)。白三叶草在 2014 年 3 月 21 日播种,同日移栽酢浆草。葡萄品种为户太 8 号,栽植密度为株距 1.2 m,行距 3 m,2014 年进入葡萄结果期的第 3 年。所有处理均在距离树干 50 cm 的操作行中进行,处理小区面积 25.0 m×2 m,2014 年秋季施用有机肥 5 kg/株;2014 年 5 月 12 日,施用钾肥 K<sub>2</sub>O 每株 20 g、氮肥 N 每株 20 g。每一次施肥后,进行灌溉(滴灌)。在 2015 年 3 月 10 日,进行覆盖黑色和白色聚乙烯塑料薄膜处理,葡萄园按照当地程序进行管理,每株葡萄树保留 13~15 串果穗,每串果实保

留 80~90 个果粒,此外,在果实结实期、果实膨大期和品质形成期对各处理分别进行了 3 次等量补充灌溉,保证生产需水量。每个处理在操作行中,采用“S”型随机设置 5 个土壤呼吸测点,覆膜处理在各测点设置直径 11 cm 膜孔,压入 PVC 环,以备测定,呼吸测定完毕后用地膜封闭膜孔,生草处理在各测点直接压入 PVC 环进行测定,环内不做除草处理;温度测点紧邻呼吸测点布设,每个监测点埋设一个温度测量探头,布设深度 5 cm,共计 5 个温度测点,;土壤水分监测点布设在呼吸测点之间,共计 4 个土壤水分监测点,每个监测点布设一根 40 cm 深 TDR 管。具体试验布置见图 1。

表 1 试验区土壤理化性质概况

容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	持水力/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	有效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
1.29	240	9.80	0.96	0.72	26.93	162.37	8.08

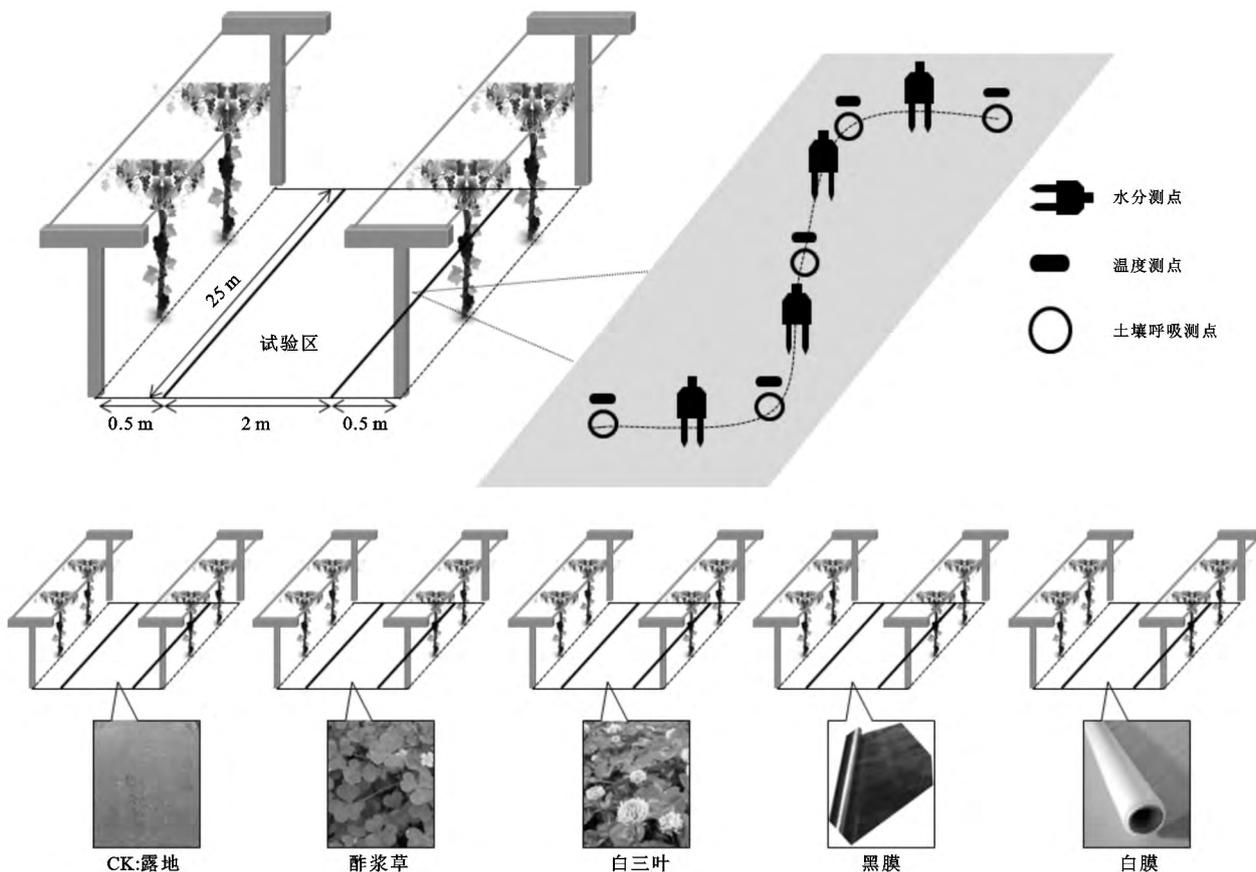


图 1 试验小区布置示意图

1.3 土壤呼吸及微环境指标测定

(1) 土壤呼吸速率测定(2015 年 5 月上旬—10 月下旬)。每小区选取代表性的 5 个测点,用美国 Li-Cor 公司生产 Li-6400~09 土壤呼吸室测定。测量前 24 h 将内径为 10.5 cm、高 4.5 cm 的 PVC 环压入土壤 3 cm,压实外圈土壤以防漏气。之后 PVC 环长期定位放置。上午 09:00—11:00 测定,取 5 个测点平均值作为小区 CO<sub>2</sub> 通

量[μmol/(m<sup>2</sup>·s)],即土壤呼吸速率。

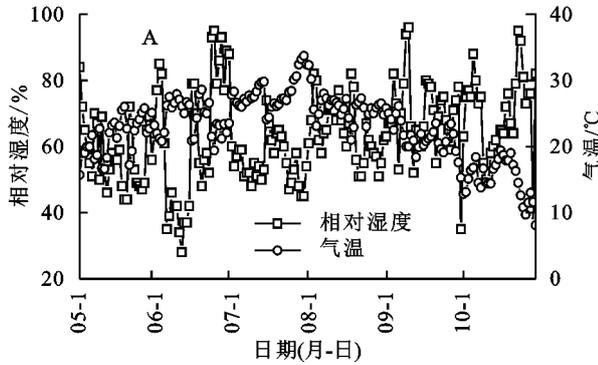
(2) 水分监测。土壤水分使用时域反射仪(TDR,英国剑桥伯威尔)进行测定,每个测量地块深埋 40 cm 的 TDR 管,测量 0—40 cm 土壤含水量(每隔 10 cm 一个测点),每隔 7 d,测量 1 次水分,每个测量点重复 3 次。

(3) 土壤温度监测。土壤温度使用北京百万电子科技中心生产的多点温度传感器(HB403-04)进行

测定,每小时测定 1 次,测量深度为 5 cm。

(4) 大气温度、湿度。在每个小区的中间部位(试验区)上部 1.5 m 处,采用日本生产的 HOBO (ProV2 Temp/RH Data Logger) 温湿度记录仪,设置每两个小时自动记录一次,试验研究阶段温湿度变化特征见图 2A。

(5) 太阳辐射、风速。太阳辐射采用美国的



CR10X-2M 数据采集装置和 LI200X 硅晶体辐射传感器组成的太阳辐射测量仪监测,风速采用 LE2151 风速传感器进行监测,在 08:00—18:00 每两个小时自动记录,太阳辐射与风速变化特征见图 2B。

(6) 降雨量。使用 HM-YLJC 降雨监测设备逐日监测降雨量,降雨情况见图 3。

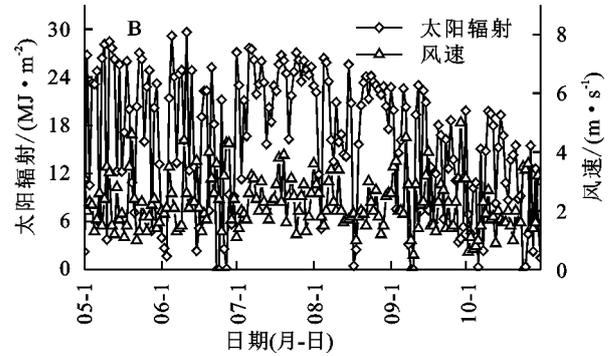


图 2 2015 年葡萄生长期大气温度、湿度、风速和太阳辐射强度变化特征

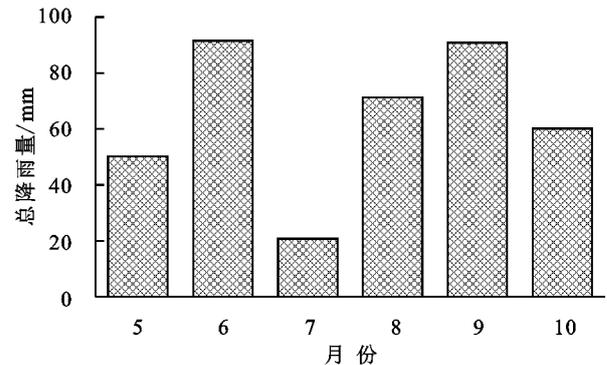
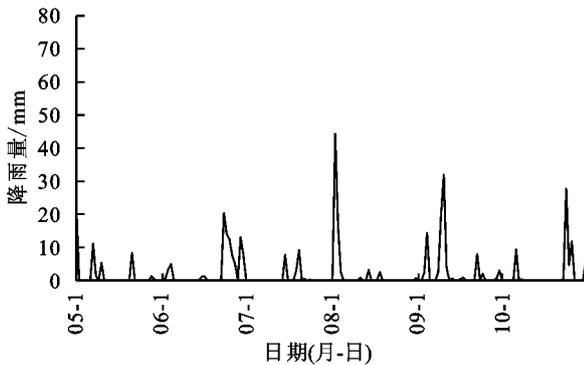


图 3 2015 年葡萄生长期降雨量特征

#### 1.4 数据分析

采用 Origin 2019 pro 绘图,采用 SASV8.0 统计软件进行方差分析(ANOVA)及多重比较、非线性回归分析。

利用非线性回归方法分析不同覆盖处理下土壤呼吸速率与土壤湿度的关系[公式(1)–(3)],选择最优模型,并进行显著性检验:

$$R = aM^2 + bM + c \quad (1)$$

$$R = ae^{bM} \quad (2)$$

$$R = aM^b \quad (3)$$

式中: $R$  为土壤呼吸速率; $M$  为土壤含水率(%); $a$ ,  $b$ ,  $c$  均为拟合参数。

利用指数模型分析不同覆盖处理下土壤呼吸速率与土壤温度的关系[公式(4)],进行显著性检验,并计算呼吸速率温度敏感性系数  $Q_{10}$ [公式(5)]:

$$R = Ae^{BT} \quad (4)$$

$$Q_{10} = e^{10B} \quad (5)$$

式中: $R$  为土壤呼吸速率; $T$  为土壤温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $A$ ,  $B$  均为拟合参数。

土壤贮水量计算公式:

$$D_w = \theta_v \cdot h \quad (6)$$

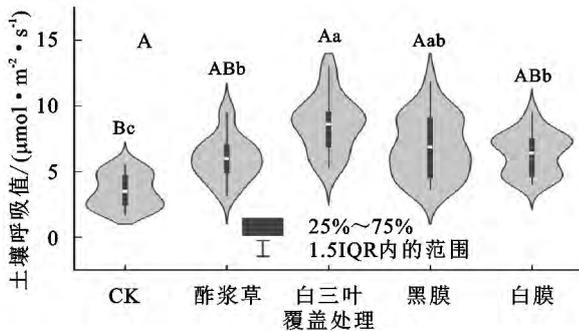
式中: $D_w$  为土壤贮水量(mm); $\theta_v$  为土壤容积含水量(%); $h$  为土壤厚度(mm)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸特征

对不同生长时期土壤呼吸数据资料分布情况进行总体分析,小提琴图(图 4A)显示,CK 土壤呼吸速率均值较低,白三叶覆盖处理下的葡萄园地土壤呼吸速率均值较高;CK 土壤呼吸速率分布比较集中,其余处理(酢浆草、白三叶、黑膜、白膜)葡萄园地土壤呼吸速率分布较为离散,尤其以酢浆草和白三叶覆盖处理数据分布不够均匀,覆盖处理土壤呼吸速率存在较为明显的离散值。对不同覆盖处理葡萄园地土壤呼吸速率进行多重比较(LSR 法)显示(图 4A),各覆盖处理(酢浆草、白三叶、黑膜、白膜)相对于 CK,土壤呼吸存在极显著差异( $p < 0.01$ ),说明各覆盖处理均显著提高了  $\text{CO}_2$  的排放速率。

分析不同时期土壤呼吸变化特征(图 4B),在葡萄生产期(5—10月),各处理土壤呼吸均呈现出一定的峰值变化特征,总体表现为先增后减再增再减的变化趋势,各处理的峰值出现在 8 月,CK、酢浆草、白三叶、黑膜、白膜覆盖葡萄园地最大值分别为 5.11, 8.72, 12.17, 9.99, 8.08  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。而林下覆膜处理(黑膜、白膜)和林



下生草(酢浆草、白三叶)处理表现出一定的时间变化异质性,林下覆膜分别在 6 月份(白膜覆盖)和 7 月份(黑膜覆盖)表现出短暂的局部下降趋势。各处理土壤呼吸在 5—7 月、9—10 月变化速率相比 7—9 月期间较弱。白三叶覆盖处理相对于其他覆盖处理,在 5—10 月期间一直表现出较高的  $\text{CO}_2$  排放速率。

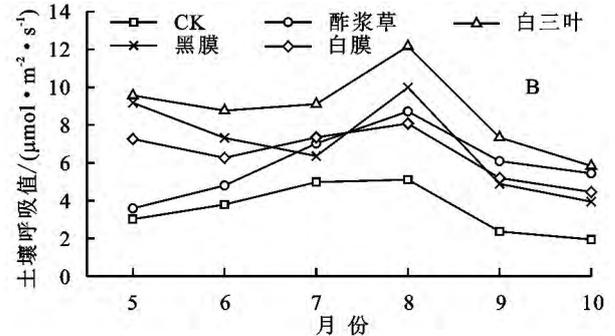


图 4 土壤呼吸速率变化特征

## 2.2 土壤水分垂直变化特征

不同处理下的葡萄园地水分在不同时期呈现出较为明显的剖面垂直分异特征,且覆盖处理相比 CK 均表现出明显的水分保持能力(图 5)。在 5—10 月,在 0—40 cm 土层内,随着深度的增加,土壤水分整体表现为增加趋势,下层土壤表现出较为良好的持水能力;在 30—40 cm 土层上,各处理土壤含水率有不断接近,趋于稳定变化。5—7 月,在 0—30 cm 剖面内,黑膜和白膜覆盖相比酢浆草、白三叶覆盖处理表现出较好的持水能力,而在 30—40 cm 土层区域内,酢浆草和白三叶覆盖处理开始表现出较好的持水能力。8—9 月,在 0—40 cm 土层,酢浆草、白三叶、黑膜覆盖相比白膜覆盖表现出较强的持水保水能力。在 5—10 月,由于 5 月与 7 月份相比其他月份降雨量较少(图 3),因而各处理在 0—40 cm 土壤含水量相对较低,但下层土壤(20—40 cm)相比表层土壤(0—10 cm)表现出较高的含水量。

不同处理下的葡萄园地各土层之间土壤平均贮水量显现出不同的变化规律(表 2,图 6)。不同覆盖处理下土壤 0—10 cm 土层内平均贮水量介于  $(11.79 \pm 1.00) \sim (19.70 \pm 0.98)$  mm,各处理与 CK 贮水量存在显著差异,黑膜贮水量显著高于其他覆盖处理,黑膜与白膜相比其他覆盖模式贮水量波动较小;10—20 cm 土层内平均贮水量介于  $(14.06 \pm 1.33) \sim (22.34 \pm 0.72)$  mm,酢浆草、白三叶、白膜覆盖贮水量差异并不明显,但与黑膜、CK 组存在显著差异,且黑膜与白膜仍表现出较小波动,黑膜在该区域贮水量最高,且变异程度相对较弱;20—30 cm 土层内平均贮水量介于  $(16.90 \pm 0.56) \sim (23.38 \pm 0.51)$

mm,该层各处理与 CK 贮水量存在显著差异,但各处理之间差异并不显著,波动较为相近,该层的持水效果较为接近;30—40 cm 剖面内平均贮水量介于  $(18.56 \pm 0.54) \sim (24.75 \pm 0.16)$  mm,该区域内各处理与 CK 存在显著差异,CK 与白膜覆盖表现出较强的变异性。

不同覆盖模式下,随着土层深度的增加,各区域的贮水量增加,地膜覆盖和生草覆盖相对于露地蓄水能力提升明显,在 0—10 cm 层,生草覆盖贮水量提升 40.9%~42.7%,地膜覆盖提升 50.7%~67.1%;在 10—20 cm 层,生草覆盖贮水量提升 36.4%~37.3%,地膜覆盖提升 43.5%~58.8%;在 20—30 cm 层,生草覆盖贮水量提升 33.4%~36.7%,地膜覆盖提升 30.3%~38.3%;在 30—40 cm 层,生草覆盖贮水量提升 32.3%~33.3%,地膜覆盖提升 30.2%~22.1%。

## 2.3 土壤温度变化特征

不同覆盖处理下的葡萄园地温度(5 cm)在不同时期呈现出一定的差异特征(图 7),各处理土壤温度特征值见表 3。林下覆膜处理(黑膜、白膜)平均温度均高于 CK,而林下生草覆盖处理(酢浆草、白三叶)平均温度均低于 CK,林下覆膜处理增温效果整体强于林下生草覆盖处理。温度的最大值为 38.9℃,出现在黑膜覆盖处理中,而最小值为 15.1℃,出现在 CK 当中,黑膜的增温效果相对较强,而 CK 的增温效果最差。总体分析各处理 5—10 月土壤温度变化趋势,温度变化趋势和变化节点表现出较为相似的规律性,但局部的变化幅度和变异程度存在一定差异,变化峰值出现在 9—10 月份。黑膜覆盖处理的温度变异系数相比其他处理,表现为最小,而 CK 变异系数最大,

这表明黑膜在维持土壤温度稳定(小变异系数)要优于其他处理,而露地维持温度稳定相对较差,除黑膜

外,其他覆盖处理在维持土壤温度稳定方面为未表现出明显差异。

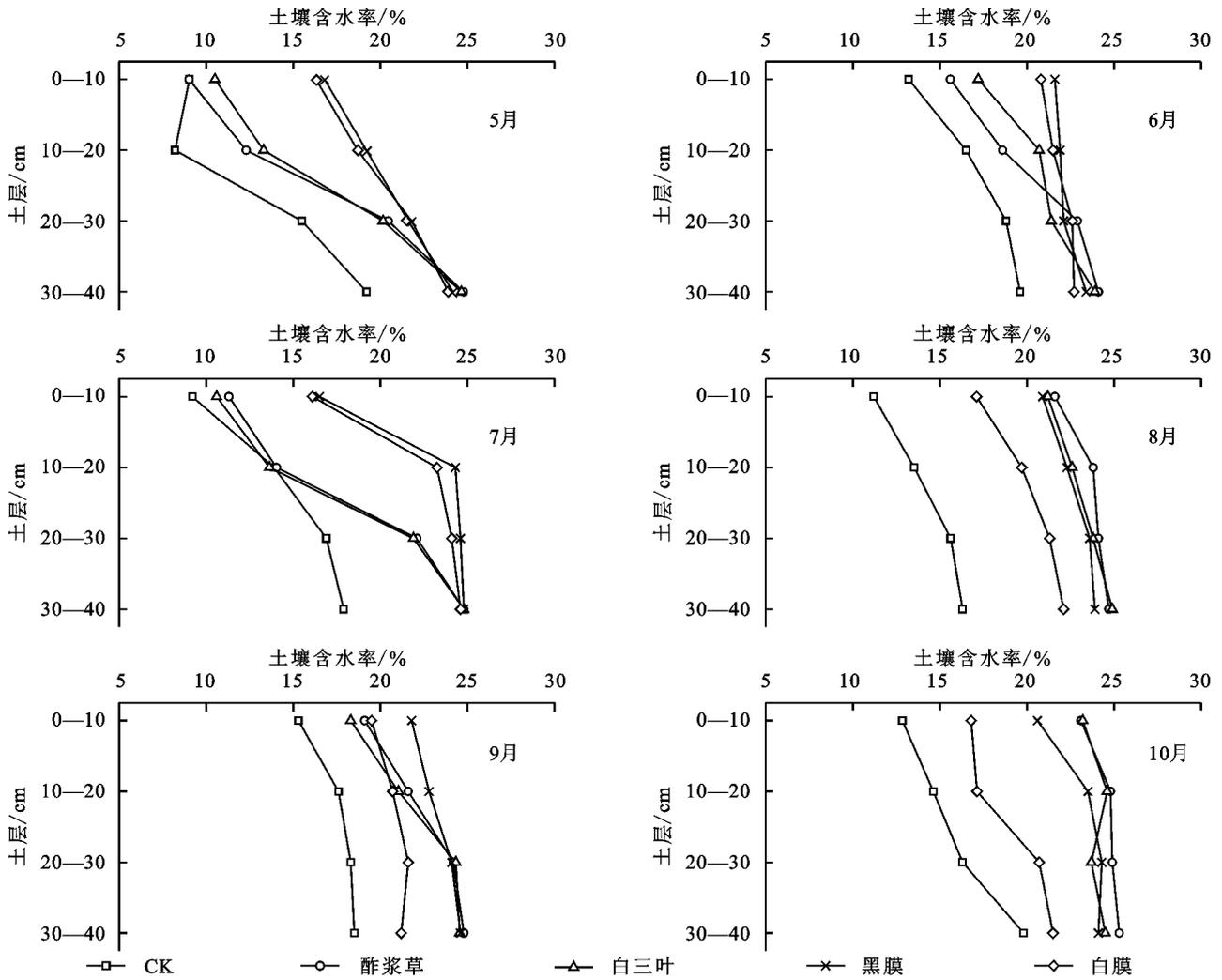


图 5 土壤水分垂直变化特征

表 2 5—10 月土壤贮水量垂直变化状况

mm

处理	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
CK	11.79±1.00Bb	14.06±1.33Bb	16.90±0.56Bb	18.56±0.54Cc
酢浆草	16.62±2.31ABa	19.18±2.10ABa	23.11±0.67Aa	24.75±0.15Aa
白三叶	16.83±2.17ABa	19.31±1.93ABa	22.55±0.67Aa	24.55±0.14Aa
黑膜	19.70±0.98Aa	22.34±0.72Aa	23.38±0.51Aa	24.16±0.20Aa
白膜	17.77±0.79ABa	20.17±0.88ABa	22.02±0.49Aa	22.67±0.55Bb

注:小写字母表示 0.05 水平存在显著差异,大写字母表示 0.01 水平存在极显著差异。

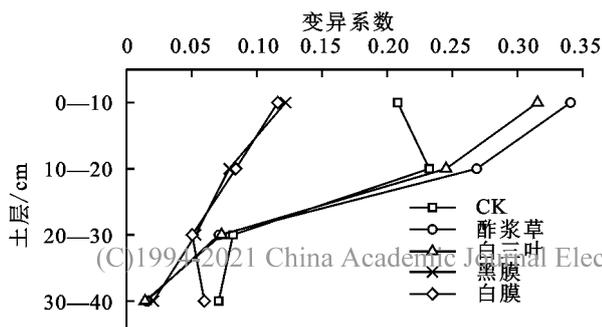


图 6 土壤水分垂直剖面变异系数

### 2.4 土壤呼吸速率对水热环境的响应

为了进一步探明不同覆盖处理下葡萄园地林下土壤呼吸对水分和温度的响应趋势,分别对不同覆盖处理的土壤呼吸和土壤水分、温度进行非线性回归[水分与呼吸速率回归模型见公式(1)–(3)选择较优模型,温度与呼吸速率回归模型见公式(5)]。

由表 4 可知,CK、黑膜、白膜覆盖处理土壤水分与土壤呼吸均呈现二次函数关系,其中 CK 处理在 0—10 cm,10—20 cm,30—40 cm 土层呈现极显著关

系 ( $p < 0.01$ ), 在 20—30 cm 剖面呈现显著关系 ( $p < 0.05$ ); 黑膜和白膜覆盖处理在 0—10 cm 土层呈现显著关系 ( $p < 0.05$ ), 在 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 土层呈现极显著关系 ( $p < 0.01$ )。酢浆草和白三叶覆盖处理呈现显著指数函数变化关系, 其中酢浆草覆盖处理在 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 呈现极显著关系 ( $p < 0.01$ ), 在 30—40 cm 土层呈现显著关系 ( $p < 0.05$ ); 白三叶覆盖处理在 0—10 cm, 10—

20 cm, 20—30 cm 呈现显著关系 ( $p < 0.05$ ), 在 30—40 cm 土层呈现极显著关系 ( $p < 0.01$ ) (表 3)。酢浆草、白三叶覆盖处理土壤呼吸对各剖面水分呈现较为单一的响应变化趋势, 而黑膜与白膜覆盖处理土壤呼吸对各剖面水分呈现出较为复杂的响应变化趋势, 水分存在一定阈值变化响应关系。这些现象可能归因于不同覆盖处理下表层土壤与下层土壤生化环境的异质性。

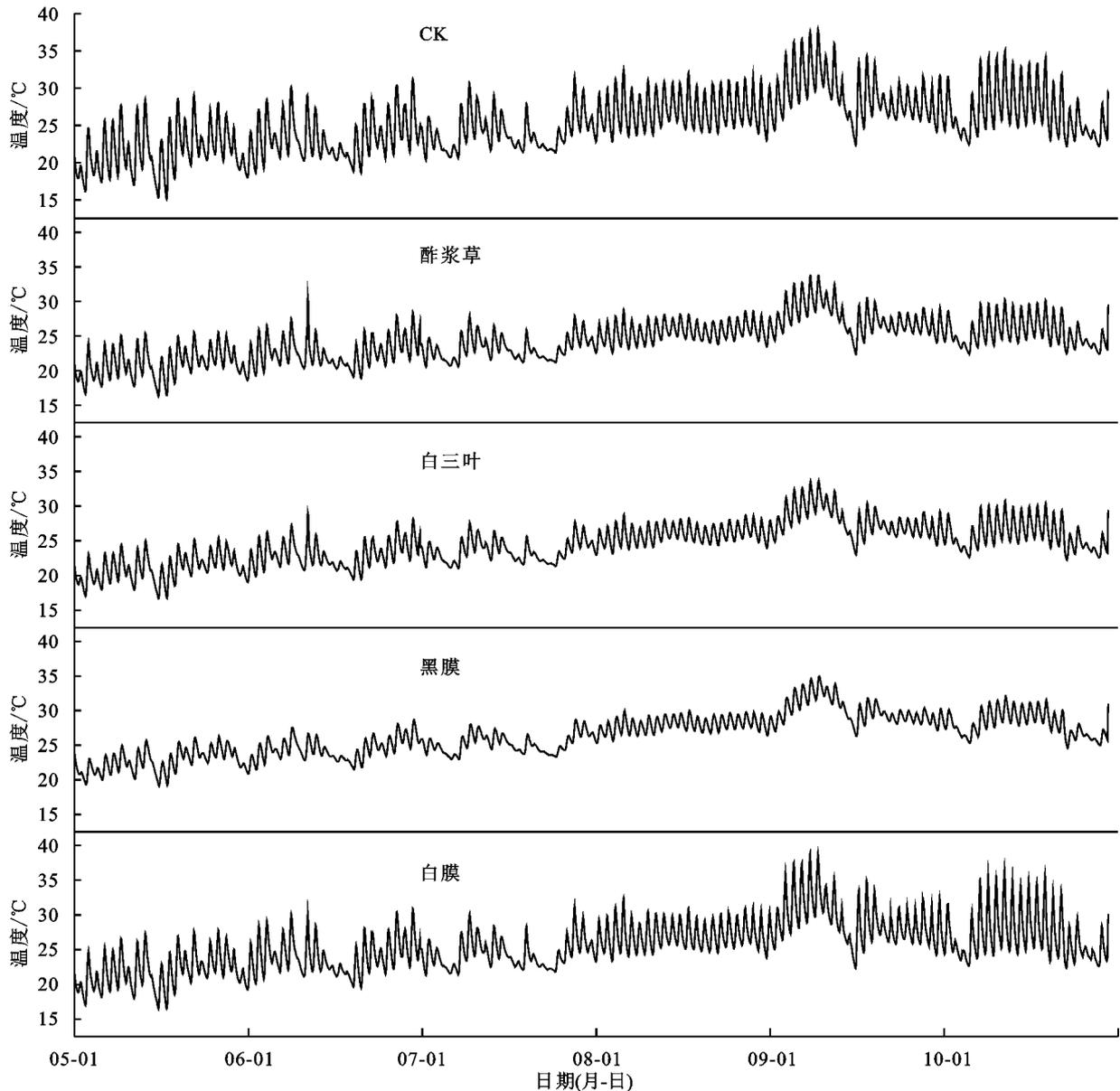


图 7 2015 年土壤温度变化特征

表 3 不同处理土壤温度特征值

处理	平均值/°C	标准差/°C	最大值/°C	最小值/°C	变异系数
CK	25.31	0.15	37.9	15.1	0.15
酢浆草	24.30	0.12	33.8	16.3	0.12
白三叶	24.55	0.12	33.7	16.6	0.12
黑膜	26.43	0.11	38.9	19.1	0.11
白膜	25.62	0.14	35.0	16.5	0.13

由表 5 可知, 各处理土壤温度 (5 cm) 与土壤呼吸速率呈现指数函数关系, 其中黑膜与白膜覆盖处理表现出极显著 ( $p < 0.01$ ) 指数关系, 而其他处理表现为显著 ( $p < 0.05$ ) 指数关系。这表明随着温度的增长, 各处理土壤呼吸速率均表现为增长趋势。进一步分析各处理呼吸速率温度敏感系数 ( $Q_{10}$ ), 各处理温度敏感系数表现为: 黑膜 > CK > 白膜 > 白三叶 > 酢浆

草,在发生同样的温度变化扰动时,黑膜覆盖园地将比 CK(露地)土壤将表现出更强的土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率,而其他处理相对 CK(露地)土壤将表现出较弱的 CO<sub>2</sub> 排放速率,其中白三叶覆盖与酢浆草覆盖园地呼吸速率温度敏感性相差较小。

表 4 不同处理下水分(M)与土壤呼吸速率(R)拟合模型

土层/cm	处理	拟合模型	R <sup>2</sup>
0—10	CK	$R = -0.06M^2 + 1.24M - 1.88$	0.53**
	酢浆草	$R = 3.89e^{0.03M}$	0.57**
	白三叶	$R = 11.17e^{-0.02M}$	0.32*
	黑膜	$R = -0.14M^2 + 4.93M - 36.77$	0.38*
	白膜	$R = 0.21M^2 - 7.98M + 81.37$	0.40*
10—20	CK	$R = -0.07M^2 + 1.79M - 6.76$	0.52**
	酢浆草	$R = 3.18e^{0.03M}$	0.56**
	白三叶	$R = 12.37e^{-0.02M}$	0.33*
	黑膜	$R = -0.06M^2 + 1.81M - 2.89$	0.68**
	白膜	$R = -0.09M^2 + 3.77M - 33.90$	0.43**
20—30	CK	$R = 0.05M^2 - 1.84M + 20.48$	0.33*
	酢浆草	$R = 0.47e^{0.11M}$	0.63**
	白三叶	$R = 23.68e^{-0.04M}$	0.31*
	黑膜	$R = -0.68M^2 + 30.24M - 327.56$	0.51**
	白膜	$R = -0.27M^2 + 12.57M - 139.81$	0.44**
30—40	CK	$R = -0.01M^2 - 0.26M + 13.12$	0.75**
	酢浆草	$R = 0.62e^{0.08M}$	0.32*
	白三叶	$R = 0.02e^{0.25M}$	0.52**
	黑膜	$R = -1.55M^2 + 73.27M - 855.54$	0.35**
	白膜	$R = -0.41M^2 + 19.23M - 220.46$	0.73**

注:\*表示在5%水平上差异显著,\*\*表示在1%水平上差异显著,下表同。

表 5 不同处理下温度(T)与土壤呼吸速率(R)拟合模型

处理	拟合模型	Q <sub>10</sub>	R <sup>2</sup>
CK	$R = 0.67e^{0.07T}$	1.95	0.16*
酢浆草	$R = 1.72e^{0.03T}$	1.40	0.14*
白三叶	$R = 3.53e^{0.04T}$	1.47	0.21*
黑膜	$R = 0.87e^{0.09T}$	2.44	0.43**
白膜	$R = 1.67e^{0.06T}$	1.74	0.49**

### 3 讨论

#### 3.1 不同覆盖模式下土壤呼吸变化特征分析

Tang<sup>[33]</sup>, Pingintha<sup>[34]</sup> 等认为土壤呼吸的季节性波动可能要归因于土壤温度、水分,通常具有温度和水分驱动的季节性模式。本研究中 5 种不同覆盖模式下葡萄园地土壤呼吸值在 5—10 月均表现出一定的峰值变化趋势,变化具有明显的季节性;各处理土壤呼吸峰值均出现在 8 月份,这种季节性变化应该归因于研究区域温度和水分综合作用。Li 等<sup>[29]</sup> 学者研究认为塑料薄膜覆盖相比未覆盖可以显著提高细菌、真菌和放线菌的丰度,增加了土壤呼吸。Mu 等<sup>[30]</sup> 对

设施蔬菜黄瓜进行秸秆、薄膜以及混合覆盖处理,结果发现覆盖处理土壤呼吸速率显著高于未覆盖处理。也有学者认为,秸秆和塑料薄膜的覆盖可以提升农田对 CO<sub>2</sub> 的有效固定量,增加作物产量,与未覆盖相比更有利于农田生态系统的碳汇,并且在未来的气候情景下可能减轻土壤呼吸的变化<sup>[32,35]</sup>。本研究中,无论是林下生草还是林下覆膜覆盖方式相比未覆盖处理均增强了土壤呼吸速率。而林下生草作为一种覆盖模式,除了改变土壤理化环境,对作物生长的生物环境也有复杂的影响过程,本研究中,林下种植白三叶和酢浆草的葡萄园地表现出相差较大的土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率。因此林下生草相比林下覆膜碳源汇强度表现更为复杂,在实际种植过程中要根据培植植物的种类和生物学特性进行剖析。

#### 3.2 不同覆盖模式下土壤水分与温度变化规律

土壤水分影响土壤形成的各个过程,直接制约植株生理生化及营养生长过程。土壤温度也是影响果树的生长和发育另一个重要因素。而地表覆盖可以有效地减少土壤水分蒸发,保持土壤湿度<sup>[36-37]</sup>,同样可以通过改变地表光照度和热量向深层土壤传递,影响果园土壤热量的收支平衡<sup>[38]</sup>。李晓龙等<sup>[39]</sup> 研究发现与清耕相比,农用地毯和碎木屑覆盖、行间生草可明显降低深度土壤温度,提高土壤含水量。黄金辉等<sup>[40]</sup> 则认为各覆盖处理的蓄水量与其土壤温度并不都呈负相关,而是由不同覆盖物的保水效果和保温性质共同决定。本研究中,在同样的生产管理程序下,薄膜覆盖处理和生草覆盖葡萄园地在(0—40 cm)土层内土壤含水率、贮水量均高于 CK,表现出较强的土壤水分保持能力,而且不同时期呈现出较为明显的剖面垂直分异特征。随着深度的增加,土壤水分整体表现为增加趋势,下层土壤相比表层土壤表现出良好的持水能力,这是由于覆盖处理相比裸露地表增加了土壤下层的土壤含水量,同时覆盖可以通过限制土壤表层蒸发来增强水分的向下渗透<sup>[41]</sup>。8—9 月,酢浆草、白三叶林下生草处理相比黑膜、白膜覆盖处理表现出较强的持水保水能力,且土壤表层以下表现出较为稳定的水分含量,这可能与草皮根系的水源涵养能力有关。在改善地表温度方面,林下覆膜处理增温效果整体强于 CK,而林下生草覆盖处理弱于 CK。黑膜的增温效果相对较强,而露地的保温效果最差。同样,黑膜在维持土壤温度稳定方面要优于其他处理,而露地维持温度稳定相对较差,这正好印证了黄金辉关于覆盖的保温效果的研究结果,土壤温度的保温效果跟覆盖物的性质有很大关系,黑膜的增加、保持地温的效果与膜材质本身有很大的关联<sup>[40]</sup>。

3.3 不同覆盖模式下水热环境对土壤呼吸响应特征  
土壤水分和温度是影响土壤呼吸的两个重要因

素。土壤水分对呼吸的影响机制较为复杂,不同剖面深度土壤水分的波动会引发生土壤呼吸响应特征的差异。部分学者<sup>[42-45]</sup>认为土壤水分与土壤 CO<sub>2</sub> 排放之间或存在二次函数,或存在指数函数,或存在幂函数关系,土壤呼吸速率在一定范围内随土壤含水量的增加而增加,当含水量超过此范围时,土壤呼吸速率随土壤含水量增加而降低或者保持平稳,不同生态系统中均存在土壤呼吸的水分阈值。本研究中,黑膜和白膜覆盖以及裸露地表的葡萄园地中,各剖面的土壤水分与土壤呼吸速率呈现显著的二次函数关系,而林下种植白三叶和酢浆草的葡萄园地中,各剖面土壤水分与土壤呼吸则呈现指数函数关系,造成这种现象的原因可能来自于两方面:其一,在生长—生产期,与地膜覆盖和裸露地表园地相比,在原有土壤呼吸的基础上增加了林下草根和根系微生物的呼吸作用;其二,虽然林下生草园地剖面下层土壤水分高于薄膜覆盖和裸露地表园地,但林下生草园地总体生物量较大,生产过程需水量较高,较高的土壤含水量并不能对总体土壤呼吸造成限制。关于土壤温度与土壤呼吸响应特征研究多以指数函数形式拟合,且土壤表层温度与呼吸拟合效果较好<sup>[8,46-48]</sup>。本研究中,在温度响应方面,各覆盖处理土壤温度(5 cm)与土壤呼吸速率呈现指数函数关系,这表明,随着温度的增长,各处理土壤呼吸速率均表现为增长趋势。土壤升高相同温度时,黑膜覆盖将表现出更强的土壤 CO<sub>2</sub> 排放速率,而其他处理表现出相对较弱的 CO<sub>2</sub> 排放速率,这表明黑膜覆盖与其他覆盖模式相比,更容易引发土壤 CO<sub>2</sub> 的排放。

## 4 结论

(1) 4 种不同覆盖处理相比 CK 显著提高了葡萄园地土壤呼吸速率( $p < 0.05$ ),各处理土壤呼吸速率表现出一定的季节变化特征,峰值出现在 8 月份;林下生草模式相比林下覆膜模式较为复杂,总体表现为:白三叶 > 黑膜 > 白膜 > 酢浆草。

(2) 各处理葡萄园地随着深度的增加,土壤水分整体表现为增加趋势,下层土壤表现出较为良好的持水能力,且覆盖处理相比 CK 均表现出明显的水分保持能力。林下覆膜(黑膜、白膜)相比林下生草(酢浆草、白三叶)持水保水能力表现突出。林下覆膜处理(黑膜、白膜)平均温度均高于 CK,而林下生草覆盖处理(酢浆草、白三叶)平均温度均低于 CK,林下覆膜处理增温效果整体强于林下生草覆盖处理。黑膜的增温效果相对较强,且维持土壤温度稳定要优于其他处理,而露地维持温度稳定相对最差。

(3) 林下覆膜模式土壤呼吸与土壤水分呈现显著二次函数关系( $p < 0.05$ ),而林下生草模式土壤呼

吸与土壤水分呈现指数函数关系( $p < 0.05$ );各处理土壤温度与土壤呼吸速率呈现指数函数关系,且各处理温度敏感系数表现为:黑膜 > CK > 白膜 > 白三叶 > 酢浆草。

参考文献:

- [1] Mason D, Knowlton I. The emergence of urban agriculture: Sydney, Australia[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2010,8(1/2):62-71.
- [2] Reichstein M, Beer C. Soil respiration across scales: The importance of a model-data integration framework for data interpretation[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008,171(3):344-354.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000,48(1):7-20.
- [4] Bond L B, Thomson A. A global database of soil respiration data[J]. Biogeosciences, 2010,7(6):1915-1926.
- [5] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps[J]. Global Change Biology, 2005,11(7):1024-1041.
- [6] Vargas R, Allen M F. Environmental controls and the influence of vegetation type, fine roots and rhizomorphs on diel and seasonal variation in soil respiration[J]. New Phytologist, 2008,179(2):460-471.
- [7] Li Y, Zhou G, Huang W, et al. Potential effects of warming on soil respiration and carbon sequestration in a subtropical forest[J]. Plant and Soil, 2016,409(1):247-257.
- [8] 郝旺林,梁银丽,吴兴,等.不同茬冬小麦土壤呼吸特征及影响因子分析[J].环境科学,2011,32(11):3167-3173.
- [9] 周泉,陈娇,石超,等.秸秆覆盖下油菜间作紫云英的土壤微环境效应[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):193-199.
- [10] 赵成政,王亚军,谢忠奎,等.砾石长期覆盖对土壤呼吸的影响[J].中国沙漠,2020,40(2):232-239.
- [11] 张帆,王晨冰,赵秀梅,等.果园垄膜覆盖对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响[J].核农学报,2018,32(7):1448-1455.
- [12] 于爱忠,柴强,殷文,等.玉米农田土壤碳排放及碳平衡对地膜覆盖方式及种植行距的响应[J].中国农业科学,2018,51(19):3726-3735.
- [13] 熊瑛,王龙昌,赵琳璐,等.保护性耕作下蚕豆/玉米/甘薯三熟制农田土壤呼吸、碳平衡及经济—环境效益特征[J].中国生态农业学报(中英文),2018,26(11):1653-1662.
- [14] 王凤姣,王振华,李文昊.灌水量及可降解膜覆盖对滴灌玉米土壤呼吸及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(5):118-121.
- [15] 商雨晴,解梦怡,王俊,等.不同覆盖措施下旱作玉米田土壤呼吸对氮添加的响应[J].西北大学学报:自然科学版,2020,50(5):711-719.

- [16] 解梦怡, 商雨晴, 赵发珠, 等. 不同覆盖方式下旱作玉米田土壤呼吸对温度变化的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 467-473.
- [17] 崔慧瑾, 刘菊, 杜自强, 等. 生物炭和地膜覆盖下高粱高光谱特征及其与土壤呼吸的关系[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 15-22.
- [18] Jordan A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain[J]. Catena, 2010, 81(1): 77-85.
- [19] Humphreys E, Eberbach P L, Katupitiya A, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule [J]. Field Crops Research, 2011, 121(2): 209-225.
- [20] Hu C, Zheng C, Sadras V O, et al. Effect of straw mulch and seeding rate on the harvest index, yield and water use efficiency of winter wheat [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-8.
- [21] Zou Y N, Chen X, Srivastava A K, et al. Changes in rhizosphere properties of trifoliolate orange in response to mycorrhization and sod culture [J]. Applied Soil Ecology, 2016, 107: 307-312.
- [22] Campiglia E, Mancinelli R, Radicetti E. Influence of no-tillage and organic mulching on tomato (*Solanum Lycopersicum* L.) production and nitrogen use in the mediterranean environment of central Italy[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(3): 588-598.
- [23] Radicetti E, Baresel J P, ElHaddoury E J, et al. Wheat performance with subclover living mulch in different agro-environmental conditions depends on crop management [J]. European Journal of Agronomy, 2018, 94: 36-45.
- [24] Harahagazwe D, Ledent J F, Rusuku G. Effects of rice straw mulch and planting density on potato growth and performance in lowlands of burundi[J]. Experimental Agriculture, 2010, 46(4): 501-518.
- [25] Jin L F, Guo D Y, Ning D, et al. Covering the trees of Kinokuni tangerine with plastic film during fruit ripening improves sweetness and alters the metabolism of cell wall components [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(10): 1-10.
- [26] Zheng W, Wen M J, Zhao Z Y, et al. Black plastic mulch combined with summer cover crop increases the yield and water use efficiency of apple tree on the rain-fed Loess Plateau[J]. Plos One, 2017, 12(9). DOI: 10.1371/journal.pone.0185705.
- [27] Zhang Z, Zhang Y Q, Sun Z X, et al. Plastic film cover during the fallow season preceding sowing increases yield and water use efficiency of rain-fed spring maize in a semi-arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 203-210.
- [28] Li W, Zhuang Q, Wu W, et al. Effects of ridge-furrow mulching on soil CO<sub>2</sub> efflux in a maize field in the Chinese Loess Plateau[J]. Agr Forest Meteorol, 2019, 264: 200-212.
- [29] Li X G, Guo K, Feng X H, et al. Soil respiration response to long-term freezing saline water irrigation with plastic mulching in coastal saline plain[J]. Sustainability, 2017, 9(4). DOI: 10.3390/su9040621.
- [30] Mu L, Fang L, Liang Y L. Temporal and spatial variation of soil respiration under mulching in a greenhouse cucumber cultivation[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2016, 51(7): 869-879.
- [31] Wang W, Akhtar K, Ren G, et al. Impact of straw management on seasonal soil carbon dioxide emissions, soil water content, and temperature in a semi-arid region of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 471-482.
- [32] Zhang S, Hussain H A, Wang L, et al. Responses of soil respiration and organic carbon to straw mulching and ridge tillage in maize field of a triple cropping system in the Hilly region of Southwest China[J]. Sustainability, 2019, 11(11). DOI: 10.3390/su11113068.
- [33] Tang J W, Baldocchi D D, Qi Y, et al. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 118(3/4): 207-220.
- [34] Pingintha N, Leclerc M Y, Beasley J P, et al. Assessment of the soil CO<sub>2</sub> gradient method for soil CO<sub>2</sub> efflux measurements: comparison of six models in the calculation of the relative gas diffusion coefficient[J]. Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology, 2010, 62(1): 47-58.
- [35] Yu Y, Tao H, Yao H, et al. Assessment of the effect of plastic mulching on soil respiration in the arid agricultural region of China under future climate scenarios[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256: 1-9.
- [36] 刘建新. 覆草对果园土壤肥力及苹果产量与品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 32(1): 102-105.
- [37] 刘建新, 王鑫, 杨建霞. 覆草对果园土壤腐殖质组成和生物学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 93-95.
- [38] 张洋, 倪九派, 谢德体. 果园覆盖土壤生态效应研究进展[J]. 农业工程, 2013, 3(6): 1-6.
- [39] 李晓龙, 龚云萍, 马丁, 等. 宁夏地区果园生草对土壤温、湿度及天敌数量的影响[J]. 北方园艺, 2020(4): 93-101.
- [40] 黄金辉, 廖允成, 高茂盛, 等. 耕作和覆盖对黄土高原果园土壤水分和温度的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2652-2658.
- [41] Kader M A, Nakamura K, Senge M, et al. Numerical simulation of water and heat flow regimes of mulched soil in rain-fed soybean field in central Japan[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 142-155.

- 报, 2014, 45(5): 1170-1174.
- [18] Elser J, Acharya K, Kyle M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecol Lett*, 2003, 6(10): 936-943.
- [19] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 682-693.
- [20] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. *环境科学*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [21] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [22] 马任甜, 安韶山, 黄懿梅. 黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2787-2793.
- [23] 郝玉琢, 周磊, 吴慧, 等. 4 种类型水曲柳人工林叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征比较[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2019, 43(4): 101-108.
- [24] Crews T E, Kitayama K, Fownes J H, et al. Changes in soil phosphorus fractions and ecosystem dynamics across a long Chrono sequence in Hawaii[J]. *Ecology*, 1995, 76(5): 1407-1424.
- [25] 汪宗飞, 郑粉莉. 黄土高原子午岭地区人工油松林碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6870-6880.
- [26] 张萍, 章广琦, 赵一婷, 等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5087-5098.
- [27] 乔雨宁, 董从国, 黄敏, 等. 黄土高原不同植被带刺槐生态化学计量特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 31-38.
- [28] 丁小慧, 罗淑政, 刘金巍, 等. 呼伦贝尔草地植物群落与土壤化学计量学特征沿经度梯度变化[J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3467-3476.
- [29] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 250-262.

~~~~~

(上接第 74 页)

- [42] Wang M, Ji L, Li Q, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1234-1238.
- [43] Zhang Y, Guo S, Liu Q, et al. Influence of soil moisture on litter respiration in the semiarid loess plateau[J]. *Plos One*, 2014, 9. DOI: 10.1371/journal.pone.0114558.
- [44] Wood T E, Detto M, Silver W L. Sensitivity of soil respiration to variability in soil moisture and temperature in a humid tropical forest[J]. *Plos One*, 2013, 8. DOI: 10.1371/journal.pone.0080965.
- [45] Jiang Y, Wang B, Wang Y R, et al. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1641-1648.
- [46] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [47] 官情, 王俊, 宋淑亚, 等. 黄土旱塬区不同覆盖措施对冬小麦农田土壤呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(6): 1471-1476.
- [48] 上官宇先, 师日鹏, 韩坤, 等. 垄沟覆膜栽培冬小麦田的土壤呼吸[J]. *生态学报*, 2012, 32(18): 5729-5737.

~~~~~

(上接第 80 页)

- [27] Xu C Y, Singh V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 308(1): 105-121.
- [28] 张明明. 2000—2015 年中国干旱半干旱区蒸散发时空变化及其影响因素分析[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [29] 叶红. 近 17 年长江黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子响应关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [30] 张永强, 孔冬冬, 张选泽, 等. 2003—2017 年植被变化对全球陆面蒸散发的影响[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 584-594.
- [31] 童山琳, 崔晨风, 伍妮, 等. 下垫面特征变化对于旱区蒸散发的影响[J]. *节水灌溉*, 2020(7): 59-62.
- [32] Zou M Z, Niu J, Kang S Z, et al. The contribution of human agricultural activities to increasing evapotranspiration is significantly greater than climate change effect over Heihe agricultural region[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 8805-8819.