

耕作与覆盖措施对黄土塬区春玉米田土壤水气传输的影响

刘萌¹, 付威¹, 樊军^{1,2*}, 代子俊¹, 郝明德^{1,2}

(1 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】良好的土壤物理和水力学性质是土壤肥力可持续的基础。研究黄土高原旱作农业区长期不同耕作、覆盖措施对土壤水气传输性质的影响, 为黄土塬区可持续的农田管理提供参考。【方法】基于设在渭北旱塬始于 2002 年的田间定位试验, 选取传统耕作 (CT)、传统耕作+秸秆覆盖 (TS)、传统耕作+地膜覆盖 (TP)、传统耕作+全膜覆盖 (TWP)、免耕 (NT)、免耕+秸秆覆盖 (NS)、免耕+地膜覆盖 (NP)、免耕+生草覆盖 (NG) 共 8 个处理。于 2019 年春玉米收获期采集剖面土样, 对 0—10、10—20、20—30 和 30—40 cm 土层土壤质量含水量、容重、导气率、相对气体扩散率和饱和导水率进行测定与分析。【结果】与 CT 处理相比, TS 处理显著增加了 0—40 cm 土壤平均质量含水量, 降低了 0—40 cm 各层土壤导气率, 增加了各层土壤相对气体扩散率, 表层 (0—10 cm) 土壤饱和导水率显著降低了 75.9%; TP 处理收获期耕层 (0—20 cm) 土壤容重增加, 土壤总孔隙度显著降低, 在 0—10 cm 土层, 土壤导气率显著提高了 54.1%; TWP 处理耕层土壤容重显著增加, 土壤总孔隙度显著降低, 剖面 0—40 cm 土壤导气率和饱和导水率分别平均增加了 64.8% 和 111.2%, 尤其是表层土壤导气率显著提高了 99.5%。与 NT 处理相比, NS 处理耕层土壤容重降低, 总孔隙度增加, 表层土壤质量含水量、相对气体扩散率和饱和导水率分别显著提高了 14.8%、25.3% 和 446.4%; NP 处理耕层土壤容重增加, 总孔隙度降低, 表层土壤质量含水量和饱和导水率分别显著增加 3.5% 和 145.2%, 土壤导气率显著降低 33.7%; NG 处理耕层土壤容重降低, 总孔隙度增加, 表层土壤质量含水量显著提高了 11.3%, 土壤相对气体扩散率显著降低了 42.1%。相同覆盖条件下与传统耕作比较, 免耕处理能够降低下层 20—40 cm 土壤容重, 增加土壤总孔隙度, 提高土壤持水性, 虽然降低了表层 0—10 cm 土壤导气率, 但提高了土壤相对气体扩散率和饱和导水率。【结论】免耕秸秆覆盖可降低耕层土壤容重, 增加总孔隙度, 并且显著提高耕层土壤相对气体扩散率和饱和导水率, 增加下层土壤导气率, 是免耕处理组中最佳处理。传统耕作全膜覆盖可提高耕层土壤导气率、相对气体扩散率和饱和导水率, 是传统耕作组中最佳处理, 可有效保持渭北旱塬良好的土壤水气传输能力。

关键词: 免耕; 覆膜; 导气率; 相对气体扩散率; 饱和导水率

Effects of tillage and mulching methods on soil water and gas transport in spring maize field on the Loess Plateau

LIU Meng¹, FU Wei¹, FAN Jun^{1,2*}, DAI Zi-jun¹, HAO Ming-de^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】Efficient water and gas transportation is necessary for maintaining the sustainability of soil fertility. We investigated the effects of different tillage and mulching measures on physical properties of soil in the dry farming area, to provide reference for sustainable farmland management in the Loess Plateau. 【Methods】This study was conducted on a long-term field trial in the Weibei dryland which started in 2002. The selected treatments included conventional tillage (CT), conventional tillage + straw mulching (TS), conventional tillage + plastic film mulching (TP), conventional tillage + whole plastic film mulching (TWP),

收稿日期: 2020-09-15 接受日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41830754); 陕西省重点研发计划 (2020NY-158)。

联系方式: 刘萌 E-mail: mengl2019@163.com; * 通信作者 樊军 E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

no-tillage (NT), no-tillage + straw mulching (NS), no-tillage + plastic film mulching (NP), and no-tillage + grass mulching (NG). During the spring maize harvest in 2019, soil samples were collected for the determination of soil water content, soil bulk density, soil air permeability, relative gas diffusion rate, soil mass water content, and saturated hydraulic conductivity (SHC) in 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, and 30–40 cm soil layers. **【 Results 】** Compared with CT, TS increased average mass water content in 0–40 cm soil layer, decreased air conductivity in 0–40 cm layer, increased relative gas diffusion rate in the four soil layers, but reduced SHC in 0–10 cm layer by 75.9%. Compared with CT, TP increased soil bulk density in 0–20 cm layer, increased soil air conductivity in 0–10 cm layer by 54.1%, but reduced total soil porosity in 0–40 cm layer. Compared with CT, TWP treatment increased soil bulk density in 0–20 cm layer, increased soil air conductivity in 0–40 cm layer by 64.8%, increased SHC in 0–40 cm layer by 111.2%, but decreased total soil porosity. Compared with NT, NS increased total porosity in 0–10 cm layer, increased surface soil mass water content, relative gas diffusion rate, and saturated hydraulic conductivity by 14.8%, 25.3%, and 446.4%, respectively, but reduced soil bulk density. Compared with NT, NP decreased total porosity, decreased soil air conductivity by 33.7%, but increased surface soil mass water content and SHC by 3.5% and 145.2%, respectively. Compared with NT, NG increased total porosity, increased surface soil mass water content by 11.3%, but decreased relative gas diffusion rate (by 42.1%) and soil bulk density. Compared with CT under the same mulching conditions, NT reduced soil bulk density in 20–40 cm layer, increased total soil porosity and water holding capacity. Although NT reduced air conductivity in surface layer (0–10 cm), it increased soil relative gas diffusivity and SHC. **【 Conclusions 】** No-tillage with straw mulching reduced surface soil bulk density, but increased total porosity, relative gas diffusion rate, saturated hydraulic conductivity, and air permeability in deep soil layer. The combination of traditional tillage and year-round mulching performs best in increasing soil air permeability, relative gas diffusion rate, and saturated water conductivity in surface or cultivated soil layer.

Key words: no tillage; film mulching; air permeability; relative gas diffusion; saturated hydraulic conductivity

黄土塬区是典型的传统旱作农业区, 春玉米是该地区主要粮食作物之一, 面临的主要问题是降水不足、时空分布不均, 施肥偏多但利用率低, 缺少有效的保水保肥措施^[1-2], 并且农民习惯采用“翻耕+浅旋”的耕作方式, 会对土壤产生剧烈扰动, 引起土壤持水性下降, 犁底层紧实等一系列问题^[3]。因此, 通过不同的耕作、覆盖措施改变土壤理化性状和生物学性质是提高该地区作物产量的有效措施^[4]。以少耕、免耕为代表的耕作措施具有改善土壤结构, 有效保持土壤水分, 增加土壤持水性和通透性等作用^[5-6]。国内外很多研究表明, 免耕可在减少土壤扰动和外源输入有机物的条件下, 提高土壤孔隙连通性和有机质含量, 从而提高作物产量^[7-8]。此外, 地表覆盖措施能够提高土壤入渗能力, 有利于蓄水保墒和土壤培肥, 可促进耕地质量提升^[9]。地膜覆盖可显著减少地表无效蒸发, 降低土壤容重^[4], 为作物提供水、热保障^[10], 是旱作农田提高水分利用效率的有效措施^[11]。秸秆覆盖可增加有机质的输入, 提高土壤呼吸速率^[12], 调节土壤温度, 增加作物产量^[13]。

土壤供给作物生长所需的水、肥、气和热, 其

中土壤的水气传输性是土壤质量的决定性因素^[14-15]。土壤水气传输性反映土壤水分和空气的更新速率, 关系土壤水气流通及其对作物的供应^[16]。土壤空气对作物生长和有机物质分解都起着决定性作用, 其中土壤导气率和相对气体扩散率决定了土壤气体传输能力^[17]。土壤水的传输能力影响着作物生长和生态系统的循环过程, 其中土壤饱和和导水率是反映土壤水分传导的重要参数, 具有一定的空间变化特性^[15]。因此, 揭示土壤的水气传输特征对作物的生长发育和产量形成具有重要意义。

到目前为止, 关于耕作、覆盖措施对春玉米增产及耕层土壤理化性质影响的研究较多, 而不同耕作、覆盖措施对土壤剖面水气传输性质影响的研究较少。针对这一问题, 本研究依托陕西渭北旱塬长武黄土高原农业生态试验站长期不同耕作、覆盖处理定位试验, 对试验区 2019 年春玉米收获期 0–40 cm 土壤含水量、容重、总孔隙度、土壤导气率、相对气体扩散率和饱和导水率进行测定与分析, 探究长期不同耕作、覆盖条件对土壤水气传输的影响, 旨在探索适合该区域保持良好土壤水气传输能力的耕作措

施, 以期为旱作农业生产的可持续性发展提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

长期定位试验位于陕西省咸阳市长武县的黄土高原农业生态试验站(35°14' N、107°40' E), 地处典型的黄土塬区。属暖温带半湿润大陆性季风气候, 是我国重要的水养旱作农业区^[2-4]。试验区年平均气温 9.1℃, 1 月份平均气温-4.7℃, 7 月份平均气温 22.1℃, 年均降水量 578.5 mm, 降水年际变异较大, 且降水季节性分布不均, 降雨集中于 7—9 月, 平均海拔 1200 m, 日照时数 2226 h。长武塬地处黏黑垆土地带, 母质是深厚的马兰黄土, 土层深厚, 0—40 cm 土壤容重为 1.23~1.44 g/cm³, 孔隙度 50% 左右。

1.2 试验设计

田间长期定位试验始于 2002 年, 总面积 1260 m², 设置 12 个处理, 各小区面积为 5 m × 7 m, 供试作物为一年一熟的春玉米, 品种选用‘先玉 335’, 采取宽窄行种植, 宽行距 60 cm, 窄行距 30 cm。本季春玉米于 2019 年 5 月 10 日播种, 2019 年 10 月 1 日收获。本研究选取了不同耕作、覆盖措施的 8 个处理进行研究^[4](表 1)。每个处理均设 3 次重复, 试验所用地膜为 60 cm 宽、0.015 mm 厚的聚乙烯薄膜, 每个小区均基施氮肥(尿素, 含 N 46%)和磷肥(过磷酸钙, 含 P₂O₅ 16%), 其中氮肥用量为 N 150 kg/hm²,

磷肥用量为 P₂O₅ 75 kg/hm², 玉米生长期不追肥^[2]。

1.3 试验方法

春玉米收获后, 在各小区预埋中子管前 30 cm 处挖阶梯状土壤剖面进行取样(2019 年 10 月 5 日至 6 日), 剖面共分 0—10、10—20、20—30 和 30—40 cm 4 层。分别在每个土层中部用环刀采样, 用于测定土壤质量含水量、土壤容重、土壤导气率、相对气体扩散率和饱和导水率。土壤质量含水量和土壤容重采用烘干法, 将环刀所取样品置于 105℃ 下烘干 12 h 以上至恒重, 测定土壤导气率、相对气体扩散率和饱和导水率, 每个处理 6 个重复, 其中土壤导气率和相对气体扩散率测定在容重测定结束后立即进行, 此时土壤含水量为 0。

土壤导气率采用 Mohammadi 和 Vanclooster 设计的装置测定^[18], 装置示意图如图 1 所示。将土样装入小型气体扩散气室, 上层气室封住, 然后连接 U 型压力计和马氏瓶, 用马氏瓶排出水的流量代替通过土样的气体流量, 天平读数记录, 由大气压和出水量即可计算土壤导气率。计算公式为:

$$Ka = \frac{1}{\Lambda} \frac{\eta q}{\Delta p} \quad (1)$$

$$\Lambda = D \left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{D}{H} \right) \left(1 + \frac{D}{H} \right)^{-1} \ln \left(1 + \frac{D}{H} \right) \right] \quad (2)$$

$$\eta = (1717 + 4.8T) \times 10^{-8} \quad (3)$$

式中: Ka 是单位时间单位面积通过土样的气体流量 (m²); Λ 是经验因子; q 为单位时间通过土样的气体

表 1 试验处理详情

Table 1 Experimental treatment details

代码 Code	处理 Treatment	耕作管理 Tillage management
CT	传统耕作 Conventional tillage	仅在春玉米播种前翻耕一次, 无覆盖 One plough before spring maize, no mulching on soil
TS	CT+秸秆覆盖 CT + straw mulching	在CT基础上, 当季收获的秸秆均匀覆盖小区, 玉米播种时秸秆收拢, 放置行间 Based on CT, all the harvested straw in each plot is well piled on soil. Before maize seeding, all the straw is piled up in inter-rows
TP	CT+地膜覆盖 CT + plastic film mulching	在CT的基础上, 垄上覆膜, 行间不覆膜, 膜上打孔种植 Based on CT, only the ridges covered with plastic films, leave inter-rows clear, perforated planting on film
TWP	CT+全膜覆盖 CT+whole plastic film mulching	在CT基础上, 全部覆盖地膜, 膜上打孔种植 Based on CT, whole plot covered with plastic films, perforated planting on film
NT	连年免耕 No tillage	试验期连年免耕, 无覆盖 No-tillage and no mulching have been taken all the years
NS	NT+秸秆覆盖 NT+straw mulching	在NT基础上, 秸秆处理同TS Based on NT, the treatment of straw is the same as TS
NP	NT+地膜覆盖 NT+plastic film mulching	在NT基础上, 地膜处理同TP Based on NT, the treatment of plastic film is the same as TP
NG	NT+生草覆盖 NT + grass mulching	免耕, 7月底种植油菜, 玉米收获后移走全部秸秆, 油菜保留在原地 NT, planting oilseed rape at the end of July, all the straw removed and oilseed rape retained

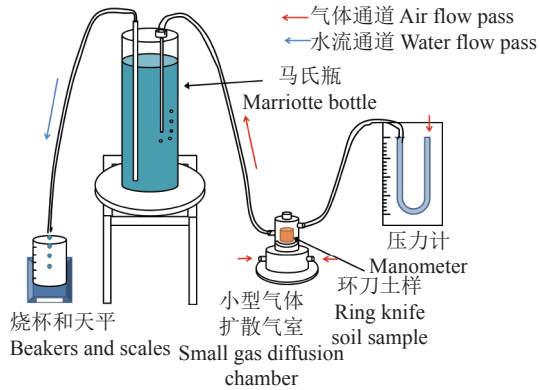


图 1 土壤导气率装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil air permeability

流量 (m^3/s); η 是空气黏滞系数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); Δp 表示土样上下界面的压力差 (Pa); D 是环刀中土样直径 (m); H 是环刀中土样高度 (m); T 为气温 ($^{\circ}\text{C}$).

土壤相对气体扩散率测定装置示意图如图 2 所示。完成土壤导气率测定后, 将土样装入小型气体扩散气室, 在上层气室安装 O_2 探头, 将 O_2 探头与 CR1000 数据采集器相连, 之后连接数据显示器。向上层气室中通入氮气直至气室中的 O_2 浓度达到最低值 (O_2 几乎被完全排出) 关闭氮气开关, 并将每个气室单独隔开, 使空气从下层气室进入, 通过土样向上扩散, 最终到达装有 O_2 探头的上层气室, 即可测定土壤中气体的扩散率。定义 D_p/D_0 为土壤相对气体扩散率, D_p 代表土壤中气体扩散系数, D_0 是大气中的气体扩散系数。 D_p 是气体相对浓度 C_r 关于时间 t 的线性函数的斜率^[19], D_0 是关于气压 (P) 与温度 (T) 的函数^[20]。计算公式为:

$$C_r = \frac{C_t - C_a}{C_0 - C_a} \quad (4)$$

$$D_0 = D_s \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.75} \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (5)$$

式中: C_t 是气室内 t 时刻 O_2 浓度 (%); C_a 是大气 O_2 浓度 (%); C_0 是气室 O_2 初始浓度 (%). D_s 是一个关于 D_0 在 $T_0=293.15 \text{ K}$ 、 $P_0=1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时的参考值, 取值为 $1.47 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[21], 一般在 20°C , D_0 取值为 $2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

土壤饱和导水率采用定水头自下供水法, 如图 3 所示。根据达西定律计算^[22]为:

$$K_s = \frac{q \times l}{\Delta h \times A} \quad (6)$$

式中: K_s 为饱和导水率 (cm/min); q 为 Δt 时间的渗流量 (cm^3/min); l 为环刀中土体高度 (cm); Δh 为环刀中土样上下水面水势差 (cm); A 为环刀中土体横截面面

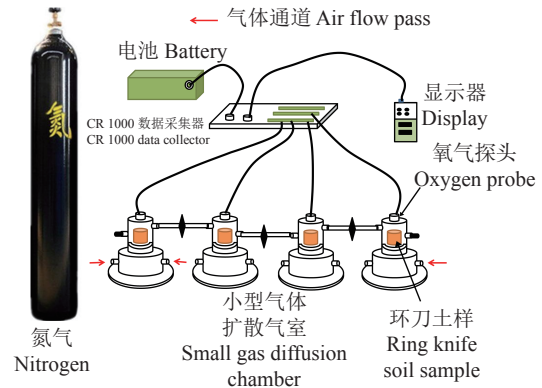


图 2 土壤相对气体扩散率装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil relative gas diffusivity

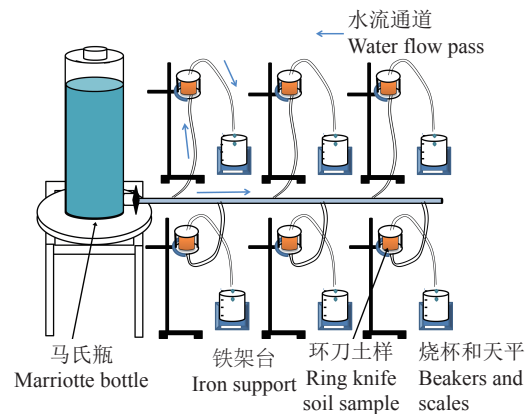


图 3 土壤饱和导水率装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of soil saturated hydraulic conductivity

积 (cm^2).

1.4 数据分析与绘图

试验数据采用 Excel 2010 进行整理和计算, 采用 SPSS 22 对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 如果差异显著 ($P < 0.05$), 再用 LSD 法进行多重比较, 采用 Origin 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作和覆盖措施对土壤质量含水量的影响

不同耕作与覆盖措施对春玉米收获期剖面土壤质量含水量有显著影响 (图 4)。与 CT 处理相比, TS 和 TWP 处理 0—40 cm 土层土壤平均质量含水量分别显著增加了 2.6% 和 5.3%, 但 CT 处理在 0—10 cm 土层显著高于 TS、TP 和 TWP 处理。与 NT 处理相比, NS、NP 和 NG 处理耕层土壤平均质量含水量分别增加 14.8%、3.5% 和 11.3%, NS、NP 和 NG 处理

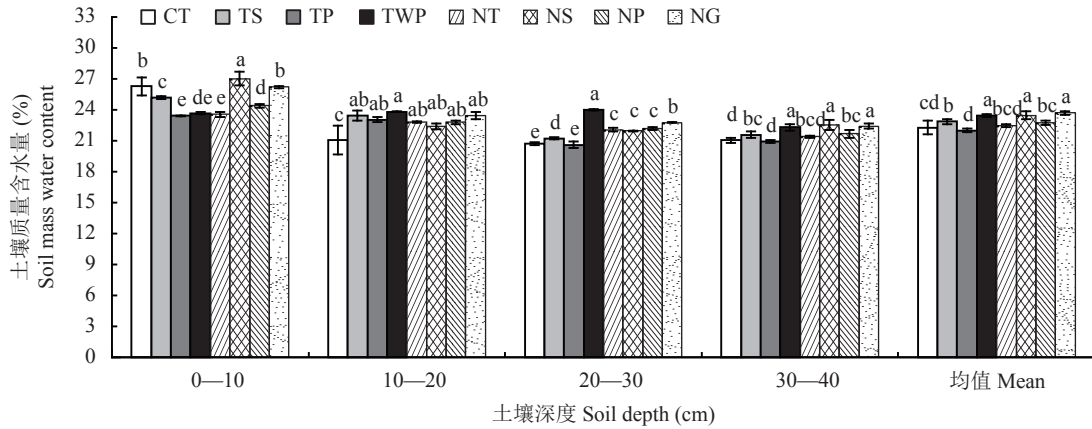


图 4 不同耕作覆盖措施下玉米收获期各层土壤质量含水量

Fig. 4 Soil mass water content in different soil layers under different tillage and mulching methods at maize harvest

[注 (Note) : 方柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

0—40 cm 土壤平均质量含水量分别增加了 4.5%、1.3% 和 5.6%，且在 0—10 cm 土层差异达到显著水平。NS 和 NP 处理 0—40 cm 土层土壤平均质量含水量分别比相同覆盖措施下的 TS 和 TP 处理高 2.7% 和 3.4%。

2.2 不同耕作和覆盖措施对土壤容重和总孔隙度的影响

不同耕作覆盖措施对春玉米收获期剖面土壤容重和总孔隙度影响显著，呈现出随着土壤深度的增加，土壤容重增加、总孔隙度降低的趋势(图 5、表 2)。与 CT 处理相比，TS、TP 和 TWP 处理使 0—10 cm

土层土壤容重分别显著增加了 6.3%、10.6% 和 16.1%。与 NT 处理相比，NP 处理使 0—10 cm 土层土壤容重增加了 4.7%，而 NS 和 NG 处理则分别降低了 8.7% 和 7.1%，且差异均达到显著水平。NT、NS 和 NP 处理耕层 (0—20 cm) 土壤容重高于相同覆盖措施的 CT、TS 和 TP 处理，而 20—40 cm 土层土壤容重低于相应的传统耕作处理。

在 0—10 cm 土层，与 CT 处理相比，TS、TP 和 TWP 处理土壤总孔隙度分别显著降低了 4.6%、8.5% 和 12.7%，与 NT 处理相比，NS 和 NG 处理土壤总孔隙度分别显著增加了 8.4% 和 7.0%，且所有

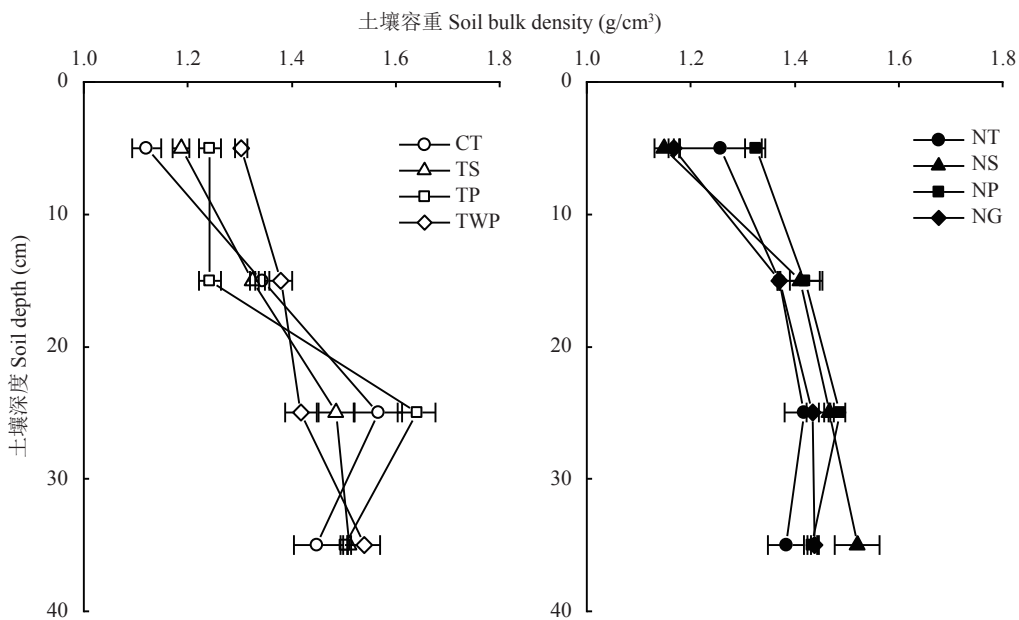


图 5 不同耕作覆盖措施下玉米收获期各层土壤容重

Fig. 5 Soil bulk density in different soil layers under different tillage and mulching methods at maize harvest

表 2 不同耕作覆盖措施下玉米收获期各层土壤总孔隙度 (%)

Table 2 Soil porosity in different soil layers under different tillage and mulching methods at maize harvest

处理 Treatment	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
CT	56.22 ± 1.08 aA	47.55 ± 0.25 abB	38.82 ± 1.82 cD	43.43 ± 1.75 bBC
TS	53.63 ± 0.63 bcA	48.25 ± 0.22 abB	41.94 ± 1.35 bC	40.99 ± 0.12 cC
TP	51.46 ± 0.84 cdA	45.78 ± 1.43 cdB	36.74 ± 0.25 dD	41.29 ± 0.17 cC
TWP	49.09 ± 0.47 efA	46.15 ± 0.85 bcdB	44.60 ± 1.18 aB	39.89 ± 1.23 cC
NT	50.87 ± 3.06 deA	46.44 ± 0.06 bcB	44.61 ± 1.49 aB	45.94 ± 1.35 aB
NS	55.14 ± 0.72 abA	44.91 ± 1.66 cdB	42.72 ± 0.08 abBC	40.62 ± 1.67 cC
NP	48.28 ± 0.75 fA	44.57 ± 1.11 dB	41.94 ± 0.40 bC	44.00 ± 0.38 bB
NG	54.41 ± 0.39 abA	46.49 ± 0.09 bcB	43.96 ± 0.45 abC	43.80 ± 0.31 bC

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层土壤不同处理间差异显著, 同行数据后不同大写字母表示同一处理在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments under the same soil depth, and values followed with different capital letters in a row indicate significant difference among soil depths under the same treatment ($P < 0.05$).

处理土壤的总孔隙度显著高于其余土层。在 10—20 cm 土层, TS 处理土壤总孔隙度最大, 达到 48.25%, 显著高于 TP、NS 和 NP 处理。在 20—30 cm 土层, TP 处理土壤总孔隙度显著低于其他处理。在 30—40 cm 土层, CT 处理土壤总孔隙度显著高于 TS、TP、TWP 处理, NT 处理显著高于 NS、NP、NG 处理。NT、NS 和 NP 处理耕层 (0—20 cm) 土壤总孔隙度低于相同覆盖措施的 CT、TS 和 TP 处理, 而在 20—40 cm 土层, 土壤总孔隙度高于相应的传统耕作处理。

2.3 不同耕作和覆盖措施对土壤导气率的影响

不同耕作与覆盖措施对剖面土壤导气率有显著影响 (表 3)。在 0—10 cm 土层, 与 CT 处理相比, TP 和 TWP 处理分别显著提高了 54.1% 和 99.5%,

TS 处理比 CT 处理土壤导气率降低了 0.5%, 两个处理间差异不显著。与 NT 处理相比, NP 处理土壤导气率显著降低了 33.7%, NS 和 NP 处理与 NT 处理间差异不显著。对比相同覆盖条件下翻耕、免耕处理, 土壤的导气率表现为: CT > NT、TS > NS、TP > NP, 其中 TP 处理土壤导气率与免耕处理 NP 之间差异达到显著水平。在 10—40 cm 土层, 与 CT 处理相比, TWP 处理土壤导气率平均提高了 44.0%, 且 20—40 cm 土层达到显著水平, 与 NT 处理相比, NS 和 NP 处理土壤导气率分别平均提高了 17.9% 和 51.1%, 且 10—20 cm 和 30—40 cm 土层差异达到显著水平。随着土壤深度增加, 土壤导气率逐渐降低, 所有处理 0—10 cm 土层土壤导气率显著高于 20—40 cm 土层。

表 3 不同耕作覆盖措施下玉米收获期剖面土壤导气率 (μm^2)

Table 3 Soil air permeability in different soil layers under different tillage and mulching methods at maize harvest

处理 Treatment	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
CT	197.97 ± 1.27 cA	198.35 ± 2.27 aA	60.10 ± 8.46 deB	71.44 ± 10.46 deB
TS	197.04 ± 2.36 cA	154.85 ± 2.42 bB	56.30 ± 8.48 eC	64.16 ± 1.70 eC
TP	305.05 ± 74.88 bA	194.86 ± 1.51 aB	56.57 ± 2.42 eC	80.69 ± 5.21 dC
TWP	394.97 ± 3.37 aA	195.69 ± 0.98 aB	120.99 ± 19.10 bD	158.43 ± 1.25 aC
NT	195.47 ± 0.16 cA	169.06 ± 23.74 bB	68.23 ± 7.28 deD	96.47 ± 0.52 cC
NS	196.34 ± 0.66 cA	195.94 ± 0.28 aA	79.06 ± 4.87 dC	118.62 ± 18.25 bB
NP	129.64 ± 1.24 dA	97.67 ± 0.81 cB	97.82 ± 0.79 cB	64.30 ± 0.18 eC
NG	197.08 ± 1.58 cA	197.99 ± 1.07 aA	148.81 ± 16.80 aB	157.57 ± 0.28 aB

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层土壤不同处理间差异显著, 同行数据后不同大写字母表示同一处理在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments under the same soil depth, and values followed with different capital letters in a row indicate significant difference among soil depths under the same treatment ($P < 0.05$).

2.4 不同耕作和覆盖措施对土壤相对气体扩散率的影响

不同耕作覆盖措施对剖面土壤相对气体扩散率有显著影响(表4)。在0—10 cm土层,与CT处理相比,TS和TWP处理土壤相对气体扩散率分别提高了28.7%和9.3%,与NT处理相比,NS和NP处理土壤相对气体扩散率分别提高了25.3%和19.4%,其中NS处理差异达到显著水平,相同覆盖条件下NT、NS和NP处理显著高于CT、TS和TP处理。在10—40 cm土层,与CT处理相比,TS和TWP处理平均土壤相对气体扩散率分别提高了42.0%和23.3%,其中TS处理在20—40 cm土层差异达到显著水平,与NT处理相比,NS处理平均土

壤相对气体扩散率提高了35.0%。TP处理与CT处理各层差异均未达到显著水平,NG处理在耕层显著低于NT处理,降低了42.1%。随着土壤深度的增加,土壤相对气体扩散率大体呈现逐渐降低的趋势,除NG处理外,其余处理土壤相对气体扩散率均是在0—10 cm土层最高。

2.5 不同耕作和覆盖措施对土壤饱和导水率的影响

不同耕作覆盖措施显著影响了土壤饱和导水率(表5)。在0—10 cm土层,与CT处理相比,TS、TP和TWP处理土壤饱和导水率分别降低了75.9%、18.7%和27.5%,其中CT与TS处理差异达到显著水平;与NT处理相比,NS和NP处理土壤饱和导

表4 不同耕作覆盖措施下玉米收获期剖面土壤相对气体扩散率(D_p/D_0)

Table 4 Soil relative gas diffusivity in different soil layers under different tillage and mulching methods at maize harvest

处理 Treatment	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
CT	0.0279 ± 0.0022 dA	0.0230 ± 0.0034 cB	0.0196 ± 0.0010 dB	0.0219 ± 0.0057 cB
TS	0.0359 ± 0.0015 cdA	0.0285 ± 0.0045 cB	0.0282 ± 0.0029 abB	0.0349 ± 0.0052 bB
TP	0.0261 ± 0.0008 dA	0.0256 ± 0.0026 cA	0.0195 ± 0.0001 dB	0.0237 ± 0.0017 cA
TWP	0.0305 ± 0.0008 dA	0.0266 ± 0.0006 cBC	0.0288 ± 0.0008 abAB	0.0242 ± 0.0034 cC
NT	0.0454 ± 0.0090 bcA	0.0365 ± 0.0020 bAB	0.0284 ± 0.0037 abBC	0.0244 ± 0.0020 cC
NS	0.0569 ± 0.0120 aA	0.0505 ± 0.0056 aA	0.0254 ± 0.0034 bcB	0.0447 ± 0.0038 aA
NP	0.0542 ± 0.0005 abA	0.0235 ± 0.0012 cB	0.0219 ± 0.0016 cdBC	0.0210 ± 0.0011 cC
NG	0.0263 ± 0.0033 dB	0.0247 ± 0.0011 cB	0.0299 ± 0.0008 aA	0.0240 ± 0.0008 cB

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层土壤不同处理间差异显著,同行数据后不同大写字母表示同一处理在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments under the same soil depth, and values followed with different capital letters in a row indicate significant difference among soil depths under the same treatment ($P < 0.05$).

表5 不同耕作覆盖措施下玉米收获期剖面土壤饱和导水率(cm/d)

Table 5 Soil saturated hydraulic conductivity in different soil layers under different tillage and mulching methods at maize harvest

处理 Treatment	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm
CT	4.44 ± 0.97 cA	2.51 ± 0.34 cB	0.64 ± 0.02 cC	0.67 ± 0.35 dC
TS	1.07 ± 0.33 dB	2.11 ± 0.84 cA	1.47 ± 0.17 cAB	1.97 ± 0.37 cdAB
TP	3.61 ± 0.17 cA	3.84 ± 0.51 bA	1.17 ± 0.22 cB	3.69 ± 0.66 bA
TWP	3.22 ± 1.01 cB	6.13 ± 0.16 aA	4.97 ± 0.48 aA	3.09 ± 0.73 bcB
NT	2.61 ± 0.36 cdB	0.77 ± 0.30 dC	4.42 ± 0.73 aA	2.56 ± 0.44 bcB
NS	14.26 ± 2.30 aA	2.12 ± 0.30 cC	3.25 ± 0.21 bC	5.52 ± 1.51 aB
NP	6.40 ± 0.29 bA	2.02 ± 0.31 cB	3.00 ± 0.94 bB	2.12 ± 0.52 cdB
NG	3.35 ± 0.01 cB	2.43 ± 0.40 cB	4.79 ± 0.92 aA	2.12 ± 0.99 cdB

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一土层土壤不同处理间差异显著,同行数据后不同大写字母表示同一处理在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column indicate significant difference among treatments under the same soil depth, and values followed with different capital letters in a row indicate significant difference among soil depths under the same treatment ($P < 5\%$).

水率显著提高了 446.4% 和 145.2%。对比相同覆盖条件下翻耕、免耕处理, 土壤饱和和导水率表现为: CT > NT、TS < NS、TP < NP。在 10—40 cm 土层, 与 CT 处理相比, TS、TP 和 TWP 处理土壤饱和和导水率分别平均提高了 45.7%、128.3% 和 272.4%, 且 TP 和 TWP 处理在 10—20 和 30—40 cm 土层差异达到显著水平; 与 NT 处理相比, NS 和 NG 处理土壤饱和和导水率分别平均提高了 46.1% 和 20.5%。

3 讨论

3.1 耕作与覆盖措施对收获期土壤质量含水量的影响

本研究结果显示, 与 CT 处理相比, 春玉米收获后 TWP 处理在 0—10 cm 土壤质量含水量较低, 但 10—40 cm 各层土壤质量含水量均增加 (图 4), 这是因为表层土壤质量含水量受降雨影响显著, 一方面地膜覆盖阻挡雨水入渗, 另一方面 TWP 处理春玉米长势优良, 生育期消耗了表层更多的水分, 从而造成表层 (0—10 cm) 土壤质量含水量较低, 全年覆膜可有效抑制土壤水分无效蒸发, 提高降水潜在利用效率^[8], 促进植物根系对下层土壤水分的利用, 造成下层土壤水分向土体上层运动^[23], 补充了 10—40 cm 土壤水分。潘雅文等^[4]研究指出, 覆膜处理的浅层土壤质量含水量均高于传统耕作。这与本研究结果不同, 可能是因为两个试验研究的时期不同, 全年覆膜有利于改善作物生育期墒情。此外, 相同覆盖条件下免耕处理 0—40 cm 土层土壤平均质量含水量高于传统耕作处理 (图 4)。主要是由于传统耕作多年翻耕使农田形成了坚实的犁底层, 同时耕层土壤过于疏松, 加速了土壤水分蒸发, 从而降低了土壤蓄水能力; 相反, 免耕减少了对土壤的扰动, 因而保墒作用明显^[24], 并且有研究表明在相同覆盖条件下免耕模式水分利用效率高于传统耕作模式^[25]。殷涛等^[26]认为免耕覆盖能显著提高表层土壤质量含水量, 而深层水分含量却会降低; 胡锦涛等^[2]也发现了覆膜处理会显著增加 200 cm 以下水分的消耗。这表明免耕覆膜虽然能改善表层土壤墒情, 但作物蒸腾耗水的增加会导致深层土壤储水量下降。

3.2 耕作和覆盖措施对收获期土壤容重和总孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度可以调节土壤的紧实状况, 影响养分转化, 因此适宜的土壤容重和孔隙度有利于作物根系的生长发育^[22]。相关研究表明, 免耕有利

于降低土壤容重, 增大土壤孔隙度, 改善土壤物理性状^[4,8-9]。本研究结果表明, 与传统耕作相比, 免耕增加了 0—20 cm 土壤容重, 但降低了 20—40 cm 土层土壤容重 (图 5), 这与巩文峰等^[27]的研究结果一致, 主要是因为相比于传统耕作, 免耕没有对 0—20 cm 耕层进行每年的机械破碎翻耕, 导致土壤容重增大, 但是免耕对土壤扰动较少, 有利于土壤稳定性的提升, 促进了土壤中生物的活动^[28], 一定程度上降低了深层土壤容重。

本研究免耕秸秆覆盖和生草覆盖相对于免耕不覆盖可显著降低 0—10 cm 土层的土壤容重, 增加土壤总孔隙度 (图 5、表 2), 这与相关研究对耕层土壤物理性质得出的结论一致^[5,29]。免耕秸秆覆盖改变了土壤与大气的界面层状况, 避免地表裸露, 从而降低了外界对于土壤结构的破坏, 有效减少了土壤板结现象的发生, 进而降低了土壤容重, 增大了土壤总孔隙度^[29]。免耕生草覆盖降低土壤容重可能是由于植物根系主要分布于 0—10 cm 的土层, 改善了土壤结构, 促进了有效毛管孔隙的增多, 使得土壤表层容重下降。因此, 免耕秸秆覆盖和生草覆盖对降低土壤容重, 增加土壤总孔隙度效果显著。

黄土旱塬玉米生长面临降雨偏少且季节分布不均的问题^[2,11], 现已成为制约玉米增产的主要因素。地膜覆盖有效降低土壤水分蒸发, 起到蓄水保墒的效果, 已成为当地农业发展的有效措施。但是长期地膜覆盖却增加了 0—10 cm 土层土壤容重, 降低了土壤总孔隙度 (图 5, 表 2), 影响土壤质量, 主要是因为一方面地膜材料以聚乙烯为主, 长期覆盖后会导致地膜残留在土壤中, 人工清除费时费力, 残留不易降解从而阻塞土壤孔隙, 导致土壤总孔隙度减小, 容重增大^[23,30]; 另一方面长期覆膜可能会恶化表层土壤生态条件, 加速土壤有机质矿化, 导致土壤水稳性团聚体和微生物数量等减少^[31]。为了当地旱作农业的可持续发展, 应推广使用可降解地膜, 以达到增产增效、保护环境的目的。

3.3 耕作和覆盖措施对收获期土壤导气率的影响

土壤导气率是反映土壤导气性的重要指标, 能够充分反映土壤孔隙和土壤结构特征^[18,32]。在本研究中, 翻耕覆膜 TP 和 TWP 处理提高了 0—10 cm 土壤导气率, 并且传统耕作处理土壤导气率高于相同覆盖措施的免耕处理 (表 3), 可能是因为长期翻耕增加了土壤大孔隙^[33], 促进了作物根系生长, 随着取样环刀中土壤水分含量的降低, 根系萎缩, 沿根系生长

方向孔隙逐渐增大,从而增加了土壤导气率。而且Martínez等^[16]研究表明,免耕措施可能会使表层土壤紧实,对土壤通气性产生负面影响,这可能是免耕措施表层土壤导气率低的原因之一。

相对于免耕不覆盖,免耕秸秆覆盖和生草覆盖可提高10—40 cm土壤导气率(表3)。说明秸秆覆盖能够有效改善10—40 cm土壤孔隙结构,加强土壤颗粒的团聚作用^[34],使土壤孔隙连通性增加^[17],生草覆盖增加了10—40 cm土壤生物活性,进而增加了土壤生物大孔隙,改善了土壤通气性^[35]。秸秆或生草覆盖的免耕条件下,良好的土壤导气性既可以改善土壤肥力和土壤结构,还可以减少土壤CO₂和N₂O排放,更好地保护土壤和大气环境。

3.4 耕作和覆盖措施对收获期土壤相对气体扩散率的影响

免耕可促进连续孔隙的形成,特别是生物孔隙的形成,对土壤的气体运输功能产生积极影响^[36]。本研究发现相同覆盖条件下免耕处理0—10 cm土层土壤相对气体扩散率显著高于传统翻耕处理(表4),但土壤导气率却低于传统翻耕处理(表3),这可能是由于土壤导气率主要反映的是依赖土壤表层大孔隙实现土壤空气与大气之间的对流运动,而土壤相对气体扩散率则反映的是依靠土壤毛管孔隙实现气体交换的扩散运动^[6],免耕处理表层土壤大孔隙较少而密布毛管孔隙,从而导致土壤导气率低但土壤相对气体扩散率高。Berisso等^[37]研究发现,农机具对土壤的压实作用会显著降低土壤相对气体扩散率。这可能也是产生上述结果的原因所在。

秸秆覆盖可明显增加各层土壤相对气体扩散率(表4),说明秸秆覆盖可改善土壤孔隙结构,促进土壤空气与外界的扩散交换,提高土壤气体扩散能力。王秋菊等^[38]研究显示,秸秆覆盖降低了直径>0.05 mm的大孔隙,增加了直径0.05~0.002 mm的土壤有效孔隙。而且玉米秸秆本身的茎秆絮状髓部经过腐解为土壤微生物提供了良好的生活环境,改善了土壤空气条件,从而促进土壤气体扩散。

3.5 耕作和覆盖措施对收获期土壤饱和和导水率的影响

土壤饱和和导水率是决定土壤入渗和渗漏性能的主要因素^[38],相关研究显示,传统耕作条件下,覆盖聚乙烯薄地膜会导致表层土壤孔隙度和透水性降低,进而降低土壤饱和和导水率^[4,23,30]。本研究也发现这一现象,在0—10 cm土层,TP和TWP处理比

CT处理土壤饱和和导水率分别降低了18.7%和27.5%,然而,TP和TWP处理土壤饱和和导水率在10—40 cm土层显著增加(表5),造成这种现象的原因可能是长期覆膜导致地膜残留在表层土壤中,阻塞了土壤中的导水孔隙,而且地膜覆盖提高了地温,加速了有机质分解^[4],从而使0—10 cm土层土壤饱和和导水率降低,但是覆膜也促进了玉米根系的生长,改善了底层土壤条件,增加了土壤有机质含量^[23],所以导致10—40 cm土层土壤饱和和导水率增加。

相同覆盖条件下,免耕NT、NS和NP处理在0—40 cm土层土壤平均饱和和导水率高于传统翻耕CT、TS和TP处理,其中NS处理在各层均高于TS处理,且除10—20 cm土层外均达到显著水平(表5),这与张仁陟等^[39]、彭正凯等^[40]研究结果一致,主要是因为免耕条件能够形成良好的土体结构,使土壤有效毛管孔隙增多,而且孔隙连续不间断,有利于水分的快速移动^[39]。而免耕秸秆覆盖表层土壤饱和和导水率显著高于其他处理,一方面是由于免耕秸秆覆盖缓解了雨滴对地表的打击,减缓了地表结皮发育,降低了土壤容重,提高了土壤水分入渗能力^[41];另一方面是由于秸秆覆盖增加了土壤中有有机质的积累,促进了玉米产生大量的根系分泌物,改善了土壤胶体状况^[4]。

此外,大量研究表明,在土壤含水量保持或者接近田间持水量时,土壤导气率和饱和和导水率之间存在对数关系^[34,42-44],而Masismelendez等^[45]研究也发现,土壤饱和和导水率与相对气体扩散率之间存在一定的对数关系。由于土壤含水量对土壤导气率和相对气体扩散率影响显著,而本研究是在收获期采集原状土测定的烘干土壤导气率、相对气体扩散率,所以土壤含水量未保持在田间持水量水平,未能比较不同耕作、覆盖处理下土壤导气率、相对气体扩散率和饱和和导水率之间的关系。土壤饱和和导水率空间变异性较大,试验操作繁琐、费力、耗时大^[43],因此,今后应开展相关试验,将土壤含水量控制在某个固定水平,研究土壤导气率、相对气体扩散率和饱和和导水率之间的关系,以期利用土壤导气率和相对气体扩散率值进行土壤饱和和导水率的推算。

4 结论

相同覆盖条件下免耕处理有利于改善土壤水气传输性状,能够增加土壤含水量,降低20—40 cm土层土壤容重,增加20—40 cm土层土壤总孔隙

度, 虽然降低了表层 0—10 cm 的土壤导气率, 但土壤相对气体扩散率和饱和导水率显著增加。免耕条件下进行秸秆覆盖处理显著提高了耕层土壤相对气体扩散率和饱和导水率, 增加了下层 20—40 cm 土壤的导气率, 降低了土壤容重, 增加了土壤总孔隙度和持水性, 是免耕组中最优处理。

传统耕作条件下不同类型的地膜覆盖均能增加耕层土壤导气率、相对气体扩散率和饱和导水率, 且全年覆盖处理下增加了土壤持水性; 秸秆覆盖虽增加了耕层土壤相对气体扩散率, 但是降低了土壤导气率和饱和导水率。因此经过综合比较, 传统耕作条件下全膜覆盖是适合该地区保持良好土壤剖面水气传输能力的有效措施。

参 考 文 献:

- [1] 陈国平, 高聚林, 赵明, 等. 近年我国玉米超高产田的分布、产量构成及关键技术[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 80–85.
Chen G P, Gao J L, Zhao M, *et al.* Distribution, yield structure, and key cultural techniques of maize superhigh yield plots in recent years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(1): 80–85.
- [2] 胡锦涛, 樊军, 付威, 等. 保护性耕作措施对旱地春玉米土壤水分和硝态氮淋溶累积的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1188–1198.
Hu J S, Fan J, Fu W, *et al.* Effects of conservation tillage measures on soil water and NO_3^- -N leaching in dryland maize cropland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1188–1198.
- [3] 张霞, 杜昊辉, 王旭东, 李军. 不同耕作措施对渭北旱塬土壤碳库管理指数及其构成的影响[J]. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2223–2237.
Zhang X, Du H H, Wang X D, Li J. Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool management index and its composition in Weibei highland[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2223–2237.
- [4] 潘雅文, 樊军, 郝明德, 陈旭. 黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表层土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1558–1567.
Pan Y W, Fan J, Hao M D, Chen X. Effects of long-term tillage and mulching methods on properties of surface soil and maize yield in tableland region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1558–1567.
- [5] Sanchez I I, Fultz L M, Lofton J, *et al.* Soil biological response to integration of cover crops and nitrogen rates in a conservation tillage corn production system[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83(5): 1356–1367.
- [6] Carter M R. Conservation tillage in temperate agroecosystems[M]. Boca Rato: CRC Press, 2017.
- [7] Pareja-Sánchez E, Plaza-Bonilla D, Ramos M C, *et al.* Long-term no-till as a means to maintain soil surface structure in an agro-ecosystem transformed into irrigation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 174: 221–230.
- [8] Çelik İ, Günel H, Acar M, *et al.* Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 185: 17–28.
- [9] 吴杨, 贾志宽, 边少锋, 王永军. 不同方式周年覆盖对黄土高原玉米农田土壤水热的调控效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(15): 2872–2885.
Wu Y, Jia Z K, Bian S F, Wang Y J. Regulation effects of different mulching patterns during the whole season on soil water and temperature in the maize field of Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15): 2872–2885.
- [10] 王红丽, 张绪成, 于显枫, 等. 半干旱区周年全膜覆盖对玉米田土壤冻融特性和水热分布的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1146–1154.
Wang H L, Zhang X C, Yu X F, *et al.* Effect of annual whole-film mulching on freezing-thawing characteristics, moisture and temperature distribution of maize soil in semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1146–1154.
- [11] 胡锦涛, 樊军, 付威, 郝明德. 不同管理措施对黄土塬区农田土壤水分调控和硝态氮淋溶累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 213–222.
Hu J S, Fan J, Fu W, Hao M D. Effect of different agricultural measures on soil water and NO_3^- -N leaching and accumulation in cropland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(2): 213–222.
- [12] 解梦怡, 商雨晴, 赵发珠, 王俊. 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.
Xie M Y, Shang Y Q, Zhao F Z, Wang J. Response of soil respiration to temperature under different mulching methods in a dryland corn field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(2): 467–473.
- [13] 戴皖宁, 王丽学, Ismail Khan, 等. 秸秆覆盖和生物炭对玉米田间地温和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 719–725.
Dai W N, Wang L X, Ismail Khan, *et al.* Effects of straw mulching and biochar addition on soil temperature and maize yield[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 719–725.
- [14] Berisso F E, Schjønning P, Keller T, *et al.* Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction [J]. *Geoderma*, 2013, 195–196: 184–191.
- [15] Becker R, Gebremichael M, Märker M. Impact of soil surface and subsurface properties on soil saturated hydraulic conductivity in the semi-arid Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, USA[J]. *Geoderma*, 2018, 322: 112–120.
- [16] Martinez I, Chervet A, Weisskopf P, *et al.* Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 130–140.
- [17] 赵丽丽, 李陆生, 蔡焕杰, 等. 有机物料还田对土壤导水导气性的综合影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(6): 1045–1057.
Zhao L L, Li L S, Cai H J, *et al.* Comprehensive effects of organic materials incorporation on soil hydraulic conductivity and air permeability[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(6): 1045–1057.
- [18] Mohammadi M H, Vanclooster M. A simple device for field and laboratory measurements of soil air permeability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2019, 83(1): 58–63.
- [19] Kuncoro P H, Koga K. A simple and low cost method for measuring

- gas diffusivity and air permeability over a single soil cylinder[J]. *Journal of Soil Physics Society of Japan*, 2012, 120: 55–60.
- [20] Kuncoro P H, Koga K, Satta N, *et al.* A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143: 172–179.
- [21] Jones H G. *Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [22] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.84–85.
Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Pedophysics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.84–85.
- [23] 王欢, 付威, 胡锦涛, 等. 渭北旱塬管理措施对冬小麦地土壤剖面物理性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1097–1106.
Wang H, Fu W, Hu J S, *et al.* Effects of agricultural measures on soil profile physical properties of winter wheat field in Weibei highland, China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1097–1106.
- [24] 冯倩倩, 韩惠芳, 张亚运, 等. 耕作方式对麦-玉轮作农田固碳、保水性能及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 869–879.
Feng Q Q, Han H F, Zhang Y Y, *et al.* Effects of tillage methods on soil carbon sequestration and water holding capacity and yield in wheat-maize rotation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 869–879.
- [25] 余菲. 长武县不同保护性耕作措施对土壤水分、肥力以及作物产量的影响研究[D]. 西安: 陕西师范大学硕士学位论文, 2012.
Yu F. Study on the effects of different conservation tillage measures on soil moisture, fertility and crop yield in Changwu County[D]. Xi'an: MS Thesis of Shaanxi Normal University, 2012.
- [26] 殷涛, 何文清, 严昌荣, 等. 地膜秸秆双覆盖对免耕种植玉米田土壤水热效应的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 78–87.
Yin T, He W Q, Yan C R, *et al.* Effects of plastic mulching on surface of no-till straw mulching on soil water and temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 78–87.
- [27] 巩文峰, 李玲玲, 张晓萍, 史旦旦. 保护性耕作对黄土高原旱地表层土壤理化性质变化的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(32): 280–285.
Gong W F, Li L L, Zhang X P, Shi D D. Influence of conservation tillage on top soil physical and chemical quality in rain-fed areas of the Loess Plateau[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(32): 280–285.
- [28] Kahlon M S, Lal R, Ann-Varughese M. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 151–158.
- [29] 武均, 蔡立群, 罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 112–117.
Wu J, Cai L Q, Luo Z Z, *et al.* Effects of conservation tillage on soil physical properties of rainfed field of the Loess Plateau in central of Gansu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 112–117.
- [30] 付威, 樊军, 胡雨彤, 等. 施肥和地膜覆盖对黄土旱塬土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1158–1167.
Fu W, Fan J, Hu Y T, *et al.* Effects of fertilization and film mulching on soil physical and chemical properties and winter wheat yield on the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(5): 1158–1167.
- [31] 王秋菊, 张敬涛, 盖志佳, 等. 长期免耕秸秆覆盖对寒地草甸土土壤物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2943–2948.
Wang Q J, Zhang J T, Gai Z J, *et al.* Effect of long-term straw mulching and no-tillage on physical properties of meadow soil in cold region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(9): 2943–2948.
- [32] 王卫华, 李建波, 张志鹏, 王全九. 覆膜滴灌条件下土壤改良剂对土壤导气率的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 160–167.
Wang W H, Li J B, Zhang Z P, Wang Q J. Effects of soil amendments on soil air permeability in film mulched drip irrigation field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 160–167.
- [33] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939–948.
Li Y J, Wang H, Zhao J N, *et al.* Effects of tillage methods on soil physicochemical properties and biological characteristics in farmland: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 939–948.
- [34] 王海霞, 孙红霞, 韩清芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 1025–1030.
Wang H X, Sun H X, Han Q F, *et al.* Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 1025–1030.
- [35] 曹铨, 沈禹颖, 王自奎, 等. 生草对果园土壤理化性状的影响研究进展[J]. 草业学报, 2016, 25(8): 180–188.
Cao Q, Shen Y Y, Wang Z K, *et al.* Effects of living mulch on soil physical and chemical properties in orchards: A review[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(8): 180–188.
- [36] Holthusen D, Brandt AA, Reichert J M, *et al.* Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 113–124.
- [37] Berisso F E, Schjønning P, Keller T, *et al.* Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 122: 42–51.
- [38] 刘继龙, 张振华, 谢恒星, 等. 烟台棕壤土饱和导水率的初步研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 129–132.
Liu J L, Zhang Z H, Xie H X, *et al.* Preliminary study on the saturated hydraulic conductivity of brown forest soil in Yantai[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 129–132.
- [39] 张仁陟, 罗珠珠, 蔡立群, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1–10.
Zhang R Z, Luo Z Z, Cai L Q, *et al.* Effects of long-term conservation tillage on soil physical quality of rainfed areas of the

- Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(4): 1–10.
- [40] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 保护性耕作对陇中旱作农田水分特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4022–4028.
- Peng Z K, Li L L, Xie J H, *et al.* Effects of conservational tillage on water characteristics in dryland farm of central Gansu, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4022–4028.
- [41] Dao T H. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(6): 1586–1595.
- [42] Loll P, Moldrup P, Schjønning P, *et al.* Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(8): 2387–2400.
- [43] 赵旭, 樊军, 付威. 土壤侵蚀与土地利用方式对黑土地土壤水气传输特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1599–1606.
- Zhao X, Fan J, Fu W. Effects of soil erosion and land use patterns on the characteristics of soil water and gas transport in the black soil region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1599–1606.
- [44] 韩蕾, 潘雅文, 朱志梅, 等. 水蚀风蚀交错区不同土地利用方式的土壤水气传输特性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1415–1422.
- Han L, Pan Y W, Zhu Z M, *et al.* The characteristics of soil water and gas transport under different land use patterns in the water-wind erosion crisscross region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1415–1422.
- [45] Masismelendez F, Deepagoda T K, De Jonge L W, *et al.* Gas diffusion-derived tortuosity governs saturated hydraulic conductivity in sandy soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 388–396.