

传统耕作结合秸秆地膜双元覆盖是提高渭北旱塬春玉米产量和养分吸收的有效措施

赵 晶^{1,3}, 刘 萌^{2†}, 付 威², 牛育华⁴, 郝明德^{1,2*}

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;
3 中国科学院大学, 北京 100049; 4 陕西科技大学化学与化工学院, 陕西西安 710021)

摘要:【目的】在干旱半干旱地区, 实现雨养农业作物持续增产的关键因素是提高作物养分利用效率。研究黄土高原旱作农业区长期不同耕作、覆盖措施对春玉米产量和养分吸收的影响, 为黄土塬区可持续的农田管理提供参考。【方法】保护性耕作定位试验位于中国科学院黄土高原农业生态试验站, 始于 2003 年。设有 4 个传统耕作和 4 个免耕处理, 具体为传统耕作 (CT)、传统耕作+地膜覆盖 (CP)、传统耕作+秸秆覆盖 (CS)、传统耕作+地膜+秸秆覆盖 (CPS)、免耕 (NT)、免耕+地膜覆盖 (NP)、免耕+秸秆覆盖 (NS)、免耕+地膜+秸秆覆盖 (NPS)。调查分析了 2007—2016 年玉米产量和玉米养分吸收特性。【结果】4 个传统耕作处理中, CP 处理玉米籽粒平均产量比 CT 处理提高了 24.4%, 氮素和钾素养分利用效率最高; CS 处理玉米平均生物产量比 CT 处理提高了 39.4%, 玉米茎秆养分吸收量最高, 特别是总吸钾量提高了 101.7%; CPS 处理籽粒平均产量最高 (9381.6 kg/hm²), 总吸氮量和吸磷量分别比 CT 处理提高了 63.2% 和 123.7%。4 个免耕处理中, NP 处理籽粒平均产量比 NT 处理提高了 25.8%, NS 处理比 NT 处理降低了 3.9%; CPS 处理平均籽粒产量、生物产量、植株总吸氮量和总吸磷量最高。相同覆盖处理下, 传统耕作的平均籽粒产量、生物产量、氮磷总吸收量均高于免耕。平水年地膜覆盖增产效果最好 (27.0%~37.4%), 干旱年秸秆覆盖增产效果最好 (3.5%~8.5%), 丰水年则以地膜秸秆双元覆盖增产效果最大 (31.6%~38.1%)。【结论】黄土高原旱地条件下, 传统耕作对玉米的增产效果好于免耕。采用传统耕作结合地膜秸秆双元覆盖提高了玉米籽粒产量, 增加了玉米地上部养分吸收量, 在不同气候年份下对玉米增产效果均较好, 且年际间变异幅度较小, 是渭北旱塬增加玉米养分吸收, 提高籽粒产量的最佳田间管理措施。

关键词: 覆膜; 免耕; 春玉米; 产量; 养分吸收; 渭北旱塬

Coventional tillage and dual mulching of straw and plastic film has stable effects on spring maize yield and nutrient absorption in Weibei dryland

ZHAO Jing^{1,3}, LIU Meng^{2†}, FU Wei², NIU Yu-hua⁴, HAO Ming-de^{1,2*}

(1 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4 College of Chemistry and Chemical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: 【Objectives】In arid and semi-arid regions, the critical factor in achieving stable and high crop yield is the nutrient efficiency for crop utilization. We studied the effects of tillage and mulching measures on the yield and nutrient absorption of spring maize in dryland-fed agricultural areas of the Loess Plateau to reference sustainable farmland management in the region. 【Methods】The conservation tillage experiment was started in 2003. It was located in the Loess Plateau Agricultural Ecological Experimental Station of the Chinese Academy of

收稿日期: 2021-01-04 接受日期: 2021-05-12

基金项目: 陕西省科技厅农业领域项目 (2020NY-169); 西安市“科技+”行动计划—社会发展科技创新示范项目 (20SFSF0016); 榆林市科技计划项目 (2019-166)。

联系方式: 赵晶 E-mail: jing04519@yeah.net; †刘萌为共同第一作者 E-mail: mengl2019@163.com

* 通信作者 郝明德 E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn

Sciences. Eight treatments were selected, four traditional tillage and the other four no-tillage. The treatments under traditional tillage were traditional tillage (CT), plastic film mulching (CP), straw mulching (CS), and plastic film+straw mulching (CPS). The treatments under no-tillage were no-tillage control (NT), plastic film mulching (NP), straw mulching (NS), and plastic film+straw mulching (NPS). The maize biomass, yield, and nutrient accumulation in different parts of the crop were analyzed from 2007 to 2016. **【 Results 】** Comparing traditional tillage group, the CP treatment increased the average grain yield by 24.4% and recorded the highest N and K utilization efficiency. The CS treatment increased the average biomass by 39.4% and had the highest maize stalk nutrient uptake, particularly the average K uptake increased by 101.7%. The CPS treatment recorded the highest average grain yield (9381.6 kg/hm²) and increased the average total N and P uptake by 63.2% and 123.7% compared with CT, respectively. Comparing the no-tillage group, the NP treatment increased average grain yield by 25.8%, NS reduced grain yield by 3.9%, and CPS recorded the highest average grain yield, biomass, total nitrogen uptake and total phosphorus uptake of plants. Under the same mulching practice, CT treatment had higher average grain yield, biomass, N uptake by various organs, and total N and P uptake than NT treatment. In the normal rainfall years, plastic film mulching had the highest yield (27.0%–37.4%), straw mulching recorded the highest yield in the dry years (3.5%–8.5%), and dual mulching had the highest yield in the wet years (31.6%–38.1%). **【 Conclusions 】** In Weibei dryland, traditional tillage shows a better effect on maize production and yield. With traditional tillage, dual mulching using plastic film and straw is optimal for maize yield and nutrient absorption regardless of climate conditions.

Key words: film mulching; no-tillage; spring maize; yield; nutrient absorption; Weibei dryland

渭北旱塬区是我国典型的雨养旱作农业区,降水少且季节性分布不均,春旱现象频发是限制作物生长的重要因素^[1-2],长期以传统耕作的方式对土壤进行翻耕、耙耱,且秸秆不还田,导致表土暴露、土壤结构破坏,致使土壤侵蚀严重^[3]。地表覆盖和保护性耕作能够改善和调节土壤水、肥、热、气状况,也可引起作物的干物质累积、转移以及籽粒产量的变化^[4],因此成为提高该地区作物产量和肥料利用效率的重要措施。

国内外对免耕和覆盖措施进行了大量研究,有学者认为免耕会降低植株养分吸收^[5-6]。但也有研究认为免耕覆盖提高了玉米籽粒中氮素养分比例,玉米根部和茎叶中氮素养分含量有所降低,同时可以促进茎叶中的钾元素向籽粒和根部转移^[7]。研究表明,免耕土壤的结构、土壤微生物的数量和活性相对稳定,有利于提高养分利用效率^[8]。免耕覆盖能够提高冬小麦茎秆含钾量,增加作物对钾元素的利用率^[9]。秸秆还田可改善农田土壤特性^[10],调节农田小气候^[11],促进玉米生长,提高肥料利用率^[12],还能够促进同化产物向籽粒转运,提高植株对土壤养分的吸收量和转运量^[13]。地膜覆盖能够改善土壤生态环境,有效延长作物生长期^[14],各生育时期氮素、磷素、钾素积累量均显著高于不覆膜,在成熟期籽粒中钾的分配量可提高 323.6%^[15]。

迄今为止,对保护性耕作措施研究较多,且大

多保护性耕作开展年限较短,或是针对长期保护性耕作中某一时间段的研究,关于长期保护性耕作下玉米产量和养分吸收的动态变化研究较少。本研究通过对长期定位试验多年收集的数据进行分析,在一定程度上降低极端天气和偶然因素,如持续干旱或连续降雨等不可控因素带来的影响,以期阐明不同耕作和覆盖措施对玉米产量和养分吸收的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验从 2003 年开始,在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站进行。该地位于陕西省咸阳市长武县洪家镇王东村,地处北纬 35°12′、东经 107°40′,海拔 1200 m,地下水位 50~80 m,光温热量丰富,气候属暖温带半湿润大陆性季风气候,无灌溉条件,是典型的旱作雨养农业区。根据长武县气象资料统计,该地区年均降水量为 580.4 mm,降雨分布不均,7—9 月的降水量占全年总量的 57%,春旱现象较为常见。年平均气温 9.1℃,大于 10℃ 积温为 3029℃,年日照时数 2230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ/cm²,无霜期 171 天。2007—2016 年月降水量与月气温分布见图 1,2009、2010、2012 年为干旱年,年平均降水量为 488.6 mm,其中 2010 年降水量为 509 mm;2008、2013、2015、2016 年为平水年,年平均降水量为

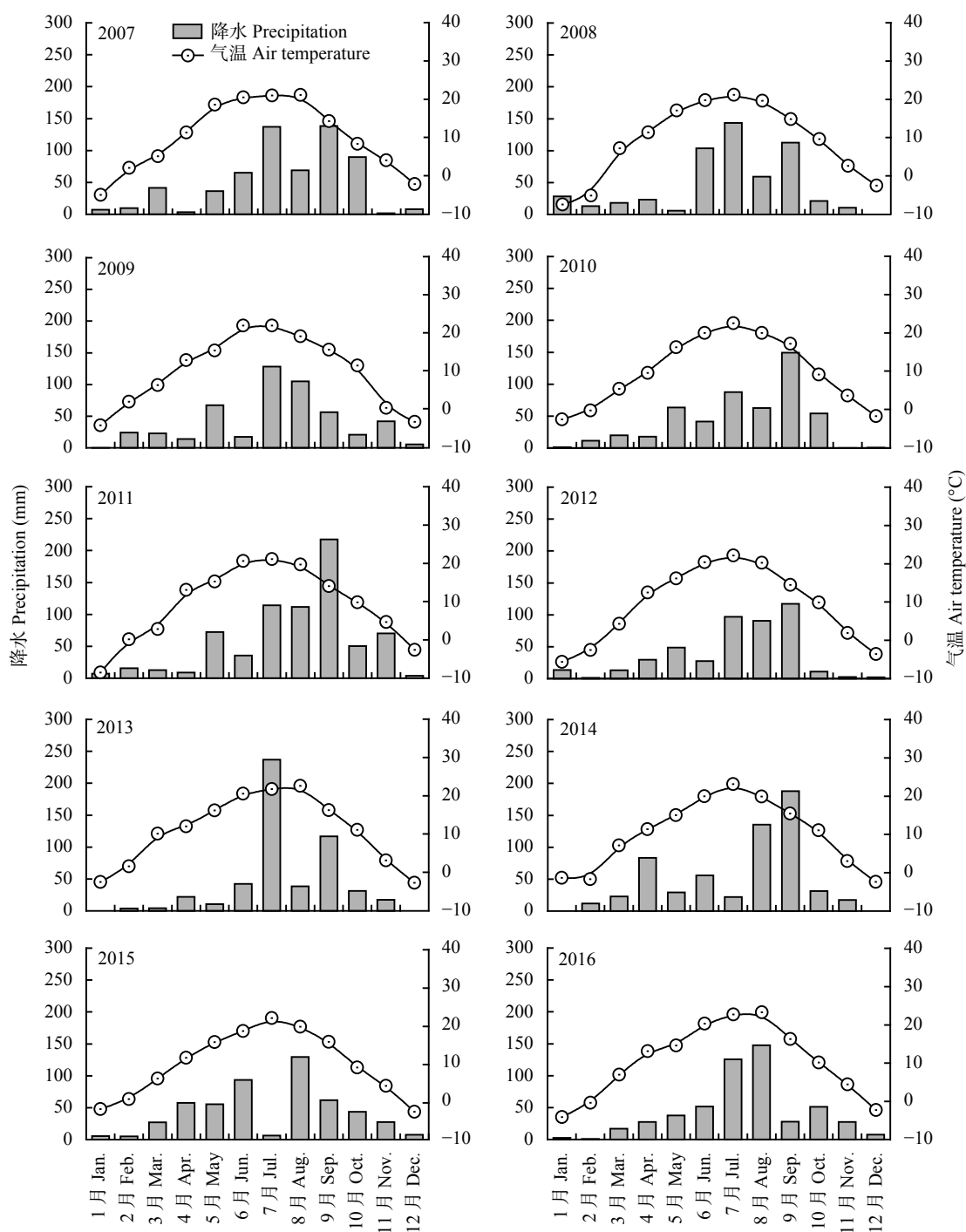


图 1 2007—2016 年月降水量与月气温分布图

Fig. 1 Distribution of monthly precipitation and monthly temperature from 2007 to 2016

526.8 mm, 其中 2013 年降水量为 523.4 mm; 2007、2011、2014 年为丰水年, 年平均降水量为 641.7 mm, 其中 2014 年降水量为 597.1 mm^[16]。土壤为黑垆土, 母质是深厚的中壤质马兰黄土, 田间持水量为 21.2%^[17], 萎蔫湿度 9%~12%, 土壤稳定湿度为 15.5%, 耕层土壤 pH 为 8.3, 有机质含量为 11.97 g/kg, 全氮含量为 0.87 g/kg, 全磷含量为 1.22 g/kg, 碱解

氮含量为 49.64 mg/kg, 速效磷含量为 16.22 mg/kg, 速效钾含量为 147.35 mg/kg, 土壤肥力状况在渭北旱塬区具有典型代表性。

1.2 试验设计

本研究针对 8 个处理进行分析, 每个处理设 3 次重复, 采用随机区组设计。试验处理如表 1。

小区面积均为 35 m² (5 m × 7 m), 每小区种植玉

表 1 具体试验处理措施
Table 1 Details of experimental treatments

代码 Code	处理 Treatment	耕作管理 Tillage management
CT	传统耕作 Traditional tillage	春玉米播种前翻耕一次，翻耕深度约为 20 cm，无覆盖 Plough 20 cm in depth before maize sowing, and no mulching of the soil
CP	CT + 地膜覆盖 CT + film mulching	播前翻耕，种植行覆膜，行间不覆膜。收获后移走全部玉米秸秆 Ploughing was carried out before sowing and the rows were covered with plastic films, but not the inter-row soil. All maize straw were removed from the field after harvest
CS	CT + 秸秆覆盖 CT + straw mulching	先翻耕后覆盖，收获的秸秆整秆均匀覆盖小区，玉米播种时秸秆收拢，放置行间 Before sowing, the area was ploughed and covered. After maize harvest, the whole stalk covered the area evenly. During subsequent maize sowing, the stalk was collected and placed between rows
CPS	CT + 地膜覆盖 + 秸秆覆盖 CT + film mulching + straw mulching	在 CT 基础上，秸秆与地膜间隔覆盖于地表，玉米于地膜两侧打孔种植 Based on CT, straw and mulching film were used to cover the ground, and maize was planted with holes on both sides of the mulching film.
NT	连年免耕 No-tillage	试验期连年免耕，不覆盖任何材料 No-tillage and no mulching was undertaken throughout the years.
NP	NT + 地膜覆盖 NT + film mulching	在 NT 基础上，地膜处理同 CP Based on NT, the treatment of the plastic film was the same as CP
NS	NT + 秸秆覆盖 NT + straw mulching	在 NT 基础上，秸秆处理同 CS Based on NT, the treatment of straw was the same as CS
NPS	NT + 地膜覆盖 + 秸秆覆盖 NT + film mulching + straw mulching	不耕作，地膜与秸秆间隔平铺于地表，地膜两侧打孔种植玉米及施肥 NT, the mulching film and the straw were laid flat on the ground surface, and both sides of the mulching film were perforated to allow for maize fertilization

米八行；对于秸秆与地膜二元覆盖的处理，地膜铺设宽度为 77 cm，秸秆宽度为 64 cm。各小区施 N (尿素) 量均为 150 kg/hm²，施 P₂O₅ (过磷酸钙) 量为 75 kg/hm²。播种量为 6 万株/hm²，采取宽窄行种植，宽行 60 cm，窄行 30 cm，株距为 20 cm。供试品种为‘先玉 335’。

1.3 试验方法

1.3.1 作物产量 在 2007—2011、2013—2016 年玉米收获后各小区单独取样，每小区选取中间两行测定产量，以实际收获籽粒干质量计算。在每个处理采集回来的玉米秸秆中选取 12 株，每两株作为一个小样放入牛皮纸袋中，在 105℃ 条件下杀青 30 min，在 60℃ 条件下烘干 48 h 至恒量，称量得到生物产量。

1.3.2 植株养分含量 在 2010、2013 和 2014 年玉米成熟期采集地上部分，测定玉米地上部器官茎秆、叶片、籽粒的氮、磷、钾养分含量。样品经浓硫酸和双氧水消煮后，氮含量采用凯氏定氮法测定，磷含量采用钒钼黄比色法测定，钾含量采用火焰光度计法测定。

1.3.3 相关参数计算与统计方法

籽粒氮(磷/钾)吸收量 (kg/hm²) = 籽粒
氮(磷/钾) 含量 × 玉米籽粒产量

(1)

茎氮(磷/钾)吸收量 (kg/hm²) = 茎氮
(磷/钾) 含量 × 收获期玉米茎干重

(2)

叶氮(磷/钾)吸收量 (kg/hm²) = 叶氮
(磷/钾) 含量 × 收获期玉米叶干重

(3)

氮(磷/钾) 素收获指数 = 籽粒中的氮(磷/钾)
素积累量/植物相应养分总积累量

(4)

氮(磷/钾) 素利用效率 (kg/kg) = 籽粒
产量/成熟期地上部氮(磷/钾) 总积累量

(5)

1.4 数据分析与绘图

基础数据处理使用 Excel 2010，不同处理之间的方差分析和多重比较使用 SPSS 22.0 软件，绘图用 Origin 2016 软件。

2 结果与分析

2.1 不同耕作和覆盖措施对春玉米籽粒产量和生物产量的影响

由图 2 和表 2 可知，在 2007—2016 年，随着种植年限的增加籽粒产量总体呈现波动性变化，其中 NT 和 NS 处理有下降趋势，而 CPS 和 NPS 处理波动较小，年际间变异系数仅分别为 9.7% 和 11.2%。综合 9 年平均数据，在传统耕作和免耕两种耕作方

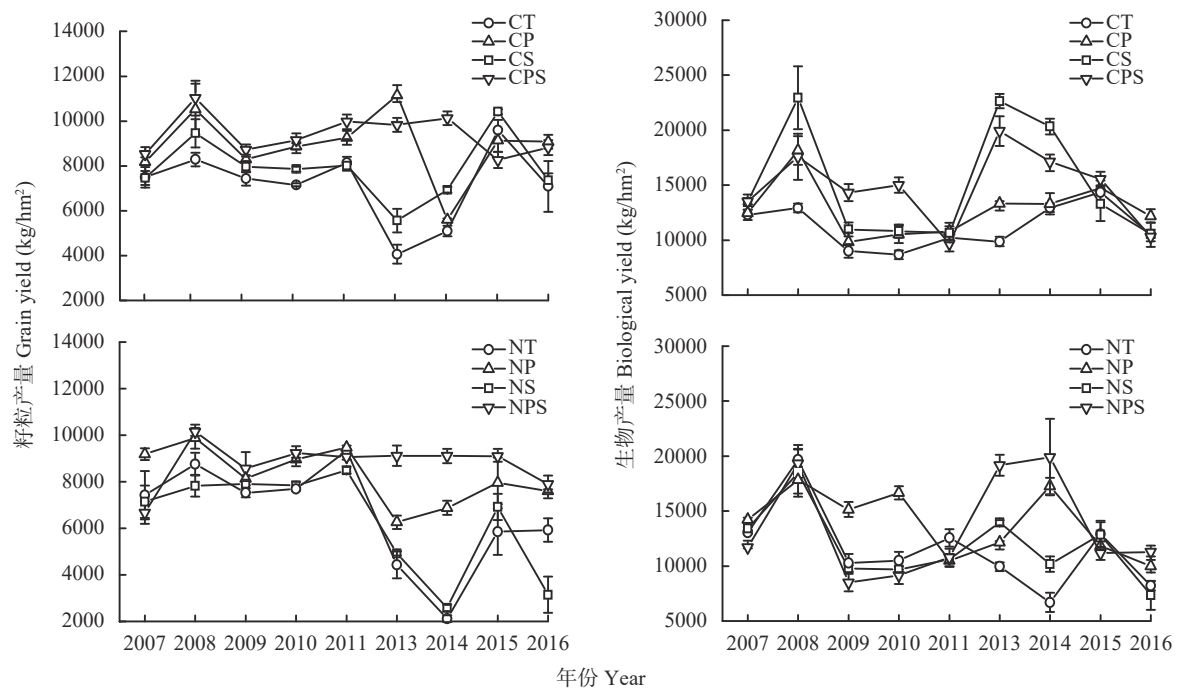


图 2 籽粒产量和生物产量年际间变化

Fig. 2 Annual variation of maize grain yield and biological yield

表 2 不同降水年型下平均籽粒产量

Table 2 Average grain yield of maize in different precipitation years

处理 Treatment	干旱年 (kg/hm ²) Dry year	平水年 (kg/hm ²) Normal year	丰水年 (kg/hm ²) Wet year	多年均值 (kg/hm ²) Multi-year average	CV1 (%)	CV2 (%)
CT	7290.5 ± 79.7 e	7256.5 ± 1183.8 cd	6907.2 ± 925.3 bc	7147.6 ± 556.0 de	3.0	23.3
CP	8576.3 ± 167.7 b	9969.2 ± 515.0 a	7670.8 ± 1086.7 abc	8893.5 ± 523.8 ab	13.2	17.7
CS	7907.0 ± 31.7 c	8198.4 ± 1086.3 bc	7466.2 ± 313.6 abc	7889.6 ± 466.6 cd	4.7	17.7
CPS	8933.4 ± 121.0 a	9486.5 ± 607.3 ab	9540.7 ± 512.2 a	9381.6 ± 303.0 a	3.6	9.7
NT	7600.6 ± 44.3 d	6234.5 ± 905.6 de	6287.4 ± 2160.0 bc	6555.7 ± 751.5 e	11.5	34.4
NP	8542.8 ± 236.5 b	7915.0 ± 745.9 bc	8502.1 ± 819.3 ab	8250.2 ± 405.7 bc	4.2	14.8
NS	7864.4 ± 23.2 c	5696.3 ± 1046.0 e	6063.4 ± 1787.6 c	6300.5 ± 734.3 e	17.7	35.0
NPS	8885.8 ± 192.5 a	9057.5 ± 457.8 ab	8274.6 ± 807.4 abc	8758.4 ± 327.9 abc	4.7	11.2

注 (Note): 在整个 10 年试验中, 干旱、平水和丰水年分别为 3 年、4 年和 3 年 Across the 10 year's localized experiment, there were 3 dry years, 4 normal years and 3 wet years; 同列数据后不同小写字母表示相同降水年型不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments in same rainfall type of years ($P < 0.05$); CV1—不同降水年型间变异系数 Coefficient of variation among different rainfall type of years; CV2—年际间变异系数 Inter-annual coefficient of variation.

式下, 地膜覆盖处理籽粒平均产量均高于不覆盖处理, 传统耕作条件下, CPS 处理的籽粒平均产量最高, 达 9381.6 kg/hm², 较 CT 处理提高了 31.3%。CP 和 CS 处理较 CT 处理分别提高了 24.4% 和 10.4%。在免耕条件下, NPS 处理籽粒平均产量最高, 达 8758.4 kg/hm², 较 NT 处理提高了 33.6%。而 NP 处理籽粒平均产量较 NT 处理提高了 25.8%, NS 处理比 NT 处理降低了 3.9%, NPS 处理籽粒平均

产量较 NS 处理提高了 39.0%。对于同一种田间管理措施, 传统耕作的籽粒平均产量均高于免耕, 秸秆覆盖时传统耕作籽粒平均产量比免耕高 25.2%, 不覆盖、地膜覆盖和地膜+秸秆覆盖时传统耕作籽粒平均产量比免耕分别高 9.0%、7.8% 和 7.1%。

由表 2 可知, 不同降水年型对玉米籽粒产量有一定影响, 在传统耕作条件下, 干旱年时 CP、CS 和 CPS 处理玉米平均籽粒产量比 CT 处理分别显

著提高了 17.6%、8.5% 和 22.5%；平水年时 CP、CS 和 CPS 处理玉米平均籽粒产量比 CT 处理分别提高了 37.4%、13.0% 和 30.7%；丰水年时 CP、CS 和 CPS 处理玉米平均籽粒产量比 CT 处理分别提高了 11.1%、8.1% 和 38.1%。在免耕条件下，干旱年时 NP、NS 和 NPS 处理玉米平均籽粒产量分别较 NT 处理显著提高了 12.4%、3.5% 和 16.9%；平水年时 NP 和 NPS 处理玉米平均籽粒产量分别较 NT 处理显著提高了 27.0% 和 45.3%；丰水年时 NP 和 NPS 处理玉米平均籽粒产量分别较 NT 处理提高了 35.2% 和 31.6%。因此，地膜覆盖在平水年增产效果最好；秸秆覆盖在干旱年增产效果最好；地膜秸秆双元覆盖在丰水年增产效果最好，三种覆盖方式都是在传统耕作方式下增产效果更优。并且干旱年玉米平均籽粒产量高于丰水年。

综合 9 年平均数据，在传统耕作和免耕两种耕作方式下，进行田间覆盖处理的平均生物产量均高于不覆盖处理 (图 2)。对于传统耕作，CS 处理平均生物产量最高，达 16315.4 kg/hm²，较 CT 处理提高了 39.4%，CP 和 CPS 处理较 CT 处理生物产量分别提高了 14.9% 和 32.2%。在免耕条件下，NPS 处理的平均生物产量最高，达 14429.3 kg/hm²，较 NT 处理提高了 25.0%，NP 和 NS 处理较 NT 处理平均生物产量分别提高了 21.8% 和 6.4%。对于同一种田间管理措施，传统耕作组 CT、CS 和 CPS 处理比免耕组 NT、NS 和 NPS 处理生物产量分别提高了 1.4%、32.8% 和 7.2%。

方差分析结果表明，不同降水年份、耕作方式和覆盖方式对春玉米籽粒产量和生物产量有显著影响 (表 3)。对于春玉米籽粒产量，虽然存在年份和耕作的交互作用显著影响，但是其主要受单因素 (耕作方式、覆盖方式) 的极显著影响。对于春玉米生物产量，受到降水年份、覆盖方式的极显著影响，此外，还受到耕作和覆盖方式交互作用、降水年份与耕作覆盖方式交互作用的极显著影响。但是降水年份与覆盖方式的交互作用对玉米籽粒产量和生物产量均无显著影响。

2.2 不同耕作和覆盖措施对玉米各器官养分吸收的影响

综合 2010、2013 和 2014 年玉米各器官养分吸收结果 (图 3、图 4、图 5)，田间覆盖处理提高了茎秆养分吸收量，3 年试验结果平均值显示，在传统耕作条件下，CS 处理玉米秸秆氮、磷、钾吸收量均最高，分别比 CT 处理高 83.1%、76.5% 和 96.6%。免耕条件下，NP 处理玉米秸秆的氮、磷吸收量均最高，分别比 NT 处理高 42.8% 和 46.7%。对于同一种田间管理措施，除不覆盖条件下传统耕作茎秆吸钾量低于免耕，其余传统耕作下玉米茎秆氮、磷和钾吸收量均高于免耕。秸秆覆盖处理提高了叶片的养分吸收，在传统耕作方式下，CS 处理玉米叶片的氮和钾吸收量最高，分别比 CT 处理高 49.9% 和 103.9%；免耕方式下，NS 处理的氮和磷吸收量最高，分别比 NT 处理高 60.3% 和 100.1%。在传统耕作条件下，覆盖处理提高了籽粒养分吸收量，其中 CPS 处理的氮和钾吸收量均最高，分别比 CT 处理高了 85.4% 和 121.2%；在免耕条件下，NPS 处理的氮和磷吸收量均最高，分别比 NT 处理提高了 85.2% 和 103.4%，对于同一种田间管理措施，传统耕作的玉米籽粒氮和磷吸收量均高于免耕。

2.3 不同耕作和覆盖措施对春玉米养分吸收总量的影响

在传统耕作和免耕两种耕作方式下，田间覆盖后植株总吸氮量、总吸磷量和总吸钾量均有所提高 (图 3、图 4、图 5)。3 年试验结果平均值显示，在传统耕作方式下，CPS 处理的植株总吸氮量和总吸磷量最高，比 CT 处理分别提高了 63.2% 和 123.7%，而 CS 处理的总吸钾量最高，比 CT 处理提高了 101.7%。在免耕方式下，NPS 处理的植株总吸氮量和总吸磷量最高，比 NT 处理分别提高了 62.3% 和 91.6%。对于同一种田间管理措施，传统耕作的植株总吸氮量和总吸磷量均高于免耕，其中传统耕作组 CT、CP、CS 和 CPS 处理植株的总吸氮量比免耕组 NT、NP、NS 和 NPS 处理分别高 19.7%、3.8%、37.7% 和 21.2%，而植株的总吸磷量传统耕作组

表 3 春玉米籽粒产量和生物量的方差分析

Table 3 Analysis of variance of spring maize grain yield and biological yield

项目 Item	年份 Year	耕作 Tillage	覆盖 Mulching	年份 × 耕作 Year × Tillage	年份 × 覆盖 Year × Mulching	耕作 × 覆盖 Tillage × Mulching	年份 × 耕作 × 覆盖 Year × Tillage × Mulching
籽粒产量 Grain yield	ns	**	**	*	ns	ns	ns
生物产量 Biological yield	**	ns	**	ns	ns	**	**

注 (Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ns—不显著 Not significant.

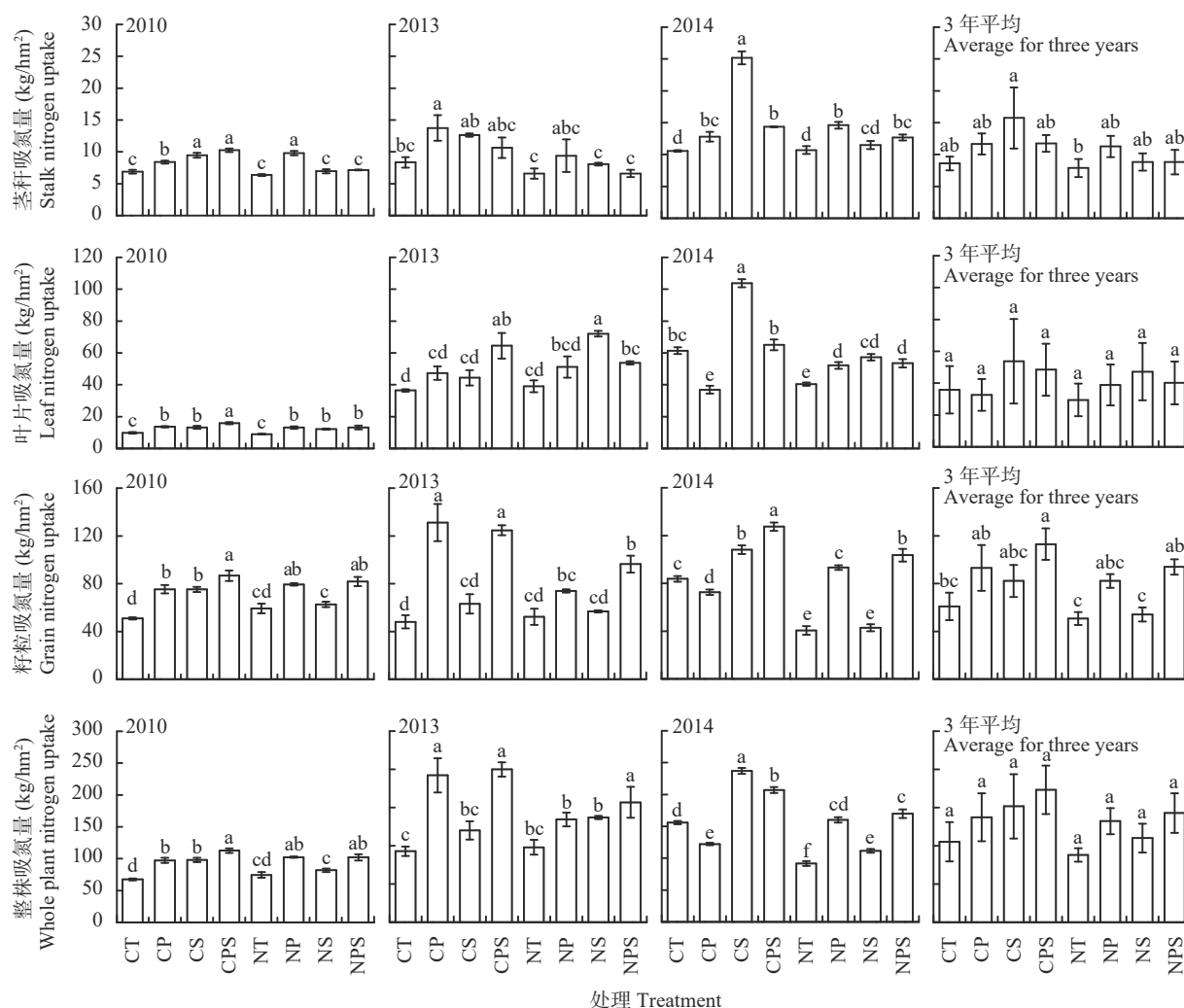


图3 玉米茎秆、叶片、籽粒及整株氮素吸收量

Fig. 3 Nitrogen uptake by stalks, leaves, grains and whole plants of maize

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.]

CT、CP、CS 和 CPS 处理比免耕组 NT、NP、NS 和 NPS 处理分别高 9.4%、61.4%、6.0% 和 30.0%，植株的总吸钾量表现为 CT < NT、CP < NP、CS > NS 和 CPS > NPS。

2.4 不同耕作和覆盖措施对春玉米养分收获指数的影响

2010、2013 和 2014 年玉米 3 年平均养分收获指数结果 (图 6) 显示, 在传统耕作条件下, CP 处理的氮素和磷素收获指数最高, 比 CT 处理分别高 13.6% 和 19.2%, 而 CPS 处理的钾素收获指数最高, 比 CT 处理高 18.2%。在免耕条件下, NPS 处理的氮素和磷素收获指数最高, 分别比 NT 处理高 12.1% 和 9.9%, 而 NP 处理的钾素收获指数最高, 比 NT 处理高 13.6%。对于同一种田间管理措施, 传

统耕作氮素收获指数均高于免耕, 传统耕作组 CT、CP、CS 和 CPS 处理分别比免耕组 NT、NP、NS 和 NPS 处理高 1.7%、6.3%、11.8% 和 1.5%。CT、CP 和 CS 处理的磷素收获指数相比于 NT、NP 和 NS 处理分别提高了 2.8%、13.0% 和 13.6%。CS 和 CPS 处理的钾素收获指数分别比 NS 和 NPS 处理高 9.5% 和 13.0%。

2.5 不同耕作和覆盖措施对春玉米养分利用效率的影响

2010、2013 和 2014 年玉米 3 年平均养分利用效率结果 (图 7) 显示, 在传统耕作条件下, CP 处理的氮素和钾素利用效率最高, 分别为 64.6 和 562.7 kg/kg, 比 CT 处理分别高 8.4% 和 65.6%, 但田间覆盖处理降低了磷素利用效率。在免耕条件下,

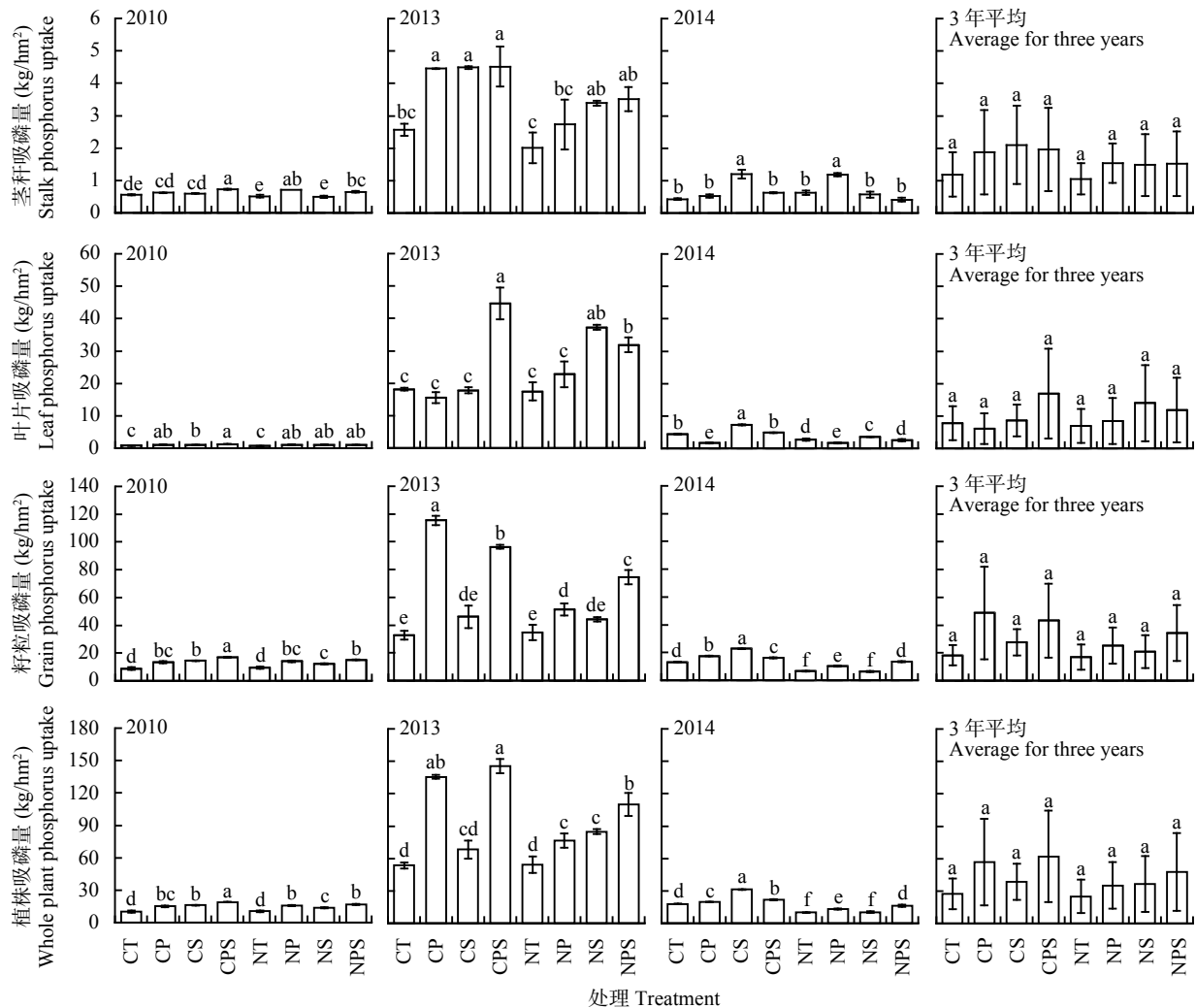


图4 玉米茎秆、叶片、籽粒及整株磷素吸收量

Fig. 4 Phosphorus uptake by stalks, leaves, grains and whole plants of maize

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.]

NPS 处理的氮素和钾素利用效率最高, 分别比 NT 处理高 15.2% 和 136.8%, 而 NP 处理磷素利用效率最高, 比 CT 处理高 0.6%。对于同种田间管理措施, 传统耕作组 CT、CP 和 CS 处理氮素利用效率分别比免耕组 NT、NP 和 NS 处理高 6.0%、11.1% 和 0.1%。不覆盖时传统耕作的磷素利用效率比免耕高 3.3%。不覆盖和地膜覆盖时, 传统耕作的钾素利用效率分别比免耕相应处理提高 44.6% 和 49.0%。

3 讨论

3.1 不同管理措施对玉米籽粒产量和生物产量的影响

在干旱地区, 春季低温不利于作物生长^[18-19], 地膜覆盖能够在低温的春季提高表土温度, 使种子提

前 3~10 天萌发^[20], 并加速玉米成熟^[19], 提高玉米产量。本研究也发现类似结果, 地膜覆盖处理 (CP、CPS、NP、NPS) 提高了籽粒产量, 较传统耕作不覆盖处理平均提高了 15.4%~31.3%, 其中传统耕作条件下的地膜秸秆二元覆盖平均籽粒产量最高, 达到了 9381.6 kg/hm² (图 2、表 2)。此外, 本研究 10 年长期试验表明秸秆覆盖下传统耕作和免耕处理产量都出现了下降趋势 (图 2), 这与 Zhang 等^[21]的研究结果类似, 一方面可能是因为秸秆常年覆盖影响了土壤温度^[22-23], 进而影响土壤养分的矿化, 从而影响作物生长; 另一方面可能是因为秸秆覆盖后田间水热条件更有利于病虫害的发生, 进而影响玉米的产量^[24]。周怀平等^[25]认为秸秆覆盖还田在偏干旱年份的增产效果尤为突出。这与本研究结果不尽相同, 主要可能

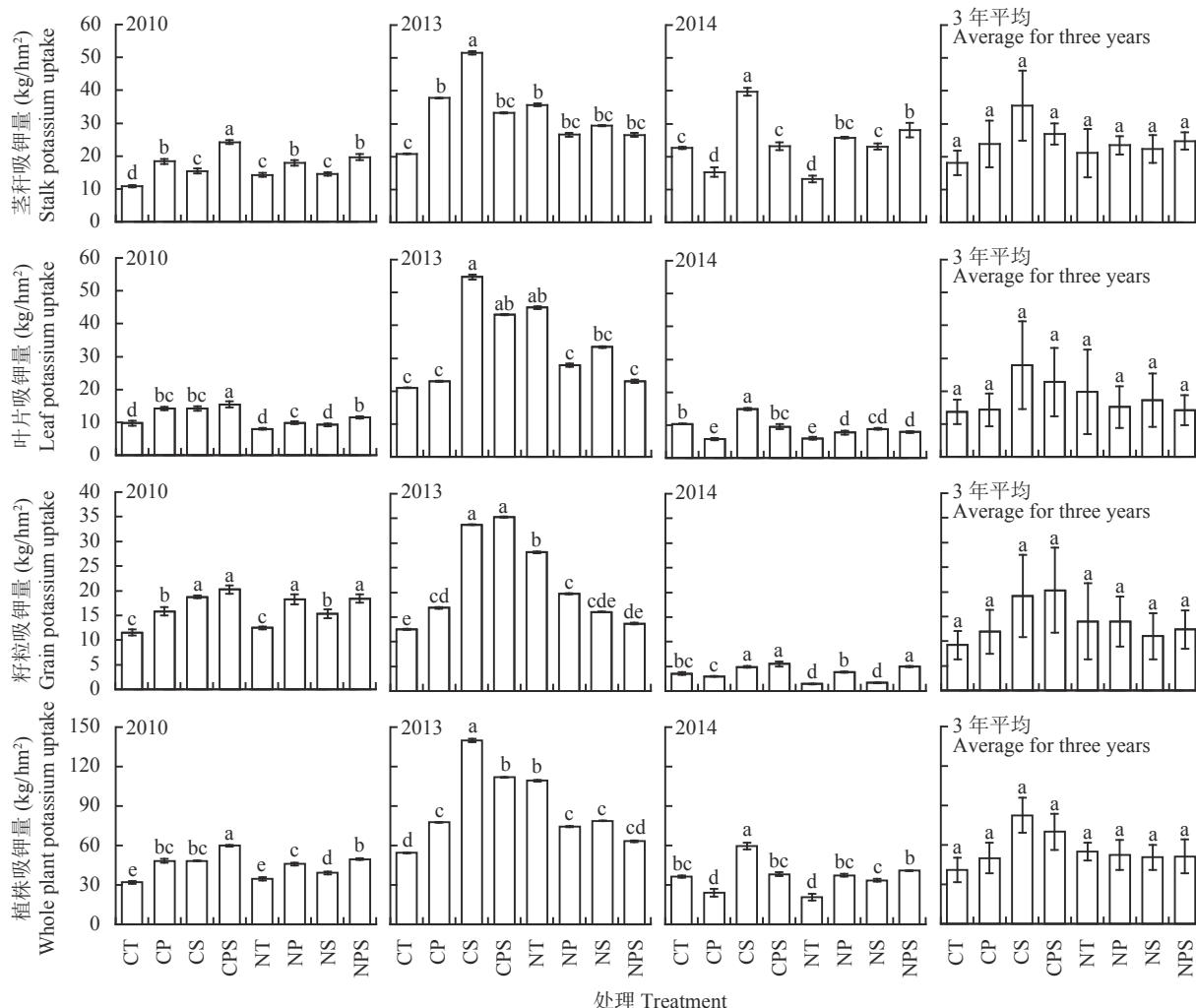


图5 玉米茎秆、叶片、籽粒及整株钾素吸收量

Fig. 5 Potassium uptake by stalks, leaves, grains and whole plants of maize

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.]

是在干旱年秸秆覆盖可明显减轻土壤干燥化程度, 增加土壤储水量^[25]。此外, 本研究结果表明, 地膜覆盖在平水年增产效果最好, 地膜秸秆双元覆盖在丰水年增产效果最好 (表 2), 造成这种现象的原因在于平水年水热均匀, 地膜覆盖在玉米生长早期可以提供合适的土壤水分和温度, 并且地膜覆盖通过抑制蒸发可以保留作物生长所需的水分^[22, 26]; 在丰水年降水量偏多, 玉米生长期光热资源不足, 但是地膜秸秆双元覆盖保证了玉米生长期土壤温度, 地膜覆盖阻挡过多雨水的入渗, 秸秆覆盖保证了土壤通气性, 因此有利于玉米产量的提高。本研究中, 进行田间覆盖的处理 (CP、CS、CPS、NP、NS 和 NPS) 提高了生物产量, 较传统耕作不覆盖处理平均提高了 5.0%~39.4%, 而免耕不覆盖 (11541.4

kg/hm²) 比传统耕作不覆盖 (11701.0 kg/hm²) 生物产量降低了 1.4% (图 2、表 2)。这一方面可能是因为秸秆覆盖后提高了玉米抽穗期后的生物重^[27]; 另一方面可能是因为残茬覆盖会增加光合面积和光合势, 提高光合速率^[28], 促进作物生长发育, 从而起到提高生物产量的作用。

3.2 不同管理措施对玉米养分吸收的影响

植株对养分的吸收情况会对作物籽粒产量产生直接影响, 本研究结果表明, 田间覆盖处理整体上较传统耕作不覆盖处理提高了茎秆、叶片和籽粒的吸氮量和吸磷量; 而免耕不覆盖各器官的吸氮量和吸磷量较传统耕作不覆盖 3 年平均降低了 7.5%~17.9%。各种保护性耕作措施 (NT、NP、NS、NPS) 较传统耕作不覆盖处理的茎秆、叶片和籽粒的吸钾

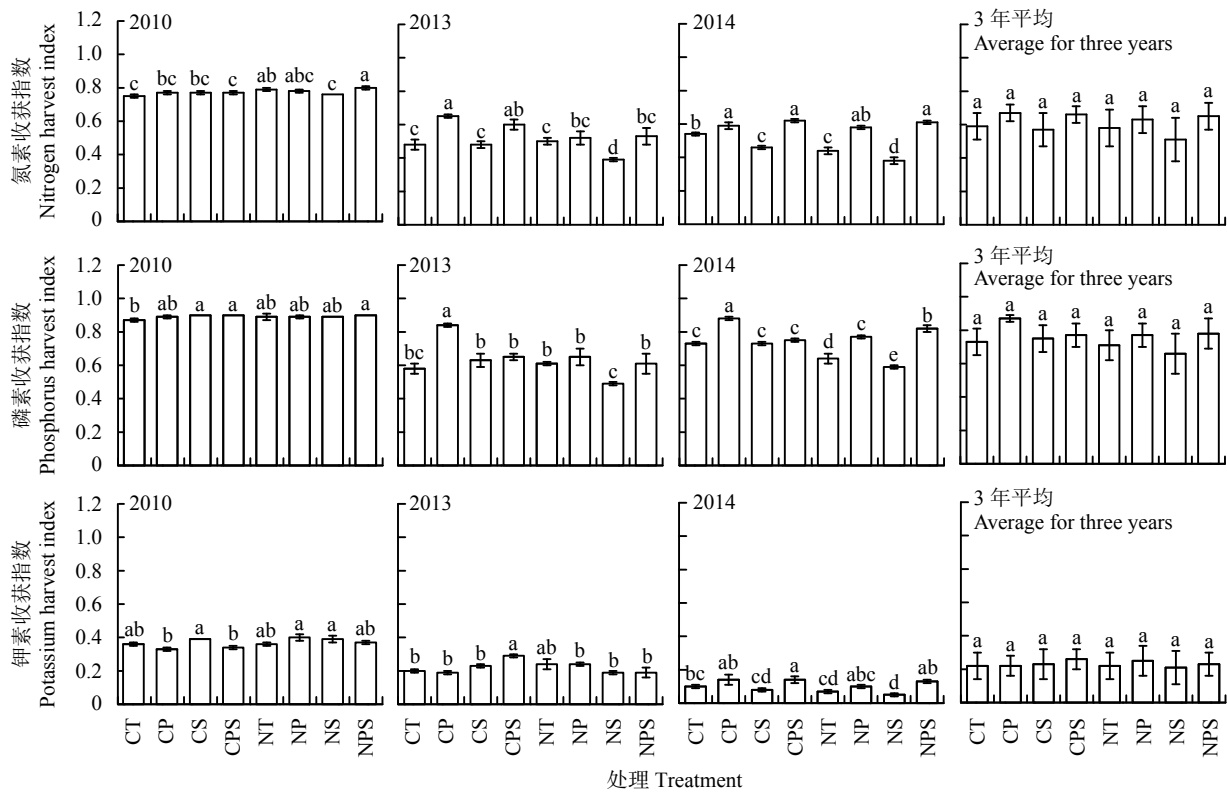


图 6 不同覆盖耕作方式下玉米养分收获指数

Fig. 6 Nutrient harvest index of maize under different mulching and tillage methods

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.]

量 3 年平均提高了 3.1%~52.4% (图 3、图 4、图 5)。秸秆还田可改善农田土壤特性^[9], 调节农田小气候^[1], 促进玉米生长, 提高植株各器官对土壤养分的吸收量和转运量^[13]。籽粒是氮素养分的主要储存部位, 秸秆覆盖提高了叶片生理活性, 从而通过增加叶片和籽粒中氮素和磷素积累量以及茎秆中钾素积累量, 提高了地上部养分总吸收量^[29]。地膜覆盖能够改善土壤生态环境, 有效延长作物生长期, 使得各生育时期氮素、磷素、钾素吸收量均显著高于不覆膜处理^[15], 而免耕会降低植株养分吸收^[5-6]。本研究结果表明, 2010、2013 和 2014 年田间覆盖处理 (CP、CS、CPS、NP、NS、NPS) 玉米平均养分总吸收量较传统耕作不覆盖均有所提高, 总吸氮量提高了 4.5%~64.3% (4.7~67.8 kg/hm²), 总吸磷量提高了 29.1%~127.8% (7.9~34.8 kg/hm²), 总吸钾量提高了 22.1%~101.7% (9.0~41.6 kg/hm²); 而免耕不覆盖的玉米养分总吸收量较传统耕作不覆盖均有所降低, 总吸氮量降低了 16.4%, 总吸磷量降低了 8.6% (图 3、图 4、图 5)。这与战秀梅等^[30]研究结果相似。与秸秆不还田相比, 秸秆还田后总吸氮量和总吸钾量

均有所增加, 对于磷素, 秸秆还田后腐解释放养分, 有利于春玉米后期磷素的积累和转移。此外, 磷在土壤中的移动性差, 扩散速率低, 且易被吸附和固定^[31], 本研究发现平水年 (2013 年) 玉米吸磷量显著高于干旱年 (2010 年) 和丰水年 (2014 年), 可能是因为水分影响磷素营养在土壤中的运移和植物对磷素的吸收、利用和分配^[32], 2010 年是干旱年, 水分的亏缺降低了玉米植株对于磷素的吸收利用, 而 2014 年是丰水年, 过量的水分导致玉米籽粒产量和生物产量较低 (图 2), 从而使得玉米植株的磷素吸收量低于 2013 年平水年。

养分收获指数和利用效率反映了不同养分元素对玉米生物产量和籽粒产量的贡献^[33]。本研究结果表明, 地膜覆盖处理 (CP、CPS、NP、NPS) 整体上较传统耕作不覆盖提高了氮、磷和钾素收获指数, 主要因为地膜覆盖可以增加土壤微生物活性, 提高植物对养分的吸收能力^[34], 并且具有增温保墒的作用, 从而有助于促进作物生长发育^[22], 因此覆膜对玉米养分收获指数具有提升作用。本研究还发现, 免耕地膜+秸秆覆盖较传统耕作的氮、磷和钾素利用效率分

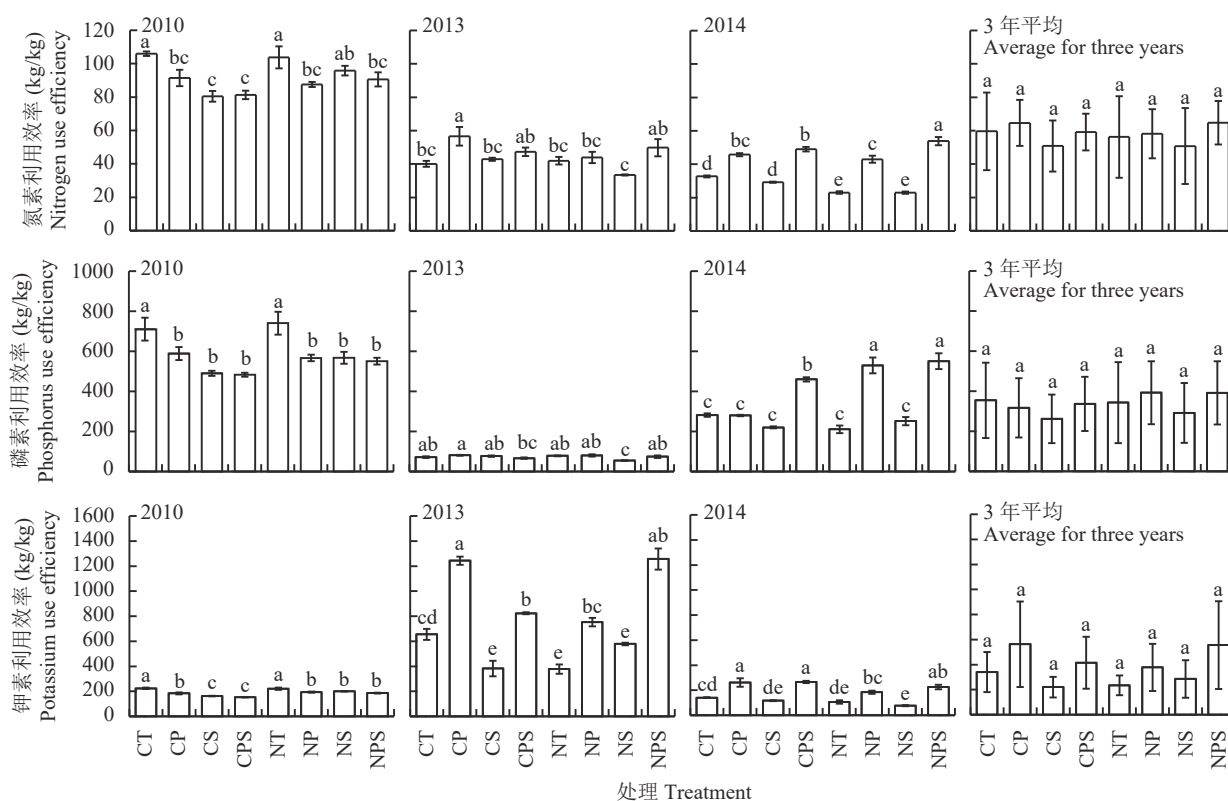


图 7 不同覆盖耕作方式下玉米养分利用效率

Fig. 7 Nutrient use efficiency of maize under different mulching and tillage methods

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.]

别提高了 8.7%、10.4% 和 63.7% (图 7), 因此, 在免耕基础上采用秸秆还田和地膜覆盖互作的方式对促进玉米各器官氮磷钾养分的吸收利用效果最好。

4 结论

在翻耕和免耕条件下, 地膜覆盖在平水年增产效果最好 (27.0%~37.4%); 秸秆覆盖在干旱年增产效果最好 (3.5%~8.5%); 地膜秸秆双元覆盖在丰水年增产效果最好 (31.6%~38.1%), 3 种覆盖都是在传统耕作方式下增产效果更优。地膜覆盖、秸秆覆盖与地膜秸秆双元覆盖在翻耕和免耕条件下都提高了玉米各器官养分吸收量, 地上部总养分吸收量提高了 4.5%~127.8%, 其中传统耕作+地膜+秸秆覆盖 (CPS) 处理平均总吸氮量提高了 63.2%, 平均总吸磷量提高了 123.7%。

传统耕作条件下地膜秸秆双元覆盖 (CPS) 显著提高了玉米籽粒产量, 增加了玉米地上部养分吸收量, 在不同气候年型下对玉米增产效果均较好, 且年际间变异幅度较小, 是渭北旱塬增加玉米养分吸

收, 提高籽粒产量的最佳田间管理措施。

参考文献:

- [1] 胡锦昇, 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.
- [2] 张玉娇, 李军, 郭正, 等. 渭北旱塬小麦产量和土壤水分对保护性耕作的响应模拟[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 800–808.
Zhang Y J, Li J, Guo Z, *et al.* Simulated responses of winter wheat yield and soil moisture to different conservation tillage practices in Weibei Highlands, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 800–808.
- [3] Mielke L N, Wilhelm W W, Fenster C R. Soil physical characteristics of reduced tillage in a wheat-fallow system[J]. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 1984, 27: 1724–1728.
- [4] 王缠军, 郝明德, 折凤霞, 等. 黄土区保护性耕作对春玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 193–198.
Wang C J, Hao M D, Zhe F X, *et al.* Effects of different conservation tillage measures on spring maize yield and soil fertility in the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(4): 193–198.
- [5] 杨培培, 杨明欣, 董文旭, 等. 保护性耕作对土壤养分分布及冬小麦

- 吸收与分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 755–759.
- Yang P P, Yang M X, Dong W X, *et al.* Effect of conservation tillage on wheat and soil nutrient distribution and absorption[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 755–759.
- [6] 苏伟, 鲁剑巍, 周广生, 等. 免耕及直播密度对油菜生长、养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(7): 1519–1526.
- Su W, Lu J W, Zhou G S, *et al.* Effect of no-tillage and direct sowing density on growth, nutrient uptake and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(7): 1519–1526.
- [7] 张萌, 李立科, 郝明德. 免耕覆盖对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(6): 67–72.
- Zhang M, Li L K, Hao M D. Effect of no-tillage with straw cover on corn yield and soil fertility[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2013, 22(6): 67–72.
- [8] 陈军胜, 苑丽娟, 呼格·吉乐图. 免耕技术研究进展[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(5): 184–190.
- Chen J S, Yuan L J, HuGe J L T. The review of the zero-tillage research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(5): 184–190.
- [9] 杨云马, 贾树龙, 孟春香, 等. 不同耕作及秸秆还田条件下冬小麦养分利用率研究[J]. *华北农学报*, 2010, 25(S1): 202–204.
- Yang Y M, Jia S L, Meng C X, *et al.* Study on nutrient use efficiency of winter wheat under different tillage and straw treatments[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(S1): 202–204.
- [10] Kumar K, Goh K M, Scott W R, *et al.* Effects of ¹⁵N-labeled crop residues and management practices on subsequent winter wheat yields, nitrogen benefits and recovery under field conditions[J]. *Agricultural Science*, 2001, 136: 35–53.
- [11] Blanco-Canqui H, Lal R, Post W M, *et al.* Changes in long-term no-till corn growth and yield under different rates of stover mulch[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(4): 1128.
- [12] 王明达. 秸秆还田方式与化肥配施对玉米生长及土壤养分的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学硕士学位论文, 2017.
- Wang M D. Effects of straw returning and fertilizer application on maize growth and brown soil nutrients[D]. Shenyang: MS Thesis of Shenyang Agricultural University, 2017.
- [13] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 不同耕作与施肥方式下白土的水稻产量及养分吸收量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(3): 754–760.
- Wu P P, Wang J J, Li L J. Rice yields and nutrient uptake under different ploughing depths and fertilizations in white soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3): 754–760.
- [14] 李援农, 范兴科, 樊惠芳, 等. 地膜覆盖灌水对土壤水分变化及作物生长的影响[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(2): 45–47.
- Li Y N, Fan X K, Fan H F, *et al.* Effect of plastic mulching irrigation on soil moisture variation and plant growth[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(2): 45–47.
- [15] 郑险峰, 周建斌, 王春阳, 等. 覆盖措施对夏玉米生长和养分吸收的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 80–83, 98.
- Zheng X F, Zhou J B, Wang C Y, *et al.* Effects of different mulching methods on the growth and nutrients absorption of maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 80–83, 98.
- [16] Guo S, Zhu H, Dang T, *et al.* Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China[J]. *Geoderma*, 2012, 189: 442–450.
- [17] Fu W, Fan J, Hao M, *et al.* Evaluating the effects of plastic film mulching patterns on cultivation of winter wheat in a dryland cropping system on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: 106550.
- [18] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, *et al.* Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. *European Journal of Agronomy*, 2009, 31: 241–249.
- [19] Zhou L M, Li F M, Jin S L, *et al.* How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2009, 113: 41–47.
- [20] Zhou L M, Zhang F, Liu C A. Improved yield by harvesting water with ridges and subgrooves using buried and surface plastic mulchs in a semiarid area of China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 150: 21–29.
- [21] Zhang S L, Li P R, Yang X Y, *et al.* Effects of tillage and plastic mulch on soil water, growth and yield of spring-sown maize[J]. *Soil & Tillage Research*, 2011, 112: 92–97.
- [22] 潘雅文, 樊军, 郝明德, 等. 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, *et al.* 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.
- [23] 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 K, *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.
- [24] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(7): 15–19.
- Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(7): 15–19.
- [25] 周怀平, 解文艳, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 321–330.
- Zhou H P, Xie W Y, Guan C L, *et al.* Effects of long-term straw-returning on corn yield, economic benefit and water use in arid farming areas[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 321–330.
- [26] Dai Z, Hu J, Fan J, *et al.* No-tillage with mulching improves maize yield in dryland farming through regulating soil temperature, water and nitrate-N[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 309: 107288.
- [27] Wang X J, Jia Z K, Liang L Y. Effect of straw incorporation on the temporal variations of water characteristics, water-use efficiency and maize biomass production in semi-arid China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 153: 36–41.
- [28] 付国占, 李潮海, 王俊忠, 等. 残茬覆盖与耕作方式对夏玉米光合产物生产与分配的影响[J]. *华北农学报*, 2005, 20(3): 62–66.

- Fu G Z, Li C H, Wang J Z, *et al.* Effects of stubble mulch and tillage management on assimilating production and distribution in summer maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(3): 62–66.
- [29] 萨如拉, 于宗波, 邹继承, 等. 隔年秸秆还田对连作玉米养分积累及叶片生理特性的影响[J]. *玉米科学*, 2019, 27(3): 82–87.
- Sa R L, Yu Z B, Tai J C, *et al.* Effects of straw returning to field in the alternate years on nutrient accumulation and leaf physiological characteristics of continuous cropping maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(3): 82–87.
- [30] 战秀梅, 李亭亭, 韩晓日, 等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 861–868.
- Zhan X M, Li T T, Han X R, *et al.* Effects of nitrogen fertilization methods on yield, profit and nitrogen absorption and utilization of spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4): 861–868.
- [31] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. *New Phytologist*, 2003, 157(3): 423–447.
- [32] 唐宏亮, 马领然, 张春潮, 段霄霄. 水分和磷对苗期玉米根系形态和磷吸收的耦合效应[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(5): 582–589.
- Tang H L, Ma L R, Zhang C C, Duan X X. Coupled effect of water and phosphorus on root growth and phosphorus uptake of maize at seedling stage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(5): 582–589.
- [33] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- [34] 葛均筑, 李淑娅, 钟新月, 等. 施氮量与地膜覆盖对长江中游春玉米产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(6): 1081–1092.
- Ge J Z, Li S Y, Zhong X Y, *et al.* Effects of nitrogen application and film mulching on yield performance parameters and nitrogen use efficiency of spring maize in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(6): 1081–1092.